

# ST1

Version 24

*Avril 2025*

## **Calcul de structures**

# SOMMAIRE GENERAL

CHAPITRES

PAGES

## **PARTIE I -**

**AIDE-MEMOIRE DES COMMANDES PROJET ..... 4**

**PRESENTATION DE ST1 ..... 25**

INTRODUCTION ..... 27

NOUVELLES FONCTIONNALITES..... 28

LIMITES DU PROGRAMME ..... 29

DEFINITION DES TYPES LEXICAUX ..... 30

CONVENTIONS D'ECRITURE ..... 32

UTILISATION ..... 33

DETECTION DES ERREURS ..... 34

**LISTE DES COMMANDES ..... 35**

COMMANDES GENERALES ..... 37

DESCRIPTION DE LA GEOMETRIE ..... 42

DEFINITION DES MATERIAUX ..... 72

DESCRIPTION DE LA PRECONTRAITE ..... 90

ACTIVATION SELECTIVE (HORS PHASAGE)..... 96

DOMAINE D'ETUDE ..... 98

CHARGEMENTS FIXES..... 103

CHARGES D'EXPLOITATION ..... 125

PHASAGE DE CONSTRUCTION (ST1 V2 SEULEMENT)..... 177

DYNAMIQUE ..... 195

MODES CRITIQUES FLAMBEMENT LINEAIRE ELASTIQUE ..... 213

CALCUL AU FEU (ST1 V2 SEULEMENT)..... 215

ENVELOPPES ET COMBINAISONS..... 232

RAPPEL DES DONNEES ..... 238

EDITION DES RESULTATS ..... 242

COMMANDES GRAPHIQUES ..... 245

ECRANS GRAPHIQUES ..... 257

PSEUDO-PROGRAMMATION..... 261

EXEMPLES DE FICHIERS DE DONNEES ..... 284

**ANNEXES ..... 328**

DESCRIPTION DU FICHIER PARAMETRES..... 329

PRINCIPES DE CALCUL ..... 332

CONCEPTION..... 394



*I*

# **AIDE-MEMOIRE DES COMMANDES PROJET**



**COMMANDES GENERALES**

LIRE <'Nom du fichier',CONSOLE>	p37-38
SORTIE <'Nom du fichier',CONSOLE,FICHER> (SUITE) (NON PAGINE)	p39
ENREGISTRER (PROJET) ('Nom du projet')	p40
PROJET ('Nom du projet')	p40
LISTER PROJET	p40
PAGINATION	p41
(ASC_PAGE i)	
(MAX_LIGNE n)	
FIN	
RETOUR	p37-38
QUITTER	p40
MESSAGE <AUCUN, TOUT, (REDUIT)>	p41

**GEOMETRIE**

OPTION <PLANE, GRILL, SPATIALE>	p43-44-44
TITRE 'Titre de la structure'	p45
NOEUD liste coor1 coor2 coor3	p46
ou NOEUD liste (X coor1) (Y coor2) (Z zcoor3)	
GENER n NOEUD (ID) j (pas0) X coor1 (pas1) Y coor2 (pas2) Z coor3 (pas3)	p46
APPUI liste1 (NOEUD liste2) (DECOL < NON , <X,Y,Z> <POS,NEG> >) (DX) (DY) (DZ) (RX) (RY) (RZ)	p47
APPUI liste1 (NOEUD liste2) (DECOL < NON , <X,Y,Z> <POS,NEG> >) (ROT alpha) EL m1 ... mj1	p49
APPUI liste1 (NOEUD liste2) (DECOL < NON , <X,Y,Z> <POS,NEG> >) (ROT alpha) EL DI d1 ... dj2	p49
BARRE liste DE j1 A j2	p52
ou BARRE liste j1 j2	
GENER n BARRE (ID) j (pas0) DE j1 (pas1) A j2 (pas2)	p52
EXC liste (OR (X) x ... (Z) z) (EX (X) x ... (Z) z)	p53
ART liste (OR (RY) (RZ)) (EX (RY) (RZ))	p55
BETA liste beta	p57
CARA liste SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz) (EXTY exty) (EXTZ extz)	p59
CARA VAR LIN Y liste	p59
OR SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz) (EXTY exty) (EXTZ extz)	
EX SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz) (EXTY exty) (EXTZ extz)	
CARA VAR LIN Z liste	p59
OR SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz) (EXTY exty) (EXTZ extz)	
EX SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz) (EXTY exty) (EXTZ extz)	
CARA VAR PARA liste	p59
OR SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (VY vy) ... (WZ wz) (EXTY exty) (EXTZ extz)	
MI SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (VY vy) ... (WZ wz) (EXTY exty) (EXTZ extz)	
EX SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (VY vy) ... (WZ wz) (EXTY exty) (EXTZ extz)	
CARA PSE liste SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz)	p59
ZONE 1 (KFX kfx) (KFY kfy) (KFZ kfz) (KMX kmx) XL xl	
...	
ZONE n (KFX kfx) (KFY kfy) (KFZ kfz) (KMX kmx)	
CARA PSE liste SX sx ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz)	
PLASTIQUE (POS) (NEG) (KFX ffx) (KFY ffy) (KFZ ffz) (KMX fmx)	
ZONE 1 (KFX kfx) (KFY kfy) (KFZ kfz) (KMX kmx)	
MASSE PROPRE	p69
(NOEUD liste MASSE (SUP) m1 ... mj1)	
(NOEUD liste MASSE (SUP) DI d1 ... dj1)	
(BARRE listeb ( < MASSE (SUP), MASSE (SUP) DI, MASSE NUL > ) )	
(BARRE listeb (EXC (OR (X) x ... (Z) z) (EX (X) x ... (Z) z) ) ...	
... MASSE (SUP) < (UNI m1), (LIN m1 m2), (PARABOL m1 m2 m3) >	
FIN	

**MATERIAUX**

CONS liste <(E e) (NU nu) (RO ro) (G\_DYN g) (TEMP temp) (AMORTISSEMENT am), MAT i> p72-73

```
MAT i ('Titre du matériau') p75
  E <BPEL,BHP1,BHP2,BPEL_BL> (<MPA,TM2,KNM2>) FC28 fc28
  (NU nu)
  (RO ro) (G_DYN g) (AMORTISSEMENT am)
  (TEMP temp)
  (RETRAIT <BPEL,BHP1,BHP2,BPEL_BL> (ER er))
  (FLUAGE <BPEL,BHP1,BHP2,BPEL_BL> (TRACTION <OUI, NON>))
  (ROH roh ROS ros RM rom)
  (ROBS robs EA Ea)
  (T_THERM FCP fcp LAMBDA lambda DT tpa THETA tetamax)
FIN
```

```
MAT i ('Titre du matériau') p78
  E CEB (<MPA,TM2,KNM2>) FCK fck
  (NU nu)
  (RO ro) (G_DYN g) (AMORTISSEMENT am)
  (TEMP temp)
  (RETRAIT CEB (ER ecs0))
  (FLUAGE CEB(TRACTION <OUI, NON>))
  (RH rh H h) (CIMENT <SL,N,R,RS>)
FIN
```

```
MAT i ('Titre du matériau') p80
  E EC2 (<MPA,TM2,KNM2>) FCK fck
  (NU nu)
  (RO ro) (G_DYN g) (AMORTISSEMENT am)
  (TEMP temp)
  (RETRAIT EC2 (ER ecs0))
  (FLUAGE EC2 (TRACTION <OUI, NON>) (LINEAIRE<OUI, NON>))
  (RH rh RM_EC h) (CIMENT <S,N,R>)
  (T_THERM FCMP fcmp LAMBDA lambda DTP lisdt THETA listeta)
FIN
```

```
MAT i ('Titre du matériau') p83
  E <EC2_BHP1, EC2_BHP2> (<MPA,TM2,KNM2>) FCK fck
  (NU nu)
  (RO ro) (G_DYN g) (AMORTISSEMENT am)
  (TEMP temp)
  (RETRAIT <EC2_BHP1, EC2_BHP2> (ER ecs0))
  FLUAGE
  <EC2_BHP1,EC2_BHP2>(TRACTION<OUI, NON>) (LINEAIRE<OUI, NON>))
  (RH rh RM_EC h) (CIMENT <S,N,R>) (ROS ros)
  (T_THERM FCMP fcmp (LAMBDA lambda) DTP lisdt THETA listeta)
FIN
```

```
MAT i ('Titre du matériau') p85
  E FIB_2010 (<MPA,TM2,KNM2>) FCK fck
  (NU nu)
  (RO ro) (G_DYN g) (AMORTISSEMENT am)
  (TEMP temp)
  (RETRAIT FIB_2010 (ER ecs0))
  (FLUAGE FIB_2010 (TRACTION <OUI, NON>))
  (RH rh RM_EC h) (CIMENT <S,N,R>) (ROS ros)
  (T_THERM FCMP fcmp (LAMBDA lambda) DTP lisdt THETA listeta)
FIN
```

```

MAT i ('Titre du matériau')
E ACI_B3 (<MPA, TM2, KNM2>) FCK fck
  (NU nu)
  (RO ro) (G_DYN g)
  (TEMP temp)
  (RETRAIT ACI_B3)
  (ROS ros)
  (FLUAGE ACI_B3 (TRACTION <OUI, NON>))
  (RH rh RM_EC h) (CIMENT classe_ciment)
  (K_FORME ks) (K_CURE kc TEMPS_CURE tc)
  (QUANTITE_EAU w QUANTITE_CIMENT c QUANTITE_AGREGAT ag)
FIN

```

p87

```

MAT i ('Titre du matériau')
E ... paramètres ...
RETRAIT ... paramètres ...
FLUAGE ... paramètres ...
AVANCE K_MODULE km
  K_RETRAIT_ENDOGENE kre K_RETRAIT_DESSICATION krd
  K_FLUAGE_ENDOGENE kfe K_FLUAGE_DESSICATION kfd)
  K_FLUAGE_CINETIQUE kfc
FIN

```

p89

## PRECONTRAINTE

```

PREC i ('Titre de la précontrainte')
SECTION ap
TENSION sigma
E ep
  (<RG fprg, FPK fpk> R1000 ro1000)
  (RECU g)
<(PERTE F f PHI phi), (PERTE MU f KPHI kphi)> (PERTE INST pinst)
  (PRETENSION <PARABOL LG_SCEL lg1, LINEAIRE LG_SCEL lg1,
    BILINEAIRE LG_SCEL lg1 lg2 COEF alpha>)
FIN

```

p90

```

CABLE i ('Nom du câble')
PREC j ((NON) SIMUL n)
TENSION <OR, EX, OR EX, EX OR>
  (BARRE liste)
  (PAS_CABLE pas)
  (LG_GAINE OR lg1 EX lg2)
TRACE (INTERIEUR, EXTERIEUR)
  (X)x (Y)y ((Z)z) (ALIGNE, PENTE pt, GIS gis, RAYON ray)
FIN

```

p92

## ACTIVATION SELECTIVE (HORS PHASAGE)

ACTIVER TOUT	p96
ACTIVER (BARRE liste) (APPUI liste)	p96
DESACTIVER TOUT	p97
DESACTIVER (BARRE liste) (APPUI liste)	p97

## DOMAINE D'ETUDE

ETUDE (SUP,SEUL) (EFFORT) (DEPLA) liste1 SE liste2 (PAS lpas) (ABS,REL)	p98
--	-----

## CONTRAINTE GENERALISEE

CONTRG i ('Titre de la contrainte généralisée') (CTE)	p100
liste (N cfn) (TY cfty) ... (MZ cfmz) (CST cst)	
VAR LIN	
liste OR (N cfn) (TY cfty) ... (MZ cfmz) (CST cst)	
EX (N cfn) (TY cfty) ... (MZ cfmz) (CST cst)	
VAR PARA	
liste OR (N cfn) (TY cfty) ... (MZ cfmz) (CST cst)	
MI (N cfn) (TY cfty) ... (MZ cfmz) (CST cst)	
EX (N cfn) (TY cfty) ... (MZ cfmz) (CST cst)	
FIN	

**CHARGEMENTS FIXES**

CHARG i ('Titre du chargement')	<i>p103</i>
POIDS PROPRE liste	<i>p105</i>
POIDS PROPRE <X,Y,Z> (POS,NEG) liste	
NOEUD liste (FX fx) (FY fy) ... (MZ mz)	<i>p106</i>
BARRE	
liste CON XL x1 (REL,ABS) (FX fx) (FY fy) ... (MZ mz)	<i>p107</i>
(GLO,LOC)	
liste UNI (FX fx) (FY fy) ... (MZ mz) (GLO,LOC,PRO)	<i>p109</i>
liste LIN XL x11 x12 (REL,ABS)	<i>p112</i>
(FX fx1 fx2) (FY fy1 fy2) ... (MZ mz1 mz2) (GLO,LOC,PRO)	
APPUI liste (DX dx) (DY dy) ... (RZ rz)	<i>p114</i>
TEMP	
liste UNI dt	<i>p115</i>
liste (GY dty) (GZ dtz)	<i>p116</i>
DEFOR	
liste CON XL x1 (REL,ABS) (DX dx) (DY dy) ... (RZ rz)	<i>p117</i>
(GLO,LOC)	
liste UNI (DX dx) (DY dy) ... (RZ rz) (GLO,LOC)	<i>p118</i>
liste LIN XL x11 x12 (REL,ABS)	<i>p119</i>
(DX dx1 dx2) (DY dy1 dy2) ... (RZ rz1 rz2) (GLO,LOC)	
CABLE	<i>p120</i>
liste (TENSION)	
(PERTE (INST) (RETRAIT er) (UNI dsig) (RELAX (cf)))	
FIN	
CHARG i COMB('Titre du chargement')	<i>p120</i>

**EXECUTION DES CHARGEMENTS FIXES**

EXEC CHARG (liste)	<i>p123</i>
EXEC CHARG PSE (liste)	<i>p123</i>

## CHARGES D'EXPLOITATION

```

TABLIER
  (CLASSE (TRAFIC) iclass)
  (ZONE TRANS i LARG xlarg (VOIE nvoie))
  (PAS_LIGNE pasl)
  (LDIF ldif)
  BARRE listeb
  (REP_TRANS
    KBARRE listekb KTRANS listek
    ... )
FIN

SURCH i ('Titre de la charge roulante')
  ( < EFFORT <N, TY, TZ, MX, MY, MZ>,
    DEPLA <DX, DY, DZ, RX, RY, RZ>,
    CONTR <VY, VZ, WY, WZ, VYVZ, VYWZ, WYVZ, WYWZ>,
    CONTRG j
    PRESS <PX, PY, PZ, MX> > )
  (REAC <FX, FY, FZ, MX, MY, MZ>

  < AL, AL FREIN, AL PLANCHER, AL PLANCHER FREIN, AL PIETON,
    BC, BC FREIN, BT, TROT,
    MC80, ME80, MC120, ME120,
    CV_C1, CV_C2, CV_D2F1, CV_D3F1, CV_D3F2, CV_E2F1, CV_E3F1, CV_E3F2,
    VS_F61_D, VS_F61_E,
    VS_1946_3CL, VS_1946_4CL,
    VS_48_GRUE, VS_72_OAN, VS_72_GRUE, VS_72_OAE,
    VS_94_OAN, VS_94_GRUE, VS_94_OAE,
    VS_120_OAN, VS_108_GRUE, VS_120_OAE

    ALG j,
    CONV j,

    LM1 <(CARA), FREQ> <(CENTRE), LIBRE>,
    LM2 <CARA, FREQ>,
    LM3 <VSJ, nj>
      (ZONEVS kvs YVS yvs1 yvs2 (REL, ABS)
        (<EXC exc, DEBORDVOIE debv>) (PONDVS pondvs)
        (LM1 <CARA, (FREQ), NUL> <(CENTRE), LIBRE>
          (LGEXCLU lg) (CORRELE vj vk)),
      LM4 <CTE, VAR>,
      TROT_EC, TROT_LM1,
      CH_23M3, CH_34M3,
      LMF3, LMF3B >

    (ZONE liste)
    (POND pond)
    (PAS_CONV pasc) (SENS psens)
    (SEUIL seuil)
  )
FIN

```

p128

p138

p144

p158

p162

p165

```
EUROCODE p165
  (PSI_FREQ (TS psits) (UDL psiudl))
  (POIDS (TS list_poidsts) (UDL listpoidsudl))
  (CLASSE iclass AJUSTEMENT (TS lstcoeff) (UDL lstcoeff) (LM2 coef))
  ...
FIN
```

```
ALG i ('Titre de la charge roulante') p158
  (DIR_GLO (FX fx) (FY fy) (FZ fz) (MX mx) (MY my) (MZ mz))
  (DIR_LOC (FX fx) (FY fy) (FZ fz) (MX mx) (MY my) (MZ mz))
  DENS
    long1 dens1
    ...
    longi densi
    ...
  (LARG_VOIE v0)
  (COEF_TRANS liste)
FIN
```

```
CONV i ('Titre du convoi') p162
  (DIR_GLO (FX fx) (FY fy) (FZ fz) (MX mx) (MY my) (MZ mz))
  (DIR_LOC (FX fx) (FY fy) (FZ fz) (MX mx) (MY my) (MZ mz))
  ESSIEU
    j XL xl POIDS poids (YL listeyl) (IMPACT impactl impactt)
    ...
  (MAX_CAM ncam)
  (MAX_FILE nfile)
  (LONG_xlong)
  (LARG_xlarg)
  (COEF_TRANS liste)
FIN
```

## EXECUTION DES CHARGES D'EXPLOITATION

```
EXEC SURCH (liste) p176
```

## DEFINITION D'UN PHASAGE (ST1 V2 SEULEMENT)

PHASAGE (i) ('Titre du phasage')	p177
(SUITE PHASAGE liste)	p180
ENV v ( < EFFORT <N, TY, TZ, MX, MY, MZ>, DEPLA <DX, DY, DZ, RX, RY, RZ>, CONTR <VY, VZ, WY, WZ, VYVZ, VYWZ, WYWZ>, CONTRG c PRESS <PX, PY, PZ, MX> > )	p181
(REAC <FX, FY, FZ, RX, RY, RZ> (ACTIVER, DESACTIVER) ENV liste	
DATE d	p183
ACTIVER APPUI liste	p184
VERINER APPUI liste	p184
ACTIVER BARRE liste (AGE a) (MODE <ABS, REL>)	p185
DESACTIVER (BARRE liste, APPUI liste)	p187
CHARG	(cf. commande CHARG p103) p188
...	
FIN	
TENDRE CABLE liste (NON) (INJECTE)	p189
INJECTER CABLE liste	p189
DETENDRE CABLE liste	p190
TENDRE_BANC CABLE liste	
RELACHER_BANC CABLE liste	
ETAT e ('Titre de l etat')	p192
MODIFIER APPUI liste	(cf. commande APPUI p114) p193
FIN PHASAGE	

## EXECUTION DES PHASAGES (ST1 V2 SEULEMENT)

EXEC PHASAGE (liste)	p194
----------------------	------

**DYNAMIQUE***p195***EXECUTION DES MODES PROPRES**

EXEC MODE (nb) (METHODE &lt;1,2&gt;)

*p196*

ou

EXEC MODE (METHODE &lt;1,2&gt;) (&lt;(FREQUENCE fq, RATIO rt&gt;) (AVANCE nm)

**SPECTRE**

AMORTISSEMENT i

*p198*

< AUTOMATIQUE MASSE alpha RIGIDITE beta,  
 MODE j KSI ksij

... ,

ENERGIE KSI ksij

&gt;

(POND pond)

FIN

SPECTRE j

*p200*

(POND pond)

(BETA beta)

&lt;ACCELERATION

PERIODE tj AX axj AY ayj (AZ azj)

... ,

EUROCODE

<HORIZONTAL(<X,Y>),VERTICAL> AX ax (S s) (ST st) (ALPHA alpha)...  
 ...(ETA eta) PERIODE tb tc td te,

EUROCODE REDUIT

<HORIZONTAL(<X,Y>),VERTICAL> AX ax (S s) (ST st) (ALPHA alpha)...  
 ...(GAMMA gamma) (Q q) (BETA beta0) PERIODE tb tc td te

&gt;

FIN

SPECTRE ic REPONSE

*p203*

SPECTRE isp

&lt;LIN, SRSS, CQC&gt;

(POND X pondx Y pundy (Z pondz))

FIN

**EXECUTION DES REPONSES SPECTRALES**

EXEC SPECTRE REPONSE(listj)

*p203*

## HISTORIQUE DES ACCELERATIONS AUX SOLS (ST1 v2)

```

ACCELEROGRAMME j
( < EFFORT <N, TY, TZ, MX, MY, MZ>,
  DEPLA <DX, DY, DZ, RX, RY, RZ>,
  CONTR <VY, VZ, WY, WZ, VYVZ, VYWZ, WYVZ, WYWZ>,
  CONTRG ic
  PRESS <PX, PY, PZ, MX> > )
(REAC <FX, FY, FZ, MX, MY, MZ>)
(METHODE < (1), 2, 3 (ALPHA alpha )>)
(PAS_TEMPS pas_temps)
(POND pond)
(BETA beta)
(ACCELERATION
  AX axj AY ayj (AZ azj)
  ...
)
FIN

```

p205

## EXECUTION DES HISTORIQUES D'ACCELEROGRAMME (ST1 v2)

```
EXEC HISTORIQUE (TEMPS <OUI, NON>) (lstj)
```

p206

## DYNAMIQUE DES CONVOIS (ST1 v2)

```

DYNAMIQUE CONVOI j
( < EFFORT <N, TY, TZ, MX, MY, MZ>,
  DEPLA <DX, DY, DZ, RX, RY, RZ>,
  CONTR <VY, VZ, WY, WZ, VYVZ, VYWZ, WYVZ, WYWZ>,
  CONTRG ic
  PRESS <PX, PY, PZ, MX> > )
(REAC <FX, FY, FZ, MX, MY, MZ>)
(METHODE < (1), 2, 3 (ALPHA alpha )>)
CONVOI numc
PAS_TEMPS pas_temps
VITESSE vitesse
TEMPS temps
(POND pond)
FIN

```

p207

## EXECUTION DE L'ANALYSE TEMPORELLE POUR UN CONVOI (ST1 v2)

```
EXEC HISTORIQUE (TEMPS <OUI, NON>) CONVOI (lstj)
```

P208

## DYNAMIQUE DE CHARGE FORCEE (ST1 v2)

DYNAMIQUE CHARGE j P209

```
( < EFFORT <N, TY, TZ, MX, MY, MZ>,
  DEPLA <DX, DY, DZ, RX, RY, RZ>,
  CONTR <VY, VZ, WY, WZ, VYVZ, VYWZ, WYVZ, WYWZ>,
  CONTRG ic
  PRESS <PX, PY, PZ, MX> > )
  (REAC <FX, FY, FZ, MX, MY, MZ>)
  (METHODE < (1), 2, 3 (ALPHA alpha)>)
PAS_TEMPS pas_temps
TEMPS temps
MODE nm
(FREQUENCE f0)
(PHI lstphi)
(COEF lstcoef)
BARRE lst (FX fx) (FY fy) (FZ fz) (MX mx) (MY my) (MZ mz) (GLO, LOC)
...
FIN
```

## EXECUTION DE L'ANALYSE TEMPORELLE POUR UNE CHARGE FORCEE (ST1 v2)

EXEC HISTORIQUE (TEMPS <OUI, NON>) CHARGE (lstj) p 211

## MODES CRITIQUES FLAMBEMENT LINEAIRE ELASTIQUE

p213

## EXECUTION DES CHARGES CRITIQUES DE FLAMBEMENT

EXEC FLAMBEMENT (nb) (METHODE <1, 2>) (CTE <CHARG, COMB, ETAT, PHASAGE i>) (VAR <CHARG, COMB, ETAT, PHASAGE j>) p213

## CALCUL AU FEU (ST1 V2)

```

MAT i ('Titre du matériau')
E FEU EC2 (<MPA, TM2, KNM2>) FCK fck (TRACTION <OUI, NON>)
(UU uu)
(CONDUCTIVITE <conduc, EC2 (<AN <NORMAL, BHP>, alpha>))
(GRANULAT <SILICE, CALCAIRE>)
(EMISSIVITE em)
(RHO_FEU rho_feu)
(CHALEUR_SPECIFIQUE_MASSIQUE chalm)
FIN
EXPOSITION FEU i
(<CN, HC, HCM, ADIABATIQUE, TEMP temp,
 <LOI_GAZ , LOI_PAROI>
  tj tempj
  ...
 >)
(PROTECTION res)
(CONVECTION <EC1, alphac>)
FIN
SECTION is ('Titre de section')
DALLE EPAISSEUR e
(LARGEUR larg)
EXPOSITION FEU (<SUP,VY> ej) (<INF,WY> ek)
MAT m
FIN
SECTION is ('Titre de section')
RECTANGLE EPAISSEUR e
(LARGEUR larg)
EXPOSITION FEU (VY ej) (WY ek) (WZ el) (VZ eo)
MAT m
FIN
SECTION is ('Titre de section')
PERIMETRE
MAT m
(MAILLE dx)
Y y1 Z z1 EXPOSITION expol
...
Y yi1 Z zi1 EXPOSITION expoil
Y yi2 Z zi2 EXPOSITION expo2
...
Y yn Z zn EXPOSITION expon
FIN
ACIER ac ('Titre')
DIAMETRE phi
(SECTION as)
(CLASSE <N, X>)
(LAMINES <CHAUD, FROID>)
E es
FYK fy
FIN

```

p215

p218

p218

p221

p223

p220

ARMATURE ar ('Titre') <(ACIER ac1 NOMBRE nb1 ENROBAGE SUP enr1) (ACIER ac2 NOMBRE nb2 ENROBAGE INF enr2),  (ACIER ac NOMBRE nb LOCAL Y y Z z) ... > FIN	<i>p225</i>
CARA ib SECTION i (ARMATURE j) FIN	<i>p226</i>
LISTER SECTION liste LISTER MATERIAU liste LISTER EXPOSITION liste LISTER ACIER liste LISTER ARMATURE liste	<i>p226</i>
CHARG i COMB ('Titre') CHARG liste coef ... FIN	<i>p227</i>
FEU i ('Titre') DUREE t (TEMP temp) FIN	<i>p226</i>
INCENDIE i ('Titre') FEU j (LOCAL) CHARG k FIN	<i>p228</i>
ANALYSE FEU NEWTON_RAPHSON MAX_ITER n (PERIODE i) (Y <CTE, VAR>) (CARA <ZERO, GARDER>) FIN	<i>p228</i>
<b>EXECUTION DES CHARGES D INCENDIE</b>	
EXEC INCENDIE lst	<i>p229</i>
RESU FEU (liste) SECTION (lists) (DUREE lst) FIN	<i>p230</i>
RESU INCENDIE (liste) BARRE (listb) (CARA CHAUD) (TEMP (MAX) (MIN) (tmin)) FIN	<i>p230</i>
RESU INCENDIE (liste) BARRE (listb) (EFFORT) (DEPLA) FIN	<i>p230</i>
RESU INCENDIE (liste) APPUI (lista) FIN	<i>p230</i>

## ENVELOPPES ET COMBINAISONS

```

COMB i ('Titre de la combinaison')
  CHARG liste1 (coef1)
  COMB liste2 (coef2)
  ETAT liste3 (coef3)
  PHASAGE liste4 (coef4)
  SPECTRE liste5 (coef5)
  INCENDIE liste6 (coef6)

```

p232

FIN

```

ENV i ('Titre de l''enveloppe')
( < EFFORT <N, TY, TZ, MX, MY, MZ>,
  DEPLA <DX, DY, DZ, RX, RY, RZ>,
  CONTR <VY, VZ, WY, WZ, VYVZ, VYWZ, WYVZ, WYWZ>,
  CONTRG ie
  PRESS <PX, PY, PZ, MX> > )
  (REAC <FX, FY, FZ, MX, MY, MZ>)
  CHARG liste1 (coef1)
  SURCH liste2 (coef2)
  COMB liste3 (coef3)
  ETAT liste4 (coef4)
  PHASAGE liste5 (coef5)
  SPECTRE liste6 (coef6)
  HISTORIQUE liste7 (coef7)
  ENV liste8 (coef8)

```

p233

FIN

```

ENV i COMB ('Titre de la combinaison d''enveloppe')
( < EFFORT <N, TY, TZ, MX, MY, MZ>,
  DEPLA <DX, DY, DZ, RX, RY, RZ>,
  CONTR <VY, VZ, WY, WZ, VYVZ, VYWZ, WYVZ, WYWZ>,
  CONTRG ie
  PRESS <PX, PY, PZ, MX> > )
  (REAC <FX, FY, FZ, MX, MY, MZ>)
  CHARG liste1 (cfmin1) (cfmax1)
  SURCH liste2 (cfmin2) (cfmax2)
  COMB liste3 (cfmin3) (cfmax3)
  ETAT liste4 (cfmin4) (cfmax4)
  PHASAGE liste5 (cfmin5) (cfmax5)
  SPECTRE liste6 (cfmin6) (cfmax6)
  HISTORIQUE liste7 (cfmin7) (cfmax7)
  ENV liste8 (cfmin8) (cfmax8)

```

p236

FIN

**RAPPEL DES DONNEES**

LISTER GEOM	<i>p238</i>
LISTER NOEUD (liste)	<i>p238</i>
LISTER BARRE (liste)	<i>p238</i>
LISTER CARA (liste)	<i>p238</i>
LISTER MAT (liste)	<i>p238</i>
LISTER APPUI (liste)	<i>p238</i>
LISTER CONTRG (liste)	<i>p238</i>
LISTER ACTIVATION (APPUI) (BARRE)	<i>p238</i>
LISTER PREC (liste)	<i>p239</i>
LISTER CABLE (liste)	<i>p239</i>
LISTER CARA CABLE (liste)	<i>p239</i>
LISTER CHARG (liste)	<i>p239</i>
LISTER TABLIER	<i>p240</i>
LISTER ALG (liste)	<i>p240</i>
LISTER CONV (liste)	<i>p240</i>
LISTER SURCH (liste)	<i>p240</i>
LISTER PHASAGE (liste)	<i>p240</i>
LISTER MASSE	<i>p241</i>
LISTER AMORTISSEMENT	<i>p241</i>
LISTER SPECTRE	<i>p241</i>
LISTER HISTORIQUE	<i>p241</i>

**EDITION DES RESULTATS**

RESU p242  
 (CHARG (liste)) (COMB (liste)) (ENV (liste)) (SURCH (liste))  
 (ETAT (liste)) (PHASAGE (liste))  
 (NOEUD (liste)) (APPUI (LOC) (liste))  
 (CABLE (liste)) (XS <REL,ABS> liste))  
 (BARRE (liste))  
 (EFFORT) (DEPLA) (CONTR) (CONTRG (liste)) (PRESS)  
 (MODE (listem) (FREQUENCE) (DEPLA))  
 (SPECTRE (liste) (MODE (listem)) (APPUI (LOC))...  
 ... (BARRE (listeb)) (EFFORT) (DEPLA) (VITESSE) (ACCELERATION)  
 (CONTR) (PRESS) (CONTRG (lst)))  
 (HISTORIQUE (listeh) (NOEUD (listen)) ...  
 ... (<DEPLA, VITESSE, ACCELERATION>) (APPUI (LOC))...  
 ... (BARRE (listeb) (EFFORT) (CONTR) (PRESS) (CONTRG (lst))))  
 (FLAMBEMENT (listem) (MODE) (DEPLA))  
 FIN

**PSEUDO-PROGRAMMATION : RECUPERATION DES RESULTATS**

liste = vide p263  
 DIM nom(n) p264  
 SI (test) << >> p268  
 SINON << >>  
 POUR i = liste << >> p271  
 GET DEPLA NOEUD i (CHARG, COMB, ETAT, PHASAGE, FLAMBEMENT, INCENDIE) j p273  
 GET DEPLA <MAX, MIN> NOEUD i ENV j p273  
 GET REAC APPUI i <CHARG, COMB, ETAT, PHASAGE, INCENDIE> j p274  
 GET REAC <MAX, MIN> APPUI i <ENV, SURCH> j p274  
 GET <EFFORT, DEPLA, CONTR, PRESS, CONTRG k> p275  
 BARRE i SEC n <CHARG, COMB, ETAT, PHASAGE, INCENDIE> j  
 GET <EFFORT, DEPLA, CONTR, PRESS, CONTRG k> p275  
 <MAX, MIN> BARRE i SEC n <ENV, SURCH > j  
 GET <ACCELERATION, VITESSE> <MAX, MIN> BARRE i SEC n HISTORIQUE j p277  
 GET TENSION CABLE i SEC n < CHARG, ETAT, PHASAGE > j p278  
 GET ALPHA FLAMBEMENT i p278  
 ECRIRE 'test' p279  
 PAUSE p279

**COMMANDES GRAPHIQUES**

DESS	<i>p245</i>
ECRAN (nom)	<i>p246</i>
TRA nom (COULEUR, MONOCHROME)	<i>p246</i>
SAUV	<i>p247</i>
CLS	<i>p248</i>
VUE (X ux) (Y uy) (Z uz)	<i>p248</i>
ZOOM cf (xc yc)	<i>p248</i>
SELEC <BARRE liste, NOEUD liste, TOUT>	<i>p249</i>
CENTR (GEOM)	<i>p250</i>
CENTR < EFFORT <N, TY ... MZ>, DEPLA (DX, DY, DZ, RX, RY, RZ), CONTR <VY ... WZ> CONTRG PRESS <PX, PY, PZ, RX> >	<i>p250</i>
GEOM	<i>p251</i>
NUM (NOEUD) (BARRE)	<i>p251</i>
COUL <EFFORT, DEPLA, CONTRG, PRESS> (couleur)	<i>p251</i>
DEPLA (DX, DY ... RZ) <CHARG, COMB, ENV, SURCH> liste(couleur)	<i>p252</i>
EFFORT <N, TY ... MZ> <CHARG, COMB, ENV, SURCH> liste(couleur)	<i>p253</i>
CONTR <VY ... WZ> <CHARG, COMB, ENV, SURCH> liste(couleur)	<i>p254</i>
CONTRG i <CHARG, COMB, ENV, SURCH> liste(couleur)	<i>p255</i>
RETOUR	<i>p245</i>



# *II*

## **PRESENTATION DE ST1**



# 1

## INTRODUCTION

Le logiciel **ST1 version 1.xx** est un calculateur de structures à barres tridimensionnelles ou planes, basé essentiellement sur une analyse linéaire élastique au 1er ordre et disposant de nombreuses fonctionnalités spécifiques au domaine des Ouvrages d'Art.

Ses caractéristiques sont les suivantes :

- la description de structures (2D ou 3D) à l'aide de barres de caractéristiques constantes ou variables, ainsi qu'une modélisation des fondations à l'aide de poutres sur sol élastique
- la prise en compte automatique des charges d'exploitation routières
- l'évaluation des combinaisons et des enveloppes d'efforts nécessaires à l'application des règlements relatifs au béton ou au métal
- l'édition et la visualisation de l'ensemble des résultats obtenus

Toutes les fonctionnalités de **ST1** sont gérées à l'aide d'un langage de programmation de données permettant un paramétrage éventuel des structures.

**ST1** possède aussi une interface graphique comportant des menus déroulants et des barres d'outils. Cette interface est utilisée pour la visualisation de la structure et des résultats.

**ST1 version 2.xx** est une extension de **ST1 version 1** permettant de traiter les points suivants:

- la prise en compte du fluage des bétons selon les lois du BPEL, du CEB, de l'EN1992-1-1, de l'EN1992-2 et de la FIB2010
- l'introduction de phases modélisant la construction des différentes parties de l'ouvrage
- l'analyse temporelle (linéaire élastique)
- le calcul au feu
- les barres sur ressorts unilatéraux ou plastique

## 2

## NOUVELLES FONCTIONNALITES

Les principales nouveautés de la version 24 de ST1 sont les suivantes :

**Calcul au feu** pour les poutres en béton armé ou précontraint selon les Eurocodes 1992

**Barre sur sol élasto-plastique** soumise à une charge combinée ou un phasage.

Compilateur (Intel 2021)

Version 64 bits.

Les principales nouveautés de la version 23 de ST1 sont les suivantes :

**Dynamique** : modes propres, méthode spectrale, analyse linéaire élastique temporelle

**Mode critique** de flambement linéaire élastique

Pour information: Noyau de calcul structural réécrit et changement de compilateur (Intel 2010)

Les apports de la version 22 de ST1 sont limités :

Compatibilité avec les systèmes d'exploitation Windows 7 64b

**Version anglaise** (Données en entrées et Documentation)

Les principales nouveautés de la version 21 de ST1:

**charges d'exploitation** : Eurocode EN1991-2 : LM3 avec VS sur voie spécifique du LM1 (commande "corrélé"), charges de chantier 23M3,34M3, Mise à jour selon l'annexe nationale : largeur VS standard du LM3 modifiés et coefficient ajustement LM2 (cf. p165)

**tension dans les câbles** : (cf. p 242) pour les charges, les phasages et les états

**précontrainte de prétension** : Prétension linéaire-bilinéaire Eurocode EN1922-2 et prétension parabolique règles du Règlement Français (cf. p90)

**câble de prétension** : Gainage des câbles (cf. p92)

**béton** : Traitements thermiques pour les ouvrages précontraints par prétension Eurocode EN1922-2 et règles du Règlement Français (cf. p74)

possibilité de modifier la taille des projets via le fichier st1.par pour les gros projets de calcul (supérieur à 2Go de résultats)

**matériau avancé**: paramétrage d'affinité sur les déformations retrait, fluage et module Young phasage de construction, précontrainte et BHP mis à jour

Les apports de la version 20 de ST1 sont les suivants :

**charges d'exploitation** : Eurocode EN1991-2 : LM1, LM2, LM3, trottoir, LM4 (cf. p165)

**béton** : Eurocode EN1992-1-1 et EN1922-2 en plus des règles du Règlement Français (cf. p80)

possibilité de définir une répartition transversale en modélisation 2D : Courbon, f(y), ... (cf. p128)

contrainte généralisée complétée d'un terme constant pour le calcul des charges fixes (cf. p100)

∑ Du fait de la refonte du noyau de calculs de **ST1** :

- les anciens fichiers projet .STD et .STI sont incompatibles et doivent donc être régénérés (cf. commande LIRE p37),

- des différences dans les résultats peuvent apparaître (meilleure précision numérique)

## 3

## LIMITES DU PROGRAMME

Certaines limites de **ST1** sont modifiables par l'utilisateur :

- la mémoire allouée de 300 Mo pour l'exécution de **ST1**, (< 500 Mo maximum)
- la taille maximale de la base de données du projet dimensionné à 1280 Mo (fichier `BASEDAT`), pour des structures de taille plus importantes, modifier le fichier `st1.par` (cf. p329)
- 256 caractères maximum pour un nom de fichier, répertoire compris
- 128 caractères maximum par ligne du fichier de données (cf. p329)
- 8 chiffres maximum pour un numéro de nœud ou de barre
- 100 000 pour un numéro de chargement
- le nombre de contraintes généralisées dépend de la mémoire disponible

Les limites modifiables dans le fichier paramètres (cf. p329) sont par défaut à :

- 20000 nœuds - 40000 barres
- 4000 appuis
- 80000 sections d'étude

— Ces limites sont celles des tableaux de données mais la matrice de rigidité peut être trop importante pour être stockée en mémoire vive, même en respectant ces limites. Dans ce cas **ST1** affiche *Place mémoire insuffisante au moment de l'exécution des chargements*.

∑ Certaines limites sont modifiables par des commandes du fichier paramètres (cf. p329), ainsi :

<code>para_structure</code>	<code>nd nb na</code>	donne respectivement les valeurs <code>nd</code> , <code>nb</code> et <code>na</code> aux
		nombres limites des nœuds, barres et appuis
<code>mx_etude</code>	<code>nse</code>	donne la valeur <code>nse</code> au nombre limite de sections d'étude

Toutes les commandes peuvent être utilisées dans un fichier de données, ou tapées directement à la console de manière interactive. Cependant, la quantité de données nécessaires à la description des problèmes habituels, impose souvent la création de fichiers de données.

— Il est conseillé d'utiliser une extension `.ST1` pour les fichiers de données.  
**ST1** reconnaîtra ces fichiers comme fichiers de données si l'association de cette extension avec **ST1** a été sélectionnée lors de l'installation.

∑ Les limites ci-dessus ne sont pas des critères absolus et dans certains cas, les calculs ne pourront pas être conduits même en respectant ces critères. En effet malgré ces paramètres et en particulier la mémoire allouée, la taille matricielle d'une structure peut être si grande que la taille de la mémoire allouée ne puisse suffire.

∑ Il faut vérifier que la numérotation des nœuds a bien été optimisée selon la méthode préconisée dans le paragraphe sur la génération des nœuds, ce qui peut réduire notablement la taille de la largeur de bande de la matrice et donc la mémoire nécessaire et les temps de calcul par la même occasion.

Les calculs en boucle d'une structure de taille matricielle suffisamment importante, ou bien si le nombre de boucles est grand (>1000), peut également réduire fortement la limite de mémoire vive disponible. Le phénomène est accéléré s'il est combiné avec la définition de contraintes généralisées. Une solution pour palier à ce problème est de créer un projet au bout d'un certain nombre de cycle, de sortir de `st1` et relancer `st1` à partir de ce projet sauvegardé puis de continuer la suite du projet.

# 4

## DEFINITION DES TYPES LEXICAUX

### 4.1 - SEPARATEURS

Le séparateur ; permet de séparer les commandes entrées sur une même ligne.

### 4.2 - COMMENTAIRES

Le caractère # permet d'insérer des commentaires dans les fichiers de données. Ces commentaires peuvent être placés en fin de ligne après des commandes.

### 4.3 - MOTS CLES

Il s'agit de mots réservés servant à décrire le problème à traiter. On trouvera la liste de ces mots clés dans la description des commandes de **ST1**.

Les mots clés sont définis en majuscules ou en minuscules.

#### EXEMPLE

NOEUD ou noeud sont des mots clés équivalents, mais Noeud ou NOEud sont inconnus et ne seront pas considérés comme des mots clés.

### 4.4 - VALEURS NUMERIQUES

Il n'est fait aucune distinction entre les valeurs de type entier et de type réel.

Les angles sont définis en radians.

## 4.5 - CHAINES DE CARACTERES

Les chaînes de caractères doivent être définies entre quotes ( ' ). Une quote appartenant à la chaîne doit être doublée ( ' ' ).

$\Sigma$  *Il ne faut pas utiliser de caractères accentués dans ST1.*

## 4.6 - LISTES NUMERIQUES

Une liste numérique est une suite de valeurs numériques séparées par des virgules, ou un intervalle découpé par un pas (le pas par défaut est égal à 1).

Les listes numériques peuvent être écrites sur plusieurs lignes. Il suffit pour cela que le dernier caractère de la ligne soit une virgule.

### EXEMPLE

la liste numérique	1,23,12,5,6,7,8,9
est équivalente à	1,23,12,5 a 9 pas 1
et à	1,23,12,5 a 9
et à	1,23,12,5 a 6,7 a 9

# 5

## CONVENTIONS D'ECRITURE

### 5.1 - DISTINCTION DES MOTS CLES ET DES VALEURS OU LISTES NUMERIQUES

Dans la description des commandes, les mots clés sont écrits avec cette fonte.

Dans les exemples, les mots clés sont écrits en MAJUSCULE, les valeurs ou listes numériques en minuscule.

### 5.2 - PARAMETRES OPTIONNELS

Les paramètres optionnels sont écrits entre parenthèses.

#### EXEMPLE

TEMP liste (GY dtv) (GZ dtz)

### 5.3 - CHOIX OBLIGATOIRES ENTRE PLUSIEURS PARAMETRES

Les paramètres dont le choix est obligatoire sont notés entre les signes < et > et sont séparés par des virgules.

#### EXEMPLE

OPTION <PLANE, GRILL, SPATIALE>

### 5.4 - REMARQUES

Dans tout le manuel :

les remarques sont signalées par —

les remarques importantes sont signalées par  $\Sigma$

# 6

## UTILISATION

L'utilisateur crée, à l'aide d'un éditeur, le ou les fichiers de données contenant les données nécessaires au calcul. Ces fichiers peuvent contenir d'éventuelles commandes de dépouillement de résultats et d'édition.

L'exécution de ces fichiers de données s'effectue :

- ◆ soit en appelant le programme **ST1** (`st1.exe`) suivi de la commande `LIRE` (cf. *commande LIRE p37*) et le nom de fichier entre cote à la console
- ◆ soit par double clic sur le fichier (si l'association des fichiers d'extension `.ST1` a été conservée lors de l'installation)
- ◆ soit par lâcher-glisser du fichier de donnée `st1` sur un raccourci qui pointe vers l'exécutable `st1` à placer sur le bureau
  
- ◆ soit par lancement depuis un éditeur de texte qui permet de lancer des exécutables (exemple PSPAD ou équivalent). A noter qu'un fichier de coloration syntaxique pour ce logiciel est disponible qui permet de visualiser la syntaxe du code de façon plus ergonomique (appeler le distributeur pour plus de renseignements)

Toutes les commandes contenues dans le fichier de données sont alors interprétées, puis **ST1** affiche le prompt `>` à la console et attend les commandes suivantes.

La sortie de **ST1** s'effectue par la commande `QUITTER` (cf. *commande QUITTER p41*) qui demande un nom de projet (entre quotes).

Si l'utilisateur saisit un nom de projet, **ST1** sauvegarde dans une base de données l'état de la structure et les résultats déjà obtenus. Ces données pourront être réutilisées pour des calculs ultérieurs (cf. *commande PROJET p40*).

Si l'utilisateur tape un retour chariot à la place du nom de projet, aucune sauvegarde n'est effectuée.

# 7

## DETECTION DES ERREURS

### 7.1 - MESSAGES D'ERREUR

Les erreurs détectées au cours de l'exécution de **ST1** déclenchent l'affichage d'un message à l'écran.

#### EXEMPLE

```
--- fichier : >f1
--- ligne : 101 ---
erreur : parentheses non apairees
```

$\Sigma$  Les messages affichés à l'écran sont sauvegardés dans un fichier nommé *erreur.txt*. Ce fichier peut être consulté après l'exécution de **ST1** pour localiser les erreurs signalées.

— Le numéro d'action *n* affiché à l'écran ou dans le fichier *erreur.txt* correspond à la  $n^{\text{ième}}$  action réalisée au cours du calcul de phasage.

### 7.2 - MESSAGES D'AVERTISSEMENT

Des messages signalent certaines utilisations qui bien que licites pourraient être involontaires.

#### EXEMPLE

Redéfinition des caractéristiques d'une barre :

```
CARA 10 SX .2 IZ .3
...
CARA 10 IZ .45
```

La deuxième utilisation de la commande **CARA** pour la barre 10 déclenche l'affichage du message :

```
--- fichier : >f1
--- ligne : 112 ---
attention : redefinition des caracteristiques de la barre 10
```



# **LISTE DES COMMANDES**



# 1

## COMMANDES GENERALES

### 1.1 - LECTURE D'UN FICHIER

La lecture d'un fichier de données à partir de la console ou d'un autre fichier de données s'effectue par la commande :

```
LIRE 'Nom du fichier'
```

#### EXEMPLE

```
LIRE 'pont.stl'
```

Les commandes contenues dans le fichier `pont.stl` sont interprétées jusqu'à ce que **ST1** affiche le prompt `>` à la console.

— *La lecture d'un fichier de données peut s'effectuer à l'intérieur d'un autre fichier de données.*

### 1.2 - ARRET DE LA LECTURE D'UN FICHIER AVANT LA FIN DU FICHIER

La lecture d'un fichier de données peut être interrompue par la commande suivante :

```
RETOUR
```

#### EXEMPLE

dans le fichier `toto.stl` :

```
...  
NOEUD 1 12 15  
...  
RETOUR  
...  
NOEUD 2 6 8
```

Toutes les commandes du fichier de données `toto.stl` qui suivent le mot clé `RETOUR` seront ignorées lors de la lecture.

### 1.3 - SORTIE TEMPORAIRE VERS LA CONSOLE LORS DE LA LECTURE D'UN FICHIER DE DONNEES

La lecture d'un fichier de données peut être interrompue par une sortie temporaire vers la console par la commande suivante :

```
LIRE CONSOLE
```

Le prompt affiché sur la console contient alors le nom de tous les fichiers en cours de lecture.

#### EXEMPLE

dans le fichier `toto.st1` :

```
...
LIRE CONSOLE
...
```

A l'invite du prompt dans **ST1**, la commande :

```
LIRE 'toto.st1' lecture du fichier toto.st1 jusqu'à l'instruction LIRE CONSOLE
...
```

affiche le prompt `>toto.st1>>` à l'écran.

### 1.4 - POURSUITE DE LA LECTURE D'UN FICHIER DE DONNEES APRES SORTIE TEMPORAIRE VERS LA CONSOLE

La poursuite de la lecture d'un fichier de données après une sortie temporaire sur la console s'effectue par la commande :

```
RETOUR
```

#### EXEMPLE

dans le fichier `toto.st1` :

```
...
LIRE CONSOLE
...
```

A l'invite du prompt dans **ST1** :

```
LIRE 'toto.st1' lecture du fichier toto.st1 jusqu'à l'instruction LIRE CONSOLE
>toto.st1>>      affiché par ST1
RETOUR
...
>
```

La commande `RETOUR` permet la poursuite de la lecture du fichier. Les instructions contenues dans le fichier `toto.st1` sont interprétées jusqu'à la fin du fichier. Le prompt `>` est alors affiché à la console dans l'attente des commandes suivantes.

## 1.5 - EDITION DES PROJETS

La définition du fichier de sortie des éditions s'effectue selon les syntaxes suivantes :

### 1.5.1 - EDITION SUR UN FICHIER

`SORTIE 'Nom du fichier' (SUITE) (NON PAGINE)`

Le mot clé `SUITE` permet d'écrire les sorties à la fin du fichier si celui-ci existe déjà.

Le mot clé `NON PAGINE` permet d'obtenir des sorties non paginées.

### 1.5.2 - EDITION A LA CONSOLE

`SORTIE CONSOLE`

### 1.5.3 - EDITION SUR LE DERNIER FICHIER DE SORTIE UTILISE (APRES UNE EDITION A LA CONSOLE)

`SORTIE FICHIER`

#### EXEMPLE

```
SORTIE 'toto'      # création du fichier toto
LISTER GEOM      # écriture dans le fichier toto des caractéristiques
                  # géométriques et mécanique de la structure
```

## 1.6 - GESTION DES PROJETS

La base de données courante de **ST1**, qui contient l'ensemble des définitions et des résultats d'un calcul, doit être sauvegardée sous un nom spécifique pour être récupérée lors d'une utilisation ultérieure de **ST1**.

Cette gestion des bases de données est assurée à l'aide de la notion de projet. Lors de chaque session l'utilisateur peut créer un projet, rappeler ou modifier un projet déjà stocké.

$\sum$  *La structure de **ST1** a changé, il est donc impossible de relire les fichiers **.ST1D** et **.ST1I** d'une version antérieure.*  
*Le projet doit être régénéré en relisant le fichier de données (cf. commande `RELECTURE D'UN PROJET` p40).*

### 1.6.1 - ENREGISTREMENT D'UN PROJET

L'état courant d'une session peut être enregistré dans le projet par la commande :

```
ENREGISTRER PROJET 'Nom du projet'
```

ou :

```
ENREGISTRER 'Nom du projet'
```

### 1.6.2 - RELECTURE D'UN PROJET

La relecture d'un projet s'effectue par la commande :

```
PROJET 'Nom du projet'
```

### 1.6.3 - RAPPEL DU NOM DU PROJET COURANT

Le nom du projet courant peut être obtenu par la commande :

```
PROJET
```

### 1.6.4 - LISTE DES PROJETS STOCKES SUR DISQUE

La liste des projets déjà stockés peut être obtenue par la commande :

```
LISTER PROJET
```

$\Sigma$  *Si une erreur de syntaxe se produit lors de la relecture d'un projet, voir si la longueur du nom du fichier avec son répertoire dépasse la limite autorisée (256 caractères). Si c'est le cas, recréer le projet dans un répertoire dont le nom est plus court (et au besoin renommer les fichiers eux-mêmes).*

### 1.6.5 – MODIFICATION DE LA TAILLE MAXIMALE DES PROJETS SUR DISQUE

La taille des projets est limitée sur le disque à un peu plus de 1Go. Il est possible de modifier la taille de stockage en modifiant le fichier paramètre ST1.par. Le 3eme chiffre du fichier peut être augmenté (par défaut cette valeur est fixée à 64). Voici un extrait du fichier ST1.par

```
st1-v24
300      # taille memoire de travail en mega-octets (<1000)
64       # taille nb_lign_index
...
```

$\Sigma$  *Ce changement a pour conséquence de modifier la structure de la base de données, le fichier projet généré devra donc être toujours associé au fichier « st1.par » modifié. En effet, le projet ne pourra être relu qu'en présence de ce fichier modifié. C'est pourquoi, il est recommandé à l'utilisateur de ne pas modifier le fichier habituel ST1.par situé dans le répertoire de l'exécutable, mais de faire une copie de ce fichier dans le répertoire du projet concerné. ST1 vérifié en 1<sup>er</sup> la présence de ce fichier dans le répertoire local, et s'il est absent, il utilise celui qui est situé dans le répertoire de l'exécutable ST1.*

*NB : une valeur trop grande du paramètre de taille de la base d'indexe (lié à la taille du projet) a l'inconvénient de ralentir l'exécution initiale de ST1 car celui-ci commence par réserver la base d'indexe sur le disque, ce qui pénalise inutilement les calculs courants, qui eux ne nécessitent généralement que peu de place sur le disque.*

## 1.7 - DEFINITION DES PARAMETRES DE PAGINATION DES FICHIERS DE SORTIE

Le nombre de lignes par page et le caractère ASCII désignant le saut de page peuvent être définis par les commandes suivantes :

```
PAGINATION
  (ASC_PAGE iasc)
  (MAX_LIGNE n)
```

FIN

avec :

n            nombre de lignes par page  
 iasc        code ASCII désignant le saut de page :  
             =12 : imprimantes reconnaissant le caractère saut de page standard  
             =49 : imprimantes reconnaissant le saut de page des programmes Fortran

*Le nombre de caractères par ligne dépend de l'option de calcul choisie :*

—            options *PLANE* et *GRILL*            80 caractères par ligne  
             options *SPATIALE*                128 caractères par ligne

*Les paramètres de pagination sont initialisés dans le fichier paramètres (cf. p329) ce qui permet d'avoir une initialisation par défaut. Ils peuvent cependant être redéfinis dans le fichier de données.*

## 1.8 - SUPPRESSION DES MESSAGES D'AVERTISSEMENT

L'affichage de tous les messages d'exécution et d'avertissement (attention : redéfinition, ...) dans le fichier `erreur.txt` s'effectue par la commande :

```
MESSAGE TOUT
```

La suppression de l'affichage des messages d'avertissement seuls :

```
MESSAGE REDUIT
```

La suppression de l'affichage de tous les messages s'effectue par la commande :

```
MESSAGE AUCUN
```

— *La commande prend effet à partir de l'endroit où elle est insérée dans le fichier de données.*

## 1.9 - SORTIE DE ST1

La fin de l'utilisation de **ST1** s'effectue par la commande :

```
QUITTER
```

Lorsqu'elle est saisie au clavier, cette commande demande un nom de projet (entre quotes).

Si l'utilisateur saisit un nom de projet, **ST1** sauvegarde dans une base de données l'état de la structure et les résultats déjà obtenus. Ces données peuvent être réutilisées pour des calculs ultérieurs (cf. *commande PROJET p40*).

Si l'utilisateur tape un retour chariot à la place du nom de projet, aucune sauvegarde n'est effectuée.

## 2

**DESCRIPTION DE LA  
GEOMETRIE**

La géométrie de la structure est définie par la description :

- du titre de la structure
- des nœuds
- des appuis
- des barres
- des caractéristiques des barres
- des constantes des matériaux constitutifs des barres
- des articulations des barres (optionnel)
- des excentrement des barres (optionnel)
- des sections d'étude sur les barres (optionnel)
- des barres activées (optionnel)

Les commandes de description de la géométrie peuvent être utilisées plusieurs fois, et dans un ordre quelconque. C'est la dernière description qui est prise en compte. Les valeurs non redéfinies sont alors les valeurs précédentes.

- *Dans le cas d'une activation sélective, la modification des coordonnées d'un nœud doit être suivie de la réactivation de toutes les barres qui y étaient liées pour pouvoir être réellement prise en compte au moment des calculs de chargement.*

## 2.1 - OPTION DE CALCUL

L'option de calcul est définie selon la syntaxe suivante :

OPTION <PLANE, GRILL, SPATIALE>

— Cette commande est insérée dans le fichier paramètres (cf. p329) ce qui définit une option par défaut lors de l'utilisation de **ST1**.

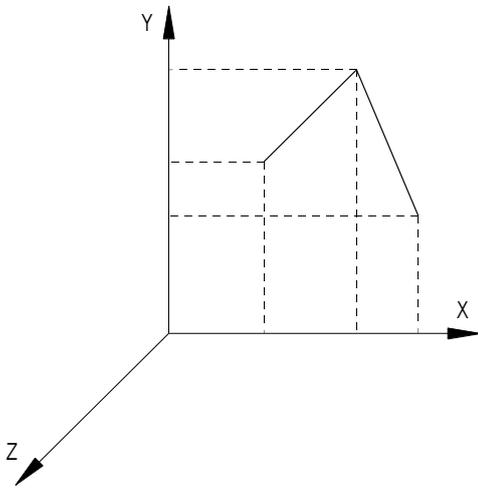
— L'utilisation de cette commande avant toute commande au début des données permet de remplacer l'option définie par défaut.

### 2.1.1 - PORTIQUE PLAN : OPTION PLANE

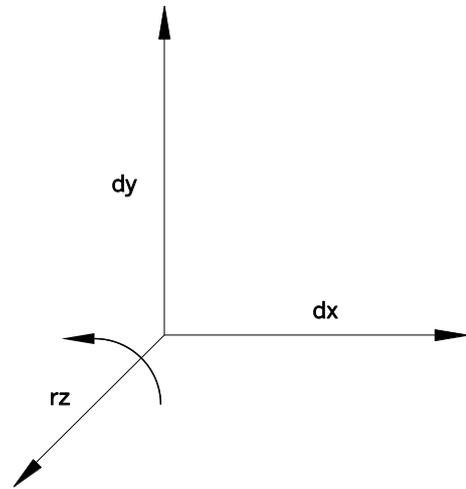
La structure est plane et chargée dans son plan :

coordonnées       $x, y$

déplacements     $dx, dy, rz$



**Géométrie**

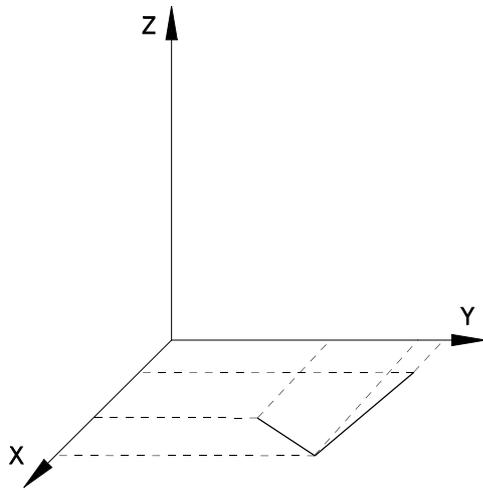


**Déplacements**

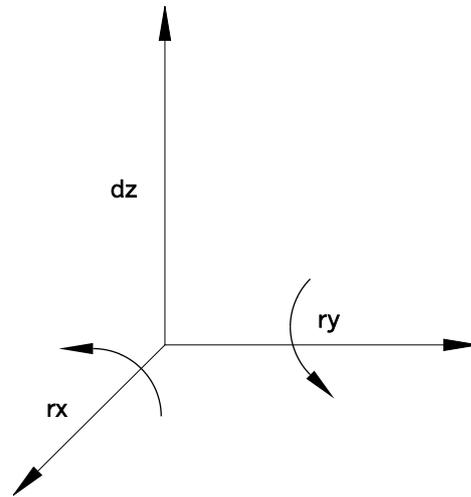
### 2.1.2 - PORTIQUE PLAN : OPTION GRILL DE POUTRE

La structure est plane et chargée perpendiculairement à son plan :

coordonnées  $x, y$   
déplacements  $rx, dz, ry$



**Géométrie**

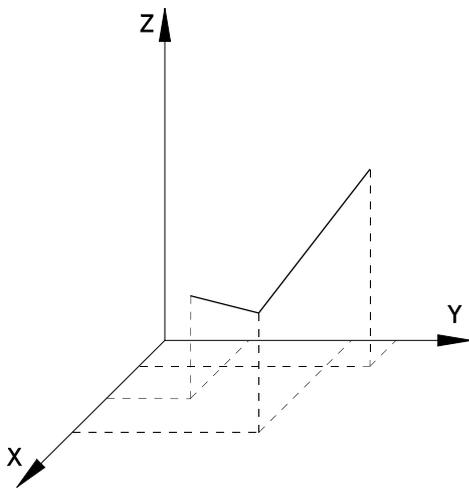


**Déplacements**

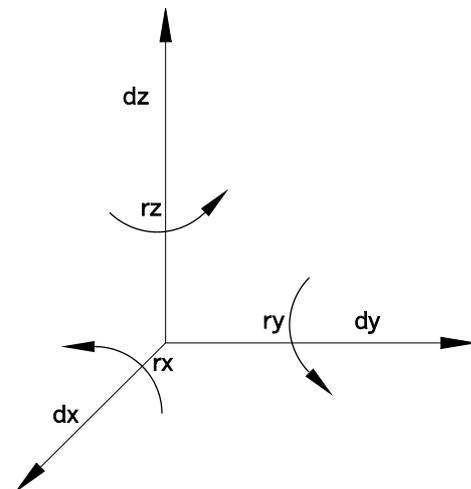
### 2.1.3 - PORTIQUE PLAN : OPTION SPATIALE

La structure et les chargements sont décrits dans l'espace :

coordonnées  $x, y, z$   
déplacements  $dx, dy, dz, rx, ry, rz$



**Géométrie**



**Déplacements**

## 2.2 - TITRE DE LA STRUCTURE

La définition du titre de la structure peut se faire selon la syntaxe suivante :

```
TITRE 'Titre de la structure'
```

Le titre de la structure est rappelé lors de l'édition des résultats et sur les dessins.

Il peut être modifié à l'intérieur d'un fichier de données.

## 2.3 - DEFINITION DES NŒUDS

La description des nœuds (dans le repère global) peut se faire selon les syntaxes suivantes :

### INSTRUCTION SIMPLE

```
NOEUD liste coor1 coor2 coor3
NOEUD liste (X coor1) (Y coor2) (Z coor3)
```

### INSTRUCTION DE BLOC

```
NOEUD
liste coor1 coor2 coor3
liste (X coor1) (Y coor2) (Z coor3)
...
```

### INSTRUCTION DE GENERATION DE PLUSIEURS NŒUDS

```
GENER n NOEUD (ID) j (pas0) X coor1 (pas1) Y coor2 (pas2) Z coor3 (pas3)
```

avec :

```
n      nombre de nœuds à générer
j      numéro du premier nœud
pas0   incrément sur les numéros des nœuds (par défaut pas0=1)
coor1  première coordonnée 1 du nœud
pas1   incrément sur la coordonnée 1 du nœud (par défaut pas1=0)
etc.
```

Les coordonnées utilisables sont :

```
Option PLANE      x, y
Option GRILL      x, y
Option SPATIALE   x, y, z
```

### EXEMPLE

L'instruction :

```
GENER 5 NOEUD ID 100 10 X 5. 2. Y 4
```

est équivalente à :

```
NOEUD                ou à                NOEUD
100 X 5.  Y 4.      100 5.  4.
110 X 7.  Y 4.      110 7.  4.
120 X 9.  Y 4.      120 9.  4.
130 X 11. Y 4.      130 11. 4.
140 X 13. Y 4.      140 13. 4.
```

— *L'ordre de définition des nœuds présenté dans le fichier influence directement la taille de la bande matricielle (bande diagonale de termes non nuls) de la matrice de rigidité et donc la taille de la mémoire occupée par le calcul correspondant.*

*Ainsi pour des modèles constitués d'une très grande quantité de nœuds, l'utilisateur peut réduire notablement la quantité de mémoire allouée à la matrice simplement en générant les nœuds du modèle dans l'ordre des X croissants puis des Y croissants (la numérotation pouvant s'effectuer dans un ordre quelconque).*

## 2.4 - APPUIS RIGIDES

Les directions bloquées d'un appui rigide sont définies dans le repère général de la structure suivant les syntaxes suivantes :

### INSTRUCTION SIMPLE

```
APPUI liste1 (NOEUD liste2) (DECOL <NON, <X,Y,Z> <POS,NEG> >) (DX) (DY) (DZ)
(RX) (RY) (RZ)
```

— *POS NEG détermine le signe du degré de liberté concerné par la condition de décollement (par défaut POS, c'est à dire que l'appui est collé si la réaction est positive et l'appui décollé si la réaction est négative).*

— *Lorsque l'option DECOL est activée, le critère de décollement concerne uniquement le degré de liberté activé (réaction X, Y ou Z).*

*Lorsque le critère de décollement est vérifié sur ce seul degré de liberté, tous les degrés de liberté sont libérés.*

$\Sigma$  *L'option DECOL est à utiliser avec les calculs de charges statiques, (NB: la precontrainte est considérée simultanée), ne pas utiliser avec les charges mobiles (commande surcharges).*

### INSTRUCTION DE BLOC

```
APPUI
liste1 (NOEUD liste2) (DECOL <NON, <X,Y,Z> <POS,NEG> >) (DX) (DY) (DZ) (RX)
(RY) (RZ)
```

...

avec :

```
liste1    liste des numéros d'appui
liste2    liste des numéros de nœud sur lesquels seront les appuis
           (par défaut liste1=liste2)
DECOL     mot clé pour le décollement d'un appui dans une direction
```

Les mots clés utilisables sont :

```
Option PLANE    dx, dy, rz
Option GRILL    rx, dz, ry
Option SPATIALE dx, dy, dz, rx, ry, rz
```

**EXEMPLE**

L'instruction :

APPUI 1 a 5 DX RZ

signifie que les nœuds 1, 2, 3, 4, 5 sont des appuis rigides bloqués suivant l'axe X et la rotation Z du repère général.

L'instruction :

APPUI 1 a 5 NOEUD 11 a 15 DY

signifie que les nœuds 11, 12, 13, 14, 15 seront des appuis rigides bloqués suivant l'axe Y du repère général.

$\Sigma$  *L'un des appuis au moins doit être bloqué en X afin de rendre stable la structure.  
S'il existe une précontrainte, un seul appui doit être bloqué en X sinon la précontrainte ne produit aucun effet.*

— *La définition de numéros différents pour les appuis et les nœuds permet une description plus facile du phasage de certaines structures (ponts poussés). Elle permet aussi la définition de deux types d'appui sur un même nœud.*

— *Les longueurs des listes de numéros d'appuis et de nœuds doivent être identiques.*

— *L' instruction de bloc APPUI peut contenir des appuis rigides et des appuis élastiques.*

— *Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur tous les nœuds déjà définis.*

## 2.5 - APPUIS ELASTIQUES

La demi-matrice de rigidité supérieure d'un appui élastique est définie par défaut dans le repère général de la structure (dans le repère local dans le cas où l'appui est orienté d'une rotation alpha), lsuivant les syntaxes suivantes :

### INSTRUCTION SIMPLE

```
APPUI liste1 (NOEUD liste2) (DECOL < NON, <X,Y,Z> <POS,NEG> >) (ROT alpha)
      EL m1 ... mj1
APPUI liste1 (NOEUD liste2) (DECOL < NON, <X,Y,Z> <POS,NEG> >) (ROT alpha)
      EL DI d1 ... dj2
```

### INSTRUCTION DE BLOC

```
APPUI
liste1 (NOEUD liste2) (DECOL < NON, <X,Y,Z> <POS,NEG> >) (ROT alpha)
      EL m1 ... mj1
liste1 (NOEUD liste2) (DECOL < NON, <X,Y,Z> <POS,NEG> >) (ROT alpha)
      EL DI d1 ... dj2
...
```

avec :

liste1      liste des numéros d'appui  
 liste2      liste des numéros de nœud sur lesquels seront les appuis  
 (par défaut liste1=liste2)  
 m1 ... mj1    demi-matrice de rigidité inférieure, soit :  
                   6 termes pour les structures planes  
                   21 termes pour les structures spatiales  
 d1 ... dj2    termes diagonaux de la matrice de rigidité, soit :  
                   3 termes pour les structures planes  
                   6 termes pour les structures spatiales  
 alpha        angle de rotation autour de l'axe des Z (cas des ponts courbes)

$\sum$  Lorsque l'option *DECOL* est activée, le critère de décollement concerne uniquement le degré de liberté activé (réaction X, Y ou Z).  
 Lorsque le critère de décollement est vérifié sur ce seul degré de liberté, tous les degrés de liberté sont libérés.

$\sum$  *POS NEG* détermine le signe du degré de liberté concerné par la condition de décollement (par défaut *POS*, c'est à dire que l'appui est collé si la réaction est positive et l'appui décollé si la réaction est négative).

$\sum$  L'option *DECOL* est à utiliser avec les calculs de charges statiques, (NB: la precontrainte est considérée simultanée), ne pas utiliser avec les charges mobiles (commande surcharges).

— L'angle alpha est exprimé en radians, défini dans le repère général, compté dans le sens trigonométrique. La matrice est alors définie dans le repère local orienté de alpha par rapport au repère global.

**EXEMPLE**

En option PLANE (cf. commande *OPTION p43*) l'instruction :

```
APPUI 1 a 5 EL DI 1000. 2000. 0.
```

signifie que les nœuds 1, 2, 3, 4, 5 sont des appuis élastiques dont la matrice de rigidité exprimée dans le repère de la structure est :

```
1000. 0. 0.
0. 2000. 0.
0. 0. 0.
```

En option SPATIALE (cf. commande *OPTION p44*) l'instruction :

```
APPUI 1 a 3 NOEUD 7,8,9 EL
1.
2. 3.
4. 5. 6.
7. 8. 9. 10.
11. 12. 13. 14. 15.
16. 17. 18. 19. 20. 21
```

signifie que les appuis 1, 2, 3 sont situés sur les nœuds 7, 8, 9. Ces appuis sont des appuis élastiques dont la matrice de rigidité exprimée dans le repère de la structure est :

```
1. 2. 4. 7. 11. 16.
2. 3. 5. 8. 12. 17.
4. 5. 6. 9. 13. 18.
7. 8. 9. 10. 14. 19.
11. 12. 13. 14. 15. 20.
16. 17. 18. 19. 20. 21.
```

Rappel : une matrice de rigidité exprime les efforts en fonction des déplacements :

$$\text{effort}(\ ) = \text{matrice\_rigidité}(\ ) \times \text{déplacement}(\ )$$

pour une structure plane :

$$\begin{pmatrix} fx \\ fy \\ mz \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m1 & m2 & m4 \\ m2 & m3 & m5 \\ m4 & m5 & m6 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} dx \\ dy \\ rz \end{pmatrix}$$

♦ pour un grill de poutres :

$$\begin{pmatrix} mx \\ fz \\ my \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m1 & m2 & m4 \\ m2 & m3 & m5 \\ m4 & m5 & m6 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} rx \\ dz \\ ry \end{pmatrix}$$

♦ pour une structure spatiale :

$$\begin{pmatrix} fx \\ fy \\ fz \\ mx \\ my \\ mz \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m1 & m2 & m4 & m7 & m11 & m16 \\ m2 & m3 & m5 & m8 & m12 & m17 \\ m4 & m5 & m6 & m9 & m13 & m18 \\ m7 & m8 & m9 & m10 & m14 & m19 \\ m11 & m12 & m13 & m14 & m15 & m20 \\ m16 & m17 & m18 & m19 & m20 & m21 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ rx \\ ry \\ rz \end{pmatrix}$$

La définition de numéros différents pour les appuis et les nœuds permet une description plus facile du phasage de certaines structures (ponts poussés). Elle permet aussi la définition de deux types d'appui sur le même nœud.

Les longueurs des listes de numéros d'appuis et de nœuds doivent être identiques.

L'instruction de bloc `APPUI` peut contenir des appuis rigides et des appuis élastiques.

Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot `TOUT`. L'instruction agira sur tous les nœuds déjà définis.

## 2.6 - NŒUDS RELIÉS PAR UNE BARRE

La description des nœuds reliés par une barre peut se faire suivant les syntaxes suivantes :

### INSTRUCTION SIMPLE

```
BARRE liste DE j1 A j2
BARRE liste j1 j2
```

### INSTRUCTION DE BLOC

```
BARRE
liste DE j1 A J2
liste j1 j2
```

...

### INSTRUCTION DE GENERATION DE PLUSIEURS BARRES

```
GENER n BARRE (ID) j (pas0) DE j1 (pas1) A j2 (pas2)
```

avec :

n	nombre de barres à générer
j	numéro de la première barre
pas0	incrément sur les numéros des barres (par défaut pas0=1)
j1	numéro du nœud origine de la première barre
pas1	incrément sur le numéro origine des barres (par défaut pas1=0)
j2	numéro du nœud extrémité de la première barre
pas2	incrément sur le numéro extrémité des barres (par défaut pas2=0)

### EXEMPLE

L'instruction :

```
GENER 5 BARRE ID 100 10 DE 4 2 A 14 7
```

est équivalente à :

```
BARRE
100 4 14
110 6 21
120 8 28
130 10 35
140 12 42
```

*La définition des nœuds reliés par une barre détermine l'orientation de l'axe x du repère local de cette barre.*



## 2.7 - EXCENTREMENTS AUX EXTREMITES DES BARRES

Les excentremets des liaisons des barres/nœuds sont définis à partir des nœuds suivant les axes du repère général de la structure.

### INSTRUCTION SIMPLE

```
EXC liste (OR X ox1 Y ox2 Z ox3) (EX X ex1 Y ex2 Z ex3)
EXC liste (OR ox1 ox2 ox3) (EX ex1 ex2 ex3)
EXC liste
  (OR X ox1 Y ox2 Z ox3)
  (EX X ex1 Y ex2 Z ex3)
```

...

### INSTRUCTION DE BLOC

```
EXC
liste (OR X ox1 Y ox2 Z ox3) (EX X ex1 Y ex2 Z ex3)
liste (OR ox1 ox2 ox3) (EX ex1 ex2 ex3)
liste
  (OR X ox1 Y ox2 Z ox3)
  (EX X ex1 Y ex2 Z ex3)
```

...

Les coordonnées utilisables sont :

```
Option PLANE      x, y
Option GRILL      x, y
Option SPATIALE  x, y, z
```

### EXEMPLE

L'instruction :

```
EXC 2,3,4 A 6 OR Y 2.5
```

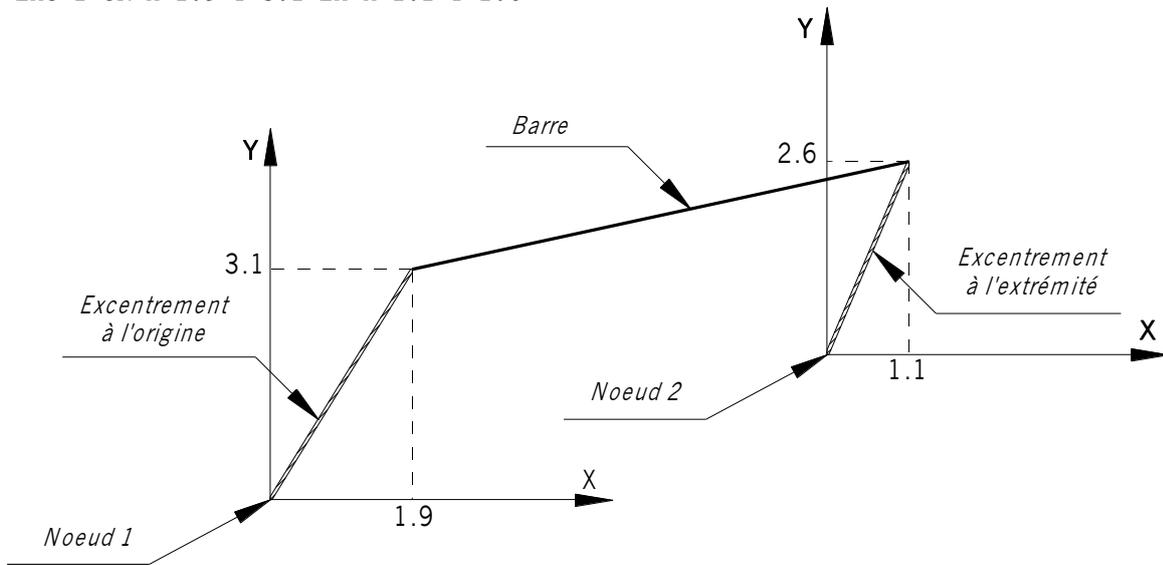
signifie que les barres 2, 3, 4, 5, 6 sont reliées à leur origine aux nœuds de la structure par une barre infiniment rigide. Cette liaison a pour origine le nœud de la structure et pour extrémité le point déduit des coordonnées du nœud par une translation de vecteur  $(0, 2.5)$  dans le repère local de la structure.

— *Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur toutes les barres déjà définies.*

— *Les excentremets restent extérieurs à la barre et ne peuvent recevoir ni chargement ni section d'étude.*

## EXEMPLE

```
BARRE 1 1 2  
EXC 1 OR X 1.9 Y 3.1 EX X 1.1 Y 2.6
```



## 2.8 - ARTICULATIONS AUX EXTREMITES DES BARRES

Les extrémités des barres peuvent contenir des articulations dans le repère local des barres.

### INSTRUCTION SIMPLE

```
ART liste (OR (RY) (RZ)) (EX (RY) (RZ))
```

### INSTRUCTION DE BLOC

```
ART
liste (OR RY RZ) (EX RY RZ)
```

...

Les coordonnées utilisables sont :

```
Option PLANE      rz
Option GRILL      ry
Option SPATIALE   ry, rz
```

### EXEMPLE

L'instruction :

```
ART 1 A 3 EX RY RZ
```

...

```
ART 3      EX RY
```

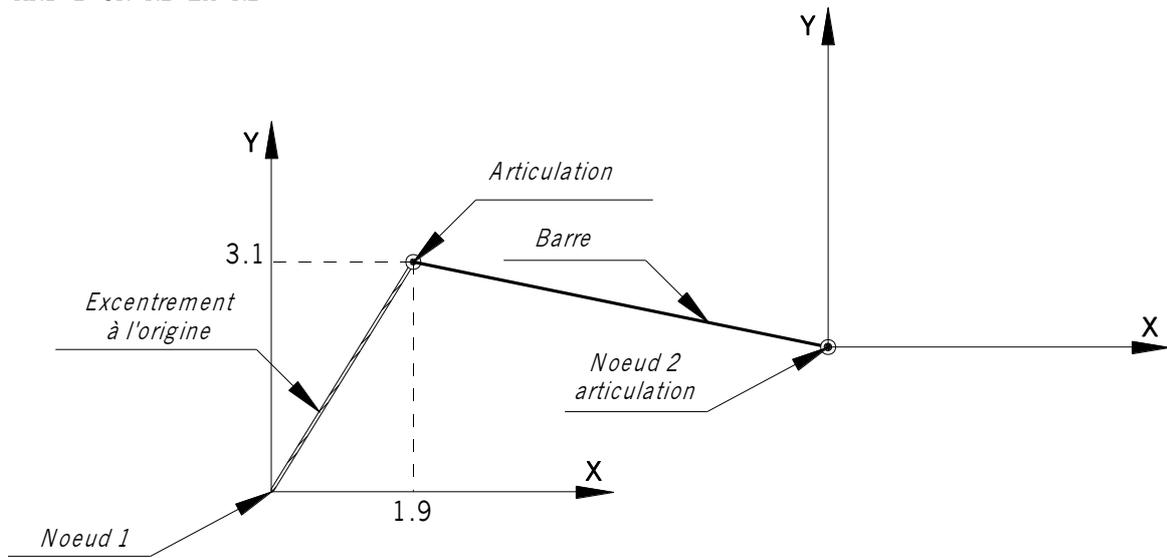
signifie que les barres 1, 2, 3 sont articulées suivant la rotation Y et Z du repère de la barre, par la suite l'articulation en Z de la barre 3 uniquement est bloquée.

— *Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur toutes les barres déjà définies.*

— *Pour désactiver une articulation, on déclare la même commande ART sans spécifier le degré de liberté que l'on souhaite bloquer à nouveau.*

## EXEMPLE

```
BARRE 1 1 2  
EXC 1 OR X 1.9 Y 3.1  
ART 1 OR RZ EX RZ
```



## 2.9 - ROTATION D'ANGLE BETA AUTOUR DE L'AXE OX DANS LE CAS D'UNE STRUCTURE SPATIALE

L'angle de rotation (en radians) est défini selon les syntaxes :

### INSTRUCTION SIMPLE

BETA liste beta

### INSTRUCTION DE BLOC

BETA

liste beta

...

### EXEMPLE

L'instruction :

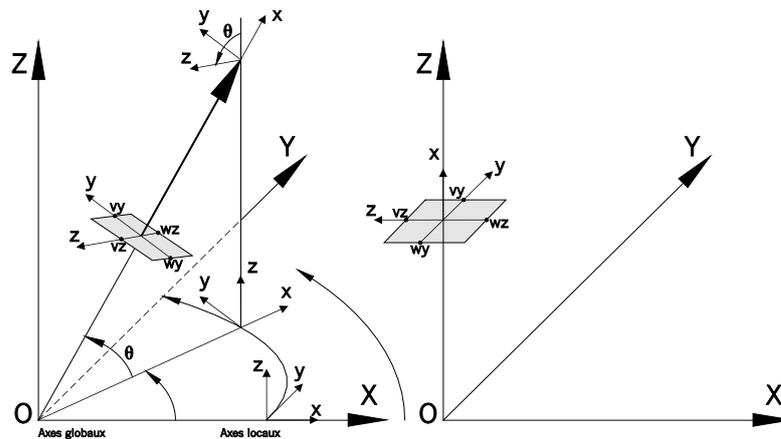
BETA 1 A 3 1.3

signifie que les barres 1, 2, 3 subissent une rotation de 1.3 radians par rapport à leur position d'origine.

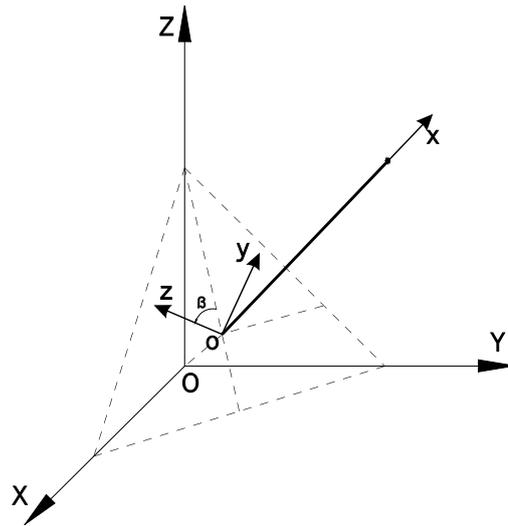
— *La position d'origine d'une barre ( $\beta=0$ ) dépend de l'orientation de l'axe  $ox$  de sa fibre neutre par rapport à l'axe  $OZ$  du repère général (voir schéma).*

— *Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur toutes les barres déjà définies.*

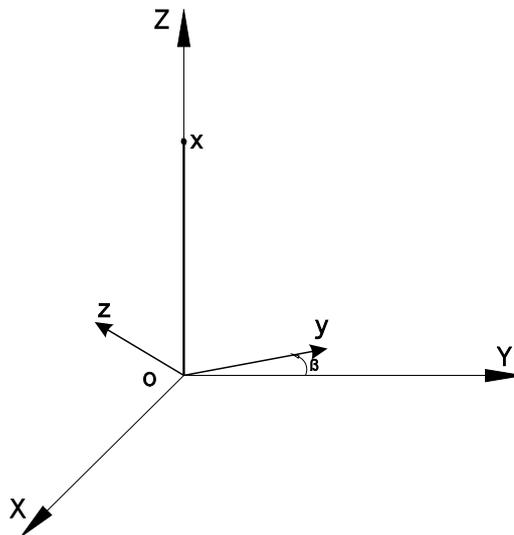
### ORIENTATION DES BARRES AVEC BETA NON DEFINI (PAS DE ROTATION DE LA BARRE AUTOUR DE SON AXE LOCAL)



— *L'axe  $oy$  est horizontal.*



**Cas 1 :** L'axe  $ox$  de la poutre n'est pas parallèle à l'axe  $OZ$  du repère général.  
(pour  $\beta=0$ , l'axe  $oy$  de la barre appartient au plan  $oXY$ )



**Cas 2 :** L'axe  $ox$  de la poutre est parallèle à l'axe  $OZ$  du repère général.  
(pour  $\beta=0$ , l'axe  $oy$  de la barre est confondu avec l'axe  $OY$  du repère général)

## 2.10 - CARACTERISTIQUES R.D.M. DES BARRES

Les barres peuvent avoir des caractéristiques R.D.M. de différents types :

- caractéristiques constantes
- caractéristiques de type variation linéaire d'une section rectangulaire
- définition des poutres dont l'inverse des caractéristiques est interpolable par une parabole
- caractéristiques constantes sur sol élastique
- caractéristiques constantes sur sol pseudo plastique

### INSTRUCTION SIMPLE

```
CARA liste SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz)
      (EXTY exty) (EXTZ extz)
```

```
CARA VAR LIN Y liste
```

```
  OR SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz) (EXTY exty) (EXTZ extz)
  EX SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz) (EXTY exty) (EXTZ extz)
```

```
CARA VAR LIN Z liste
```

```
  OR SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz) (EXTY exty) (EXTZ extz)
  EX SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz) (EXTY exty) (EXTZ extz)
```

```
CARA VAR PARA liste
```

```
  OR SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz) (EXTY exty) (EXTZ extz)
  MI SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz) (EXTY exty) (EXTZ extz)
  EX SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz) (EXTY exty) (EXTZ extz)
```

### Sol élastique

```
CARA PSE liste SX sx ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz)
      ZONE 1 (KFX kfx) (Kfy kfy) (KFZ kfz) (KMX kmx) XL xl
```

```
...
```

```
      ZONE n (KFX kfx) (Kfy kfy) (KFZ kfz) (KMX kmx)
```

### Sol plastique

```
CARA PSE liste SX sx ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz)
      PLASTIQUE (POS) (NEG) (KFX ffx) (Kfy ffy) (KFZ ffz) (KMX fmx)
      ZONE 1 (KFX kfx) (Kfy kfy) (KFZ kfz) (KMX kmx)
```

### INSTRUCTION DE BLOC

```
CARA
```

```
liste SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz) (EXTY exty) (EXTZ extz)
```

```
...
```

```
CARA VAR LIN Y
```

```
liste
```

```
  OR SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz) (EXTY exty) (EXTZ extz)
  EX SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz) (EXTY exty) (EXTZ extz)
```

```
...
```

```
CARA VAR LIN Z
```

```
liste
```

```
  OR SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz) (EXTY exty) (EXTZ extz)
  EX SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz) (EXTY exty) (EXTZ extz)
```

```
...
```

```
CARA VAR PARA
```

```
liste
```

```
  OR SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz) (EXTY exty) (EXTZ extz)
  MI SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz)
  EX SX sx (SY sy) ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz) (EXTY exty) (EXTZ extz)
```

```
...
```

### Sol élastique

```
CARA PSE
```

```
liste SX sx ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz)
```

```
  ZONE 1 (KFX kfx) (Kfy kfy) (KFZ kfz) (KMX kmx) XL xl
```

```
...
```

```
  ZONE n (KFX kfx) (Kfy kfy) (KFZ kfz) (KMX kmx)
```

**Sol plastique**

CARA PSE

```
liste SX sx ... (IZ iz) (IPOL ip) (VY vy) ... (WZ wz)
      PLASTIQUE (POS) (NEG) (KFX ffx) (KFY ffy) (KFZ ffz) (KMX fmx)
      ZONE 1 (KFX kfx) (KFY kfy) (KFZ kfz) (KMX kmx)
```

avec :

```
sx      section droite
sy      section réduite d'effort tranchant axe OY
sz      section réduite d'effort tranchant axe OZ
ix      inertie de torsion
iy      inertie de flexion axe OY
iz      inertie de flexion axe OZ
ip      inertie polaire d'axe OX pour le calcul d'inertie massique en rotation (dynamique)
vy      ordonnée de la fibre supérieure axe OY
wy      valeur absolue de l'ordonnée de la fibre inférieure axe OY
vz      ordonnée de la fibre supérieure axe OZ
wz      valeur absolue de l'ordonnée de la fibre inférieure axe OZ
kfx     réaction d'un sol élastique suivant l'axe ox local
kfy     réaction d'un sol élastique suivant l'axe oy local
kfz     réaction d'un sol élastique suivant l'axe oz local
kmx     réaction d'un sol élastique à la torsion
ffx     effort seuil plastique du sol élastique pour la barre suivant l'axe ox local
ffy     effort seuil plastique du sol élastique pour la barre suivant l'axe oy local
ffz     effort seuil plastique du sol élastique pour la barre suivant l'axe oz local
fmx     effort seuil plastique du sol élastique pour la barre à la torsion
xl      abscisse de la fin d'une zone de sol élastique
exty    excentrement du centre de torsion suivant l'axe oy local
extz    excentrement du centre de torsions suivant l'axe oz local
```

Les caractéristiques utilisables sont :

```
Option PLANE      sx, sy, iz, vy, wy, kfx, kfy
Option GRILL      ix, sz, iy, vz, wz, kmx, kfz
Option SPATIALE  toutes
```

- Pour la commande CARA PSE (dans le cas de barres sur ressort), il ne faut pas donner de valeurs aux sections réduites d'effort tranchant (ne pas utiliser les mots clés SY et SZ).

$\Sigma$  Cas des poutres de grandes dimensions supportées par des ressorts élastiques définies par la commande CARA PSE :

Lorsque des valeurs fortes de rigidité du sol sont utilisées, si l'on définit la poutre par l'intermédiaire d'une seule barre, **ST1** peut fournir des valeurs erronées liées à la théorie mise en œuvre. Pour éliminer ce problème, il convient de discrétiser la barre en plusieurs tronçons et d'appliquer la commande CARA PSE sur chaque tronçon.

- Pour la commande CARA PSE (dans le cas de barres sur sol pseudo plastique), on ne peut définir qu'une seule couche de sol par barre. La structure sur sol plastique doit être décomposée en plusieurs barres, car la plastification du sol n'est calculée que sur la pression moyenne le long de la barre. Seule une discrétisation importante permet d'avoir des résultats fiables (comme en dynamique). La discrétisation doit être plus fine, si ces barres sont connectées directement à des appuis rigides éventuels. La commande POS et NEG indique que la réaction du sol est prise en compte que si la pression est positive et/ou négative respectivement.

— Le calcul des effets du gradient thermique dépend des valeurs de VY et WY.

Pour les utilisateurs de ST1 version 2 :

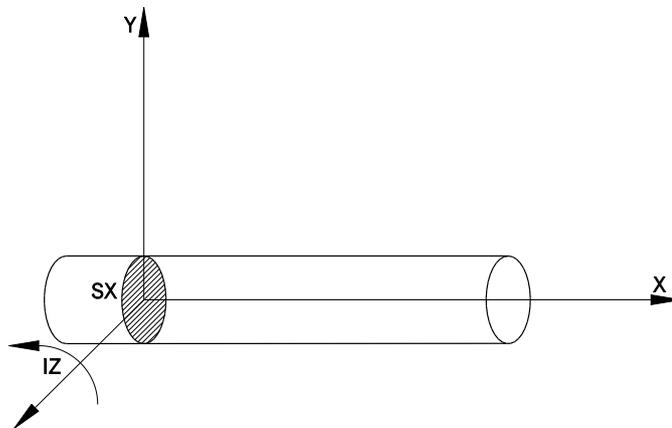
- Dans le cas d'un phasage, le calcul du fluage dépend des valeurs de VY et WY.

$\Sigma$  Il convient d'éviter des écarts trop importants dans les ordres de grandeur des inerties des barres.

$\Sigma$  Pour le tranchant, ne pas définir de section réduite de cisaillement revient à ne pas prendre en compte l'effet du tranchant. Cette solution est recommandée plutôt que de définir des valeurs de Sy et Sz trop grandes qui peuvent conduire à des problèmes de convergences numériques lors de l'inversion de matrice.

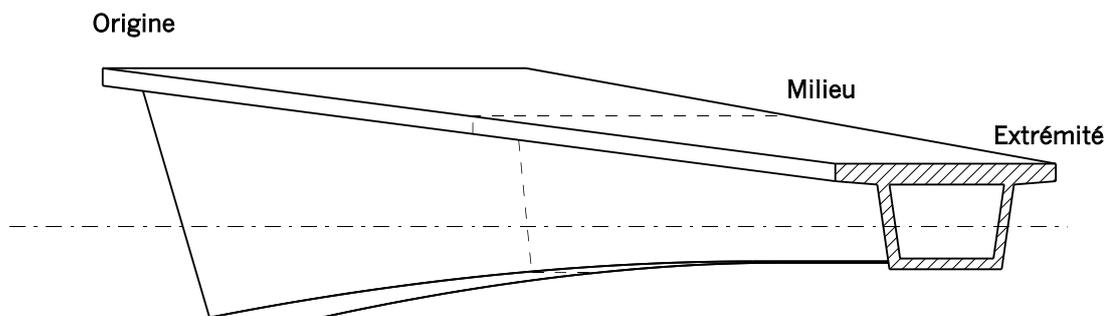
$\Sigma$  La valeur de XL pour la dernière zone de la liste n'a pas à être spécifiée : même si une valeur de XL est fournie, les propriétés de la dernière zone s'appliquent jusqu'à l'extrémité de la poutre, y compris au-delà de l'abscisse XL spécifiée pour cette zone.

#### EXEMPLE : DEFINITION DES POUTRES DE SECTION CONSTANTE



CARA 2,11 SX 1.25 IZ .2d-3

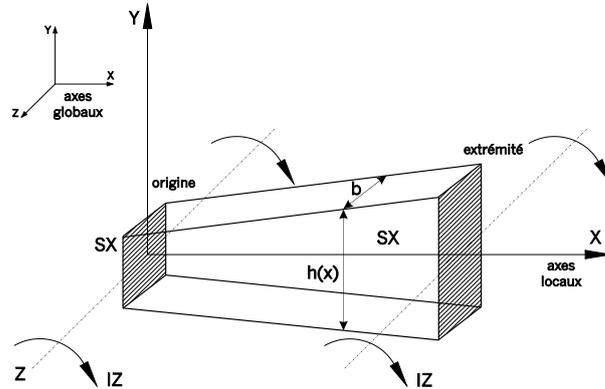
#### EXEMPLE : DEFINITION DES POUTRES DONT L'INVERSE DES CARACTERISTIQUES EST INTERPOLABLE PAR UNE PARABOLE



CARA VAR PARA 4,100  
 OR SX 1.25 SY .2 IZ .2d-3  
 MI SX 1.00 SY .2 IZ .5d-3  
 EX SX 2.25 SY .3 IZ .4d-3

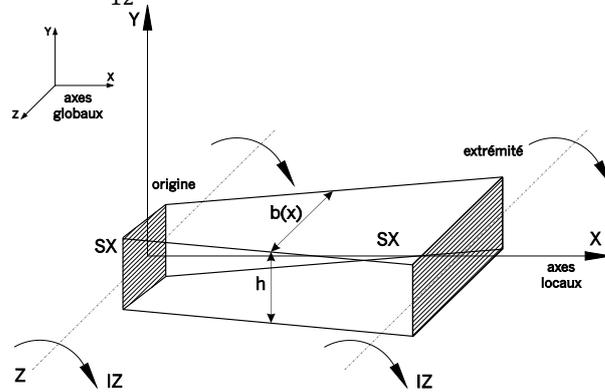
EXEMPLE : DEFINITION DE POUTRES DONT LES CARACTERISTIQUES VARIENT COMME LES CARACTERISTIQUES D'UNE POUTRE DE SECTION RECTANGULAIRE OÙ LA DIMENSION SUIVANT L'AXE OY LOCAL VARIE LINEAIREMENT

OPTION PLANE



```
CARA VAR LIN Y 3,8
OR SX 1.0 IZ 1.0
EX SX 1.5 IZ 2.0
```

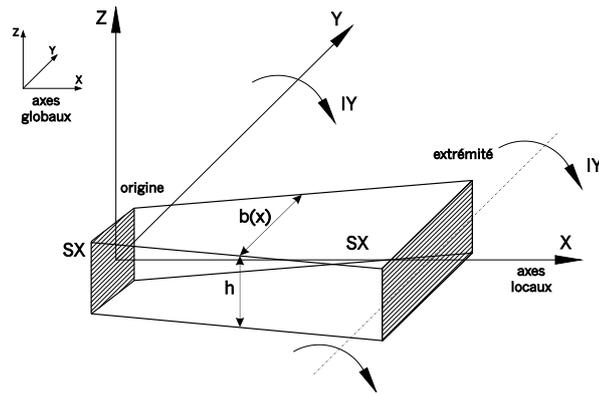
L'inertie IZ varie en degré 3 en  $\frac{b \times h(x)^3}{12}$  de 1.0 à 2.0



```
CARA VAR LIN Z 3,8
OR SX 1.0 IZ 1.0
EX SX 1.5 IZ 2.0
```

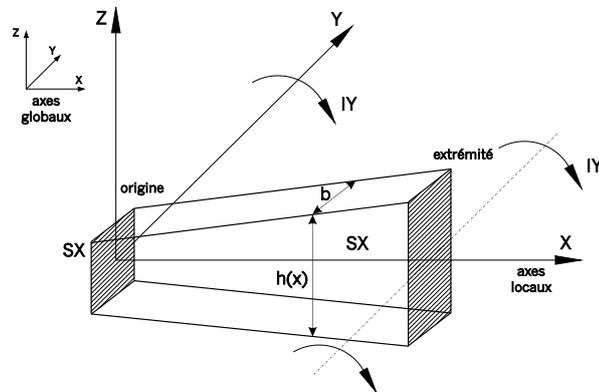
L'inertie IZ varie linéairement en  $b(x) \times \frac{h^3}{12}$  de 1.0 à 2.0

## OPTION GRILL



CARA VAR LIN **Y** 3,8  
 OR IX 1.0 IY 1.0  
 EX IX 1.5 IY 2.0

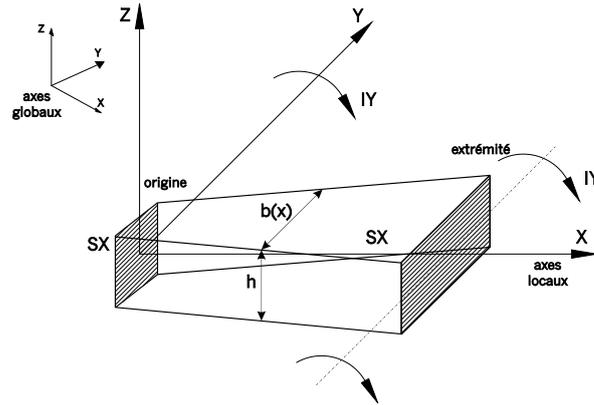
L'inertie IY varie linéairement en  $b(x) \times \frac{h^3}{12}$  de 1.0 à 2.0



CARA VAR LIN **Z** 3,8  
 OR IX 1.0 IY 1.0  
 EX IX 1.5 IY 2.0

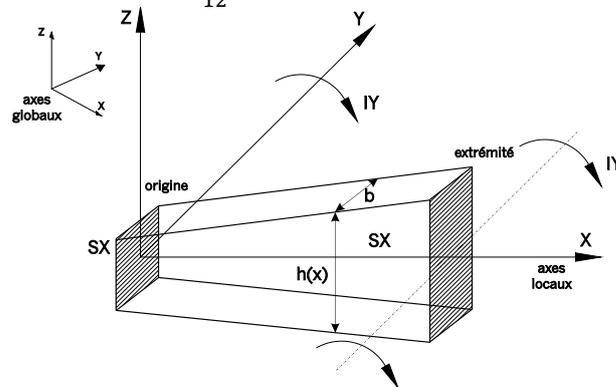
L'inertie IY varie en degré 3 en  $\frac{b \times h(x)^3}{12}$  de 1.0 à 2.0

## OPTION SPATIALE



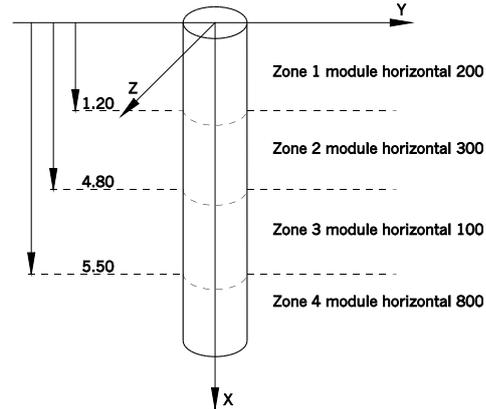
```
CARA VAR LIN Y 3,8
OR SX 1.0 IY 1.0 IZ 0.5
EX SX 1.5 IY 2.0 IZ 1.5
```

L'inertie  $IY$  varie linéairement en  $b(x) \times \frac{h^3}{12}$  de 1.0 à 2.0 et l'inertie  $IZ$  varie en degré 3 de 0.5 à 1.5



```
CARA VAR LIN Z 3,8
OR SX 1.0 IY 1.0 IZ 0.5
EX SX 1.5 IY 2.0 IZ 1.5
```

L'inertie  $IY$  varie en degré 3 en  $\frac{b \times h(x)^3}{12}$  de 1.0 à 2.0 et l'inertie  $IZ$  varie en degré 3 de 0.5 à 1.5

**EXEMPLE : DEFINITION DES POUTRES DE CARACTERISTIQUES CONSTANTES SUR SOL ELASTIQUE**

```

### EXEMPLE D'APPLICATION FASCICULE 62 ###
diam1 = 1.1      # diamètre des pieux
nbp = 3          # nombre de pieux
DIM lgt(10)     # profondeur du fond de couche
lgt(1) = 1.20
lgt(2) = 4.80
lgt(3) = 5.50
DIM EM(10)
DIM alpha(10)
EM(1) = 200
alpha(1) = 1.000
EM(2) = 300      # t/m2
alpha(2) = 1.000
EM(3) = 100      # t/m2
alpha(3) = 0.667
EM(4) = 800      # t/m2
alpha(4) = 0.667
DIM KI1(6)
diam0 = 0.6
pour i=1 a 4
  << KI1(i) = 12*EM(i) / (4/3*diam0/diam1*(2.65*diam1/diam0)**alpha(i)+alpha(i))
  >>
# KI1(i) rigidité sol/pieu ramené à l'unité de longueur de pieu, (t/m)/m1) = t/m2
# NB : KI1(i) = kfil(i)*diam1
# kfil(i) rigidité sol/pieu ramené à l'unité de surface de pieu, (t/m)/m2) = t/m3
CARA PSE numbarpieu SX 3.14*diam1**2/4*nbp IZ 3.14*(diam1/2)**4/4*nbp
ZONE 1 KFY KI1(1)*nbp      XL lgt(1)
ZONE 2 KFY KI1(2)*nbp      XL lgt(2)
ZONE 3 KFY KI1(3)*nbp      XL lgt(3)
ZONE 4 KFY KI1(4)*nbp

```

**EXEMPLE : DEFINITION DES POUTRES DE CARACTERISTIQUES CONSTANTES SUR SOL PLASTIQUE**

```

# ffy0 = pression limite
I0= 3.14*(diam1/2)**4/4*nbp
# en option plane
CARA PSE numbarpieu SX 3.14*diam1**2/4*nbp IZ I0
  PLASTIQUE NEG KFY ffy0*diam1*nbp
  ZONE 1 KFY KI1(1)*nbp
# en option spatiale
CARA PSE numbarpieu SX 3.14*diam1**2/4*nbp IX I0*2 IY I0 IZ I0
  PLASTIQUE POS NEG KFX ffx*diam1*nbp KFY ffy*diam1*nbp KFZ ffz*diam1*nbp KMX fmx*diam1*nbp
  ZONE 1 KFX kfx*nbp KFY kfy*nbp KFZ kfz*nbp KMX kmx*nbp

```

$\Sigma$  La fin de la dernière zone comprend obligatoirement l'extrémité de la barre.

— Par défaut, les caractéristiques des barres sont constantes.

— Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot `TOUT`. L'instruction agira sur toutes les barres déjà définies (pas de constantes par défaut).

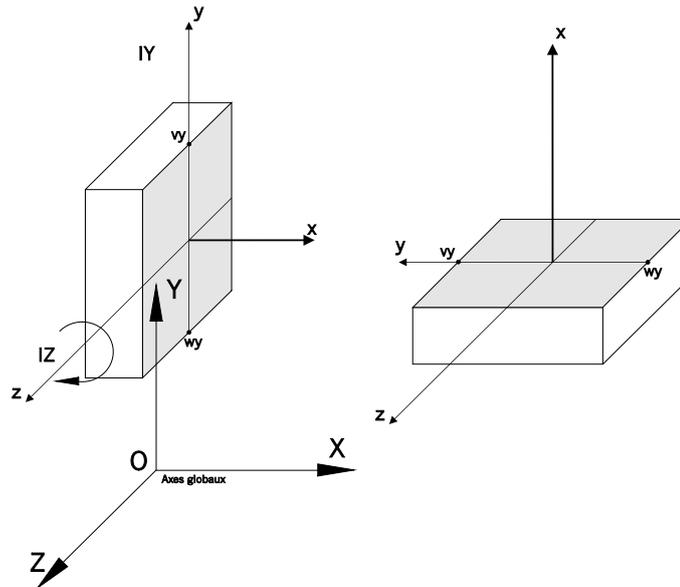
— La non définition des sections réduites d'effort tranchant (`SY SZ`) permet de ne pas prendre en compte les déformées d'effort tranchant.

— La définition des fibres extrêmes des barres (`VY, WY, ...`) est obligatoire pour le calcul des contraintes normales sur ces fibres.

— En option `PLANE` ou `SPATIALE`, l'effort normal `N` est positif en compression et négatif en traction.

— En option `PLANE` ou `SPATIALE`, la contrainte normale  `$\sigma$`  est positive en compression et négative en traction.

## OPTION PLANE



avec :

**axes locaux**

- x axe longitudinal de la poutre, axe normal à la direction
- z axe de flexion principal

**caractéristiques géométriques**

- v, w définis dans le repère local x, y, z
- I<sub>Z</sub> inertie autour de l'axe z
- w<sub>y</sub> valeur absolue de l'ordonnée de la fibre inférieure axe OY

**efforts R.D.M. calculés**

définis dans le repère local x, y, z

**déformations calculées**

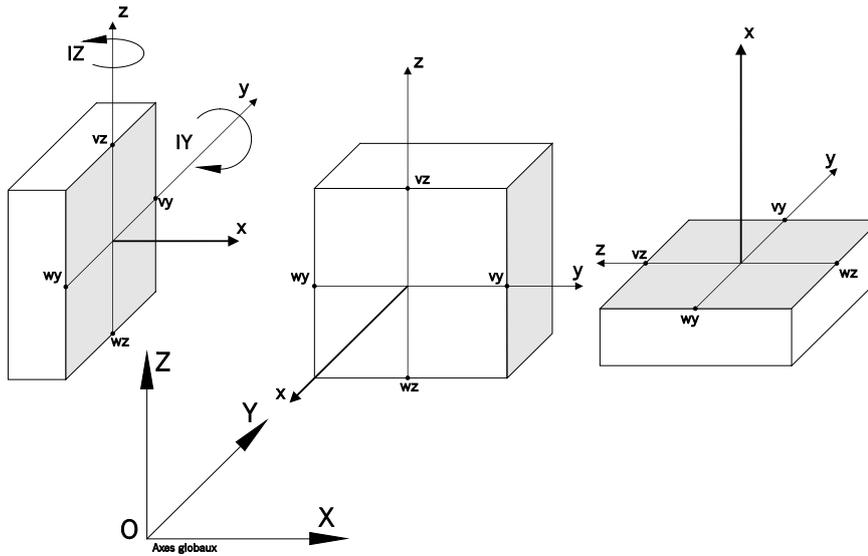
définies dans le repère global X, Y, Z

**contraintes normales**

définies dans le repère local x, y, z

$$\sigma_y \Leftrightarrow \Leftrightarrow \frac{N}{S_x} - \frac{M_z}{I_z} y \quad \text{et} \quad y \in [-w_y ; v_y]$$

## OPTION SPATIALE



avec :

**Axes locaux**

- x axe longitudinal de la poutre, axe normal à la section
- y axe de flexion principal
- z axe de flexion secondaire

**Caractéristiques géométriques**

- v, w définis dans le repère local x, y, z
- wy valeur absolue de l'ordonnée de la fibre inférieure axe OY
- IY inertie autour de l'axe y
- IZ inertie autour de l'axe z

**Efforts R.D.M. calculés**

définis dans le repère local x, y, z

**Déformations calculées**

définies dans le repère global X, Y, Z

**Contraintes normales**

définies dans le repère local x, y, z

$$\sigma_{yz} \Rightarrow \Rightarrow \frac{N}{S_x} + \frac{M_y}{I_y} z - \frac{M_z}{I_z} y \quad \text{et} \quad y \in [-w_y; v_y] \quad \text{et} \quad z \in [-w_z; v_z]$$

## 2.11 - MASSES PROPRES (DYNAMIQUE)

La description de masses propres liées à un nœud ou à une barre peut se faire suivant les syntaxes suivantes :

### INSTRUCTION SIMPLE

MASSE PROPRE

```
(NOEUD liste MASSE (SUP)      m1 ... mj1)
(NOEUD liste MASSE (SUP) DI   d1 ... dj1)
(BARRE listeb (< MASSE (SUP), MASSE (SUP) DI , MASSE NUL > ) )
(BARRE listeb (EXC (OR (X) x ... (Z) z) (EX (X) x ... (Z) z)) ...
... MASSE (SUP) <(UNI m1), (LIN m1 m2), (PARABOL m1 m2 m3) > )
```

FIN

- *Les masses propres peuvent être définies aux nœuds. Elles doivent avoir des dimensions homogènes à des unités de masse et non de poids. Elles sont dans ce cas dans le repère global. Pour les masses définies aux nœuds, l'utilisateur fournit directement les valeurs des masses propres aux nœuds de la structure soit sous forme de matrice diagonale, soit de matrice pleine symétrique.*
- *Pour faciliter la génération des masses, l'utilisateur peut générer automatiquement le calcul des masses propres aux nœuds en spécifiant les barres pour lesquelles il souhaite affecter des masses modales aux nœuds d'extrémité de ces barres.*
- $\sum$  *Pour que des masses soient effectivement affectées aux nœuds extrémités des barres sélectionnées, le poids volumique de ces barres doit être défini avant cette commande. Par ailleurs, pour calculer le poids volumique des nœuds aux barres, l'accélération de pesanteur G\_DYN doit être définie (voir Définition des matériaux).*
- *Les masses modales définies automatiquement pour les barres sont diagonales et définies en déplacement seulement par défaut (la formulation de ces matrices est définie en annexe). En utilisant la commande MASSE DI, la matrice diagonale complète (déplacement et rotation) est activée. Il est possible d'utiliser une formulation avec matrice consistante (la formulation est donnée en annexe) en utilisant la commande MASSE seule.*
- *On peut enfin annuler les masses modales d'une barre avec la commande NUL. Attention, cela n'annule pas les masses directement définies aux nœuds.*
- *L'option UNI permet d'ajouter des masses linéiques uniformes à des barres.*
- *L'option LIN permet d'ajouter des masses linéiques lineaires à des barres.*
- *L'option PARABOL permet d'ajouter des masses linéiques paraboliques à des barres.*
- *Les masses doivent être mises sous forme de masse linéique.*
- *Masse = Poids / g\_dyn (voir Définition des matériaux)*
- *L'option SUP permet d'ajouter des masses à des barres ou à des nœuds où des masses ont déjà été définies.*
- *Le mot clef EXC optionel permet d'avoir des masses additionnelles excentrées par rapport à la barre sans que la barre ne soit nécessairement excentrée. Attention, la création de masses excentrées à des barres non pourvues de masses non excentrées peut rendre impossible la résolution des modes. Les excentrements sont définis dans le repère global. Il n'est pas possible d'utiliser le mot clé SUP pour définir plusieurs masses supplémentaires avec différents excentrements sur une même barre.*
- *Le calcul des modes propres et donc celui des masses propres est disponible uniquement en option plane et spatiale.*

$\Sigma$  Les masses propres étant affectées aux nœuds uniquement, il n'y a pas de masses propres affectées aux sections d'études intermédiaires des barres. Il convient donc à l'utilisateur de définir suffisamment de nœuds sur sa structure pour modéliser correctement le comportement dynamique de sa structure.

#### INSTRUCTION DE BLOC

```
MASSE PROPRE
  NOEUD liste      MASSE      m1 ... mj1
  ...
  NOEUD liste      MASSE DI d1 ... dj1
  ...
  BARRE listeb     < (MASSE DI), MASSE , MASSE NUL >
  ...
FIN
```

avec :

```
Liste      liste des numéros de noeuds
Listeb     liste des numéros de barres sur lesquels seront calculées automatiquement les
           masses
m1 ... mj1 demi-matrice de masse inférieure, soit :
           6 termes pour les structures planes
           21 termes pour les structures spatiales
d1 ... dj2 termes diagonaux de la matrice de masse, soit :
           3 termes pour les structures planes
           6 termes pour les structures spatiales
```

#### EXEMPLE DE DEFINITION AVEC BARRE UNIQUEMENT

```
MASSE PROPRE
  BARRE tout  MASSE DI
  BARRE 3 a 7 MASSE NUL
FIN
```

signifie que toutes les barres seront affectées à chaque noeud d'extrémité de barre d'une masse propre calculée selon une matrice diagonale complète (translations et rotations) à partir de la géométrie de la section de chaque barre et du poids volumique associé, sauf pour les barres 3 à 7 qui auront une masse propre nulle.

#### EXEMPLE DE MASSES ADDITIONNELLES AVEC EXCENTREMENT

```
MASSE PROPRE
  BARRE 1 a 100                                     MASSE      UNI 0.4
  BARRE 1 a 50  EXC OR 0 Y -2 Z 0 EX X 0 Y -2 Z 0 MASSE SUP UNI 0.2
  BARRE 51 a 100 EXC OR 0 Y +2 Z 0 EX X 0 Y +2 Z 0 MASSE SUP UNI 0.2
FIN
```

**EXEMPLE**

En option PLANE (cf. commande *OPTION p43*) l'instruction :

```
NOEUD 1 a 5 MASSE DI 1000. 2000. 0.
```

signifie que les nœuds 1, 2, 3, 4, 5 ont des masses propres associées dont la matrice de masse exprimée dans le repère de la structure est :

```
1000. 0. 0.
0. 2000. 0.
0. 0. 0.
```

En option SPATIALE (cf. commande *OPTION p44*) l'instruction :

```
NOEUD 1 a 5 MASSE DI 1. 2. 3. 0. 0. 0.
```

signifie que les nœuds 1, 2, 3, 4, 5 ont des masses propres associées dont la matrice de masse

```
1.
0. 2.
0. 0. 3.
0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0.
```

En option SPATIALE (cf. commande *OPTION p44*) l'instruction :

```
NOEUD 7, 8, 9 MASSE
```

```
1.
2. 3.
4. 5. 6.
7. 8. 9. 10.
11. 12. 13. 14. 15.
16. 17. 18. 19. 20. 21
```

signifie que les nœuds 7, 8, 9 sont affectés par la matrice de masse exprimée dans le repère de la structure est :

```
1. 2. 4. 7. 11. 16.
2. 3. 5. 8. 12. 17.
4. 5. 6. 9. 13. 18.
7. 8. 9. 10. 14. 19.
11. 12. 13. 14. 15. 20.
16. 17. 18. 19. 20. 21.
```

*Rappel : une matrice de masse exprime les efforts en fonction des accélérations :*

$$\text{effort}(\ ) = \text{matrice\_masse}(\ ) \times \text{acceleration}(\ )$$

pour une structure plane :

$$\begin{pmatrix} fx \\ fy \\ mz \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m1 & m2 & m4 \\ m2 & m3 & m5 \\ m4 & m5 & m6 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \gamma x \\ \gamma y \\ Jz \end{pmatrix}$$

♦ pour une structure spatiale :

$$\begin{pmatrix} fx \\ fy \\ fz \\ mx \\ my \\ mz \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m1 & m2 & m4 & m7 & m11 & m16 \\ m2 & m3 & m5 & m8 & m12 & m17 \\ m4 & m5 & m6 & m9 & m13 & m18 \\ m7 & m8 & m9 & m10 & m14 & m19 \\ m11 & m12 & m13 & m14 & m15 & m20 \\ m16 & m17 & m18 & m19 & m20 & m21 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \gamma x \\ \gamma y \\ \gamma z \\ Jx \\ Jy \\ Jz \end{pmatrix}$$

## 3

**DEFINITION DES MATERIAUX**

Les matériaux constituant les barres peuvent être définis suivant deux méthodes :

**3.1 - DEFINITION DIRECTE DES CONSTANTES PHYSIQUES D'UNE BARRE****INSTRUCTION SIMPLE**

```
CONS liste (E e) (NU nu) (RO ro) (G_DYN g) (TEMP temp) (AMORTISSEMENT am)
```

**INSTRUCTION DE BLOC**

```
CONS
liste (E e) (NU nu) (RO ro) (G_DYN g) (TEMP temp) (AMORTISSEMENT am)
...
```

avec :

e	module de Young
nu	coefficient de Poisson
ro	poids volumique
g	accélération de pesanteur (uniquement pour les calculs de masses modales: masse_vol=ro/g)
am	numero du type d'amortissement dynamique (voir p198)
temp	coefficient de dilatation thermique

**EXEMPLE**

L'instruction :

```
CONS 2,11 NU .5 E 1e6
```

signifie que les barres 2 et 11 ont pour coefficient de poisson 0.5 et pour module de Young 1000000.

*Pour les utilisateurs de **ST1 version 2** :*

- *Les constantes physiques des éléments définis suivant la syntaxe ci-dessus ne peuvent pas évoluer avec le temps au cours d'un phasage (cf. commandes [MAT p74](#) et [PHASAGE p177](#)).*
- *Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot `TOUT`. L'instruction agira sur toutes les barres déjà définies.*
- *Les constantes physiques de toutes les barres activées doivent être définies, il n'y a pas de constantes par défaut.*

## 3.2 - DEFINITION DES CONSTANTES PHYSIQUES D'UNE BARRE PAR L'INTERMEDIAIRE D'UN MATERIAU

### INSTRUCTION SIMPLE

CONS liste MAT i

### INSTRUCTION DE BLOC

CONS  
liste MAT i

...

avec :

i                    numéro du matériau associé à la liste des barres

### EXEMPLE

L'instruction :

CONS 2,11 MAT 1

signifie que les barres 2 et 11 sont constituées du matériau n°1.

— *Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur toutes les barres déjà définies.*

— *Les constantes de toutes les barres activées doivent être définies, il n'y a pas de constantes par défaut.*

— *L'instruction ci-dessus doit être complétée par la définition du matériau (cf. commande MAT p74).*

### 3.3 - DEFINITION D'UN MATERIAU

La définition d'un matériau permet une description complète des constantes physiques des barres. En particulier elle permet de définir des lois d'évolution au cours du temps des paramètres suivants :

module d'élasticité (module de Young)  
déformation de retrait  
déformation de fluage

La définition d'un matériau s'effectue selon la syntaxe suivante :

```
MAT i ('Titre du matériau')
  E ... paramètres (voir ci-dessous) ...
  (RETRAIT ... paramètres (voir ci-dessous) ...)
  (FLUAGE ... paramètres (voir ci-dessous) ...)
  (NU nu)
  (RO ro)
  (G_DYN g) (AMORTISSEMENT am)
  (TEMP temp)
  (AVANCE ... paramètres (voir paragraphe de cette commande) ...)
```

FIN

avec :

nu	coefficient de Poisson
ro	poids volumique
g	accélération de pesanteur (pour les calculs de masses modales: masse_vol=ro/g)
am	numéro du type d'amortissement dynamique (voir p198)
temp	coefficient de dilatation thermique

Les paramètres de définitions du module de Young, du retrait et du fluage dépendent du type de loi réglementaire choisi.

On dispose actuellement des règlements suivants :

BPEL	béton courant ( $f_{c28} \leq 60$ MPa)
BHP	proposition AFREM du 16 Mai 95 ( $40 \text{ MPa} \leq f_{c28} \leq 80$ MPa)
BPEL	béton léger
CEB90	béton courant
EC2	béton conforme à l'Eurocode 2 (EN 1992-1-1 et EN1992-2)

— Lorsque l'on utilise la définition d'un matériau suivant un règlement et non en spécifiant directement la valeur du module, le module initial prend une valeur instantanée (âge du béton est égal à 28 jours).

Pour les utilisateurs de **ST1 version 2** :

— Dans le cas où les constantes physiques des barres n'évoluent pas au cours d'un phasage (cf. commande PHASAGE p177), il est possible de les définir directement ou à l'aide d'un matériau. Le calcul d'un phasage utilise le module instantané dont la valeur évolue au cours du temps en fonction de la date (cf. commande DEFINITION D'UNE DATE p183).

#### EXEMPLE

```
# définition à l'aide d'un matériau
MAT 1
  E 1e6
  NU 0.2
  RO 2.5
FIN
CONS 12 a 15 MAT 1
```

est équivalent à :

```
# définition directe
CONS 12 a 15 E 1e6 NU 0.2 RO 2.5
```

### 3.3.1 - DEFINITION D'UN BETON SUIVANT BPEL91 OU AFREM/BHP 16 MAI 1995

La définition d'un matériau suivant le règlement BPEL91 ou suivant la proposition AFREM/BHP du 16 Mai 95 s'effectue selon la syntaxe suivante :

```
MAT i ('Titre du matériau')
  E <BPEL, BHP1, BHP2, BPEL_BL> (<MPA, TM2, KNM2>) FC28 fc28
  (NU nu)
  (RO ro) (G_DYN g) (AMORTISSEMENT am)
  (TEMP temp)
  (RETRAIT <BPEL, BHP1, BHP2, BPEL_BL> (ER er))
  (FLUAGE <BPEL, BHP1, BHP2, BPEL_BL> (TRACTION <OUI, NON>))
  (ROH roh ROS ros RM rom)
  (ROBS robs EA Ea)
  (T_THERM FCP fcp (LAMBDA lambda) DTP tpa THETA tetamax)
FIN
```

avec :

BPEL	loi BPEL91	( $fc28 \leq 60$ MPa)
BHP1	loi AFREM/BHP - sans fumées de silice	( $40 \text{ MPa} \leq fc28 \leq 80$ MPa)
BHP2	loi AFREM/BHP - avec fumées de silice	( $40 \text{ MPa} \leq fc28 \leq 80$ MPa)
BPEL_BL	loi BPEL91 béton léger	
fc28	résistance caractéristique à la compression du béton (en MPa)	
nu	coefficient de Poisson	
ro	poids volumique	
g	accélération de pesanteur (uniquement pour les calculs de masses modales: masse_vol=ro/g)	
am	numéro du type d'amortissement dynamique	
temp	coefficient de dilatation thermique	
er	valeur finale de retrait (si cette valeur n'est pas donnée, <b>ST1</b> la calcule à partir des valeurs de roh, ros et rom)	
roh	hygrométrie ambiante moyenne en %	
ros	rapport des armatures adhérentes à la section de béton ( $A_s/B$ )	
rom	rayon moyen de la pièce exprimé en cm ( $A_c/u$ )	
robs	(loi BPEL_BL) masse volumique sèche en t/m <sup>3</sup>	
Ea	(loi BPEL_BL) quantité d'eau absorbée par les granulats légers en litres/m <sup>3</sup>	
fcp	résistance fcp à la fin du traitement thermique (BPEL Annexe 6)	
lambda	coefficient sur les pertes thermiques (traitement thermique) appliquées au câble (en général 0,1) (BPEL Annexe 6)	
tpa	intervalle de temps (en jours) pendant laquelle est appliquée la température tetamax (BPEL Annexe 6)	
tetamax	température maximale en degrés pour le traitement thermique (BPEL Annexe 6) (entre 20 et 80 degrés)	

- La définition du module du matériau à partir de la valeur caractéristique  $f_{c28}$  impose de préciser l'unité choisie pour exprimer le module. Ce module peut être exprimé en :

Méga Pascals (MPa)	mot clé MPA
tonnes par mètre carré (t/m <sup>2</sup> )	mot clé TM2
kilo Newtons par mètre carré (kN/m <sup>2</sup> )	mot clé KNM2

- L'accélération  $g$  est définie automatiquement si l'unité du module du matériau est définie par l'utilisateur. Si l'unité est en TM2, ou KNM2 ou MPA, l'accélération  $g$  vaut 9.81.

- Lorsque l'on utilise la définition d'un matériau suivant le règlement BPEL, le module à date initiale de quelques jours correspond à un béton jeune et à un module proche du module instantané. Pour obtenir un module différé, il faut atteindre une date beaucoup plus grande (plusieurs mois ou années). Le cas échéant, le concepteur doit redéfinir ou non le module pour les charges à étudier en définissant directement le module (par exemple pour les surcharges, on utilise généralement E instantané).

- Le traitement thermique, s'il est défini, n'est pris en compte que pour les phasages de construction selon les modalités décrites en annexe (B3.3 - cas particulier du règlement BPEL91 et annexe 14 relatives au BHP). Pour les charges hors phasage, l'utilisateur doit spécifier directement les pertes supplémentaires dans les commandes de chargement forfaitaire.

- Le fluage peut être pris en compte soit en compression et en traction, soit en compression seulement avec la commande TRACTION

#### EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON B30 - MODULE EXPRIME EN T/M<sup>2</sup>

```
MAT 1 'B30'
  E BPEL TM2 FC28 30
  ...
  FIN
```

#### EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON B40 - MODULE EXPRIME EN MPA

```
MAT 1 'B40'
  E BPEL MPA FC28 40
  ...
  FIN
```

Pour les utilisateurs de **ST1 version 2** :

- Lors d'un phasage (cf. commande PHASAGE p177), **ST1** tient compte des déformations dues au retrait et au fluage. Ces déformations sont calculées en fonction de  $\rho_{oh}$ ,  $\rho_{os}$  et  $\rho_{om}$ . Dans le cas du retrait la valeur finale de retrait peut être imposée (mot clé ER).

#### EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON B40 SANS FLUAGE ET DONT LE RETRAIT FINAL EST DE 2.10<sup>-4</sup>

```
MAT 1 'béton B40'
  E BPEL MPA FC28 40
  RETRAIT BPEL ER 2e-4
  FIN
```

**EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON B25 SANS FLUAGE AVEC RETRAIT DEFINI PAR VALEURS**

rayon moyen de la pièce	25cm
hygrométrie ambiante moyenne en %	70
rapport des armatures adhérentes sur le béton ( $A_s/B$ )	0.05

```

MAT 1 'béton B25'
E BPEL TM2 FC28 25
RETRAIT BPEL
RM 25 ROH 70 ROS 0.05
FIN

```

**EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON B60 SUSCEPTIBLE DE FLUER SUIVANT LA LOI DU BPEL MAIS SANS DEFORMATION DE RETRAIT**

```

MAT 1 'béton B60 sans retrait'      ou      MAT 1 'béton B60 sans retrait'
E BPEL KNM2 FC28 60                E BPEL KNM2 FC28 60
FLUAGE BPEL                        RETRAIT BPEL ER 0
RM 25 ROH 70 ROS 0.05              FLUAGE BPEL
FIN                                  RM 25 ROH 70 ROS 0.05
                                     FIN

```

**EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON B80 SANS FUMÉES DE SILICE DONT LE RETRAIT ET LE FLUAGE SUIVENT LA LOI AFREM/BHP**

```

MAT 1 'béton B80'
E BHP1 MPa FC28 80
RETRAIT BHP1
FLUAGE BHP1
RM 25 ROH 70 ROS 0.05
FIN

```

**EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON B40 AVEC TRAITEMENT THERMIQUE (PRETENSION)**

```

MAT 1 'béton B25'
E BPEL TM2 FC28 40
RETRAIT BPEL
FLUAGE BPEL
RM 25 ROH 70 ROS 0.05
T_THERM FCP 30 LAMBDA 0.1 DTP 2 THETA 65
FIN

```

### 3.3.2 - DEFINITION D'UN BETON SUIVANT LE CEB-90

La définition d'un matériau suivant le code modèle CEB-90 s'effectue selon la syntaxe suivante :

```
MAT i ('Titre du matériau')
  E CEB (<MPA, TM2, KNM2>) FCK fck
  (NU nu)
  (RO ro) (G_DYN g) (AMORTISSEMENT am)
  (TEMP temp)
  (RETRAIT CEB (ER ecs0))
  (FLUAGE CEB (TRACTION <OUI, NON>))
  (RH rh H h) (CIMENT <SL, N, R, RS>)
FIN
```

avec :

fck	résistance caractéristique à la compression à 28 jours (en MPa)
nu	coefficient de Poisson
ro	poids volumique
g	accélération de pesanteur (uniquement pour les calculs de masses modales: masse_vol=ro/g)
am	numero du type d'amortissement dynamique
temp	coefficient de dilatation thermique
ecs0	valeur finale de retrait (si cette valeur n'est pas donnée, <b>ST1</b> la calcule à partir des valeurs de rh, h et du type de ciment : SL, N, R, RS)
rh	hygrométrie ambiante moyenne en %
h	rayon moyen de la pièce exprimé en mm (2Ac/u) (CEB90-2.1.69)

mots clés :

SL	ciments à prise lente
N, R	ciments normaux ou à prise rapide
RS	ciments haute résistance à prise rapide

*La définition du module du matériau à partir de la valeur caractéristique fck impose de préciser*

— *l'unité choisie pour exprimer le module. Ce module peut être exprimé en :*

<i>Méga Pascals (MPa)</i>	<i>mot clé MPA</i>
<i>tonnes par mètre carré (t/m<sup>2</sup>)</i>	<i>mot clé TM2</i>
<i>kilo Newtons par mètre carré (kN/m<sup>2</sup>)</i>	<i>mot clé KNM2</i>

*L'accélération g est définie automatiquement si l'unité du module du matériau est définie par*

— *l'utilisateur. Si l'unité est en TM2, ou KNM2 ou MPA, l'accélération g vaut 9.81.*

*Le fluage peut être pris en compte soit en compression et en traction, soit en compression*

— *seulement avec la commande TRACTION*

#### EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON C30 - MODULE EXPRIME EN T/M<sup>2</sup>

```
MAT 1 'C30'
  E CEB TM2 FCK 30
  ...
FIN
```

**EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON C40 - MODULE EXPRIME EN MPA**

```

MAT 1 'C40'
  E CEB MPA FCK 40
  ...
FIN

```

— Pour les utilisateurs de **ST1 version 2** :

Lors d'un phasage (cf. commande PHASAGE p177), **ST1** tient compte des déformations dues au retrait et au fluage. Ces déformations sont calculées en fonction de  $r_h$ ,  $h$  et du type de ciment. Dans le cas du retrait la valeur finale de retrait peut être imposée (mot clé ER).

**EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON C40 SANS FLUAGE ET DONT LE RETRAIT FINAL EST DE 2.10-4**

```

MAT 1 'béton C40'
  E CEB MPA FCK 40
  RETRAIT CEB ER 2e-4
FIN

```

**EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON C25 SANS FLUAGE AVEC RETRAIT DEFINI PAR VALEURS**

rayon moyen de la pièce                    250 mm  
hygrométrie ambiante moyenne en %    70  
ciment normal

```

MAT 1 'béton C25'
  E CEB TM2 FCK 25
  RETRAIT CEB
  H 250 RH 70 CIMENT N
FIN

```

**EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON C35 SUSCEPTIBLE DE FLUER SUIVANT LE CEB90 MAIS SANS DEFORMATION DE RETRAIT**

```

MAT 1 'béton C35 sans retrait'            ou        MAT 1 'béton C35 sans retrait'
  E CEB KNM2 FCK 35                        E CEB KNM2 FCK 35
  FLUAGE CEB                                RETRAIT CEB ER 0
  H 250 RH 70                                FLUAGE CEB
FIN                                            H 250 RH 70 CIMENT N
                                              FIN

```

**EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON C30 DONT LE RETRAIT ET LE FLUAGE SUIVENT LE CEB90**

```

MAT 1 'béton C30'
  E CEB MPA FCK 30
  RETRAIT CEB
  FLUAGE CEB
  H 250 RH 70 CIMENT N
FIN

```

### 3.3.3 - DEFINITION D'UN BETON SUIVANT L'EUROCODE 2

La définition d'un matériau suivant l'Eurocode 2-1-1 (EN 1992-1-1) s'effectue selon la syntaxe suivante:

```
MAT i ('Titre du matériau')
  E EC2 (<MPA, TM2, KNM2>) FCK fck
  (NU nu)
  (RO ro) (G_DYN g) (AMORTISSEMENT am)
  (TEMP temp)
  (RETRAIT EC2 (ER ecs0))
  (FLUAGE EC2 (TRACTION <OUI, NON>) (LINEAIRE <OUI, NON>))
  (RH rh RM_EC h) (CIMENT <S, N, R>)
  (T_THERM FCMP fcmp (LAMBDA lambda) DTP listdt THETA listeta)
FIN
```

avec :

fck	résistance caractéristique à la compression à 28 jours (en MPa)
nu	coefficient de Poisson
ro	poids volumique
g	accélération de pesanteur (uniquement pour les calculs de masses modales: masse_vol=ro/g)
am	numero du type d'amortissement dynamique
temp	coefficient de dilatation thermique
ecs0	valeur finale de retrait de dessiccation (si cette valeur n'est pas donnée, <b>ST1</b> la calcule à partir des valeurs de rh, h et du type de ciment : S, N, R) le terme de retrait endogène (survenant au cours du durcissement du béton) est toujours calculé par <b>ST1</b>
rh	hygrométrie ambiante moyenne en %
h	diamètre moyen de la pièce exprimé en mm (2Ac/u) (EC2-1 B.2)
fcmp	résistance moyenne fcmp à la fin du traitement thermique (EC2-1-1 §10.3)
lambda	coefficient sur les pertes thermiques appliquées au câble pendant la cure (normalement 0,5) (EC2-1-1 §10.5.2) (NB : BPEL lambda=0,1 : 1 revient à supprimer ces pertes)
listdt	liste des intervalles de temps (en jour) pendant laquelle est appliquée la liste de température teta (EC2-1-1 §10.3)
listeta	liste des températures maximales (en degrés) pour le traitement thermique (EC2-1-1 §10.3)

mots clés :

S	classe de résistance CEM 32,5 N (ciments à prise lente)
N	classe de résistance CEM 32,5 R, CEM 42,5 N (ciments normaux)
R	classe de résistance CEM 42,5 R, CEM 52,5 N, CEM 52,5 R (ciments haute résistance à prise rapide)

 La définition du module du matériau à partir de la valeur caractéristique  $f_{ck}$  impose de préciser l'unité choisie pour exprimer le module. Ce module peut être exprimé en :

Méga Pascals (MPa)	mot clé MPA
tonnes par mètre carré (t/m <sup>2</sup> )	mot clé TM2
kilo Newtons par mètre carré (kN/m <sup>2</sup> )	mot clé KNM2

— L'accélération  $g$  est définie automatiquement si l'unité du module du matériau est définie par l'utilisateur. Si l'unité est en TM2, ou KNM2 ou MPA, l'accélération  $g$  vaut 9.81.

— Le fluage peut être pris en compte soit en compression et en traction, soit en compression seulement avec la commande TRACTION

— Le traitement thermique, s'il est défini, n'est pris en compte uniquement pour les phasages de construction selon les règles décrites en annexe( B3.6 - cas particulier du règlement EN1992-1-1). Pour les charges hors phasage, l'utilisateur doit spécifier directement les pertes supplémentaires dans les commandes de chargement forfaitaire.

$\Sigma$  Dans le cas du traitement thermique, s'il est défini, il convient à l'utilisateur de réduire lui-même la valeur de la résistance fck (aucun abattement sur la résistance n'est effectué par **ST1**).

— Le fluage non linéaire correspond à l'application du coefficient correcteur de l'article 3.1.4(4) de l'EN1992-1-1, soit  $\exp(1.5(ks-0.45))$  et  $ks=\max(0.45,\sigma/fcm(t0))$ . Par défaut, ce coefficient n'est pas appliqué. Pour l'appliquer, il faut écrire "LINEAIRE NON".

**EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON EC2 - MODULE EXPRIME EN T/M<sup>2</sup>**

```
MAT 1 'EC2'
  E EC2 TM2 FCK 30
  ...
FIN
```

**EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON C40 - MODULE EXPRIME EN MPA**

```
MAT 1 'C40'
  E EC2 MPA FCK 40
  ...
FIN
```

 Pour les utilisateurs de **ST1 version 2** :

Lors d'un phasage (cf. commande PHASAGE p177), **ST1** tient compte des déformations dues au retrait et au fluage. Ces déformations sont calculées en fonction de  $r_h$ ,  $h$  et du type de ciment. Dans le cas du retrait la valeur finale de retrait peut être imposée (mot clé ER).

**EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON C40 SANS FLUAGE ET DONT LE RETRAIT FINAL EST DE 2.10-4**

```
MAT 1 'béton C40'
  E EC2 MPA FCK 40
  RETRAIT EC2 ER 2e-4
  ...
FIN
```

**EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON C25 SANS FLUAGE AVEC RETRAIT DEFINI PAR VALEURS**

```
MAT 1 'béton C25'
  E EC2 TM2 FCK 25
  RETRAIT EC2
  RM_EC 250 RH 70 CIMENT N
  ...
FIN
```

**EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON C35 SUSCEPTIBLE DE FLUER SUIVANT L'EC2 MAIS SANS DEFORMATION DE RETRAIT**

```
MAT 1 'béton C35 sans retrait'
  E EC2 KNM2 FCK 35
  FLUAGE EC2
  RM_EC 250 RH 70
  ...
FIN
```

**EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON C30 DONT LE RETRAIT ET LE FLUAGE SUIVENT L'EC2**

```
MAT 1 'béton C30'
  E EC2 MPA FCK 30
  RETRAIT EC2
  FLUAGE EC2
  RM_EC 250 RH 70 CIMENT N
  ...
FIN
```

**EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON C40 AVEC TRAITEMENT THERMIQUE POUR L'EC2 (PRETENSION)**

```
MAT 1 'béton C40'
  E EC2 MPA FCK 40
  RETRAIT EC2
  FLUAGE EC2
  RM_EC 250 RH 70 CIMENT N
```

T\_THERM FCMP 30 LAMBDA 0.5 DTP 0.5,1,0.5 THETA 30,60,30  
FIN

### 3.3.4 - DEFINITION D'UN BETON BHP SUIVANT L'EUROCODE 2

La définition d'un matériau BHP suivant l'Eurocode 2-2 s'effectue selon la syntaxe suivante :

```

MAT i ('Titre du matériau')
  E <EC2_BHP1, EC2_BHP2> (<MPA, TM2, KNM2>) FCK fck
  (NU nu)
  (RO ro) (G_DYN g) (AMORTISSEMENT am)
  (TEMP temp)
  (RETRAIT <EC2_BHP1, EC2_BHP2> (ER ecs0))
  (FLUAGE <EC2_BHP1, EC2_BHP2> (TRACTION <OUI, NON>) (LINEAIRE<OUI, NON>))
  (RH rh RM_EC h) (CIMENT <S, N, R>)
  (ROS ros)
  (T_THERM FCMP fcmp (LAMBDA lambda) DTP listdt THETA listeta)

```

FIN

avec :

EC2_BHP1	loi BHP EC2-2 Annexe B - sans fumées de silice	(40 MPa ≤ fck ≤ 90 MPa)
EC2_BHP2	loi BHP EC2-2 Annexe B - avec fumées de silice	(40 MPa ≤ fck ≤ 90 MPa)
fck	résistance caractéristique à la compression à 28 jours (en MPa)	
nu	coefficient de Poisson	
ro	poids volumique	
g	accélération de pesanteur (uniquement pour les calculs de masses modales: masse_vol=ro/g)	
am	numero du type d'amortissement dynamique	
temp	coefficient de dilatation thermique	
ecs0	valeur finale du retrait de dessiccation (si cette valeur n'est pas donnée, <b>ST1</b> la calcule à partir des valeurs de rh, h et du type de ciment : S, N, R) le terme de retrait endogène (survenant au cours du durcissement du béton) est toujours calculé par <b>ST1</b> .	
rh	hygrométrie ambiante moyenne en % (en principe EC2-2 Annexe B ≤80%)	
h	diamètre moyen de la pièce exprimé en mm (2Ac/u) (EC2-1 B.2)	
fcmp	résistance moyenne fcmp à la fin du traitement thermique (EC2-1-1 §10.3)	
lambda	coefficient sur les pertes thermiques appliquées au câble pendant la cure (normalement 0,5) (EC2-1-1 §10.5.2) (NB : BPEL lambda=0,1 : 1 revient à supprimer ces pertes)	
listdt	liste des intervalles de temps (en jour) pendant laquelle est appliquée la liste de température teta (EC2-1-1 §10.3)	
listeta	liste des températures maximales (en degrés) pour le traitement thermique (EC2-1-1 §10.3)	

mots clés :

S	classe de résistance CEM 32,5 N (lent)
N	classe de résistance CEM 32,5 R, CEM 42,5 N (normal)
R	classe de résistance CEM 42,5 R, CEM 52,5 N et CEM 52,5 R (rapide, haute résistance)
ros	rapport des armatures adhérentes à la section de béton ( $A_s/B$ )

 La définition du module du matériau à partir de la valeur caractéristique  $f_{ck}$  impose de préciser l'unité choisie pour exprimer le module. Ce module peut être exprimé en :

Méga Pascals (MPa)	mot clé MPA
tonnes par mètre carré ( $t/m^2$ )	mot clé TM2
kilo Newtons par mètre carré ( $kN/m^2$ )	mot clé KNM2

— L'accélération  $g$  est définie automatiquement si l'unité du module du matériau est définie par l'utilisateur. Si l'unité est en TM2, ou KNM2 ou MPA, l'accélération  $g$  vaut 9.81.

 Pour les utilisateurs de **ST1 version 2** :

Lors d'un phasage (cf. commande PHASAGE p177), **ST1** tient compte des déformations dues au retrait et au fluage. Ces déformations sont calculées en fonction de  $r_h$ ,  $h$  et du type de ciment. Dans le cas du retrait la valeur finale de retrait peut être imposée (mot clé ER).

— Le fluage peut être pris en compte soit en compression et en traction, soit en compression seulement avec la commande TRACTION

— Le traitement thermique, s'il est défini, n'est pris en compte uniquement pour les phasages de construction selon les règles décrites en annexe( B3.6 - cas particulier du règlement EN1992-1-1). Pour les charges hors phasage, l'utilisateur doit spécifier directement les pertes supplémentaires dans les commandes de chargement forfaitaire.

$\Sigma$  Le traitement thermique n'est pas explicitement complètement décrit par l'EN1992-2, en particulier sur les adaptations du fluage. L'application proposée est une libre adaptation de l'EC2-1-1, sa pertinence est à laisser à la libre appréciation de l'utilisateur (voir § annexe B3.7 - cas particulier du règlement BHP EN1992-2 - comportement d'un béton BHP EN1992-2)

$\Sigma$  Dans le cas du traitement thermique, s'il est défini, il convient à l'utilisateur de réduire lui-même la valeur de la résistance  $f_{ck}$  (aucun abattement sur la résistance n'est effectué par **ST1**).

— Le fluage non linéaire correspond à l'application du coefficient correcteur de l'article 3.1.4(4) de l'EN1992-1-1, soit  $\exp(1.5(ks-0.45))$  et  $ks = \max(0.45, \sigma/f_{cm}(t_0))$ . Par défaut, ce coefficient n'est pas appliqué. Pour l'appliquer, il faut écrire "LINEAIRE NON".

#### EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON C60 SANS FLUAGE ET DONT LE RETRAIT FINAL EST DE $2.10^{-4}$

```
MAT 1 'béton BHP sans fumee silice C60'
      E EC2_BHP1 MPA FCK 60
      RETRAIT EC2_BHP1 ER 2e-4
FIN
```

#### EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON BHP C80 SANS FUMEE DE SILICE DONT LE RETRAIT ET LE FLUAGE SUIVENT L'EC2

```
rayon moyen de la pièce          250 mm
hygrométrie ambiante moyenne en % 70
ciment normal
MAT 1 'béton C80
      E EC2_BHP1 MPA FCK 80
      RETRAIT EC2_BHP1
      FLUAGE EC2_BHP1
      RM_EC 250 RH 70 CIMENT N ROS 0.05
FIN
```

### 3.3.5 - DEFINITION D'UN BETON SUIVANT LA FIB CM 2010

La définition d'un matériau suivant la FIB 2010 s'effectue selon la syntaxe suivante :

```

MAT i ('Titre du matériau')
  E FIB_2010 (<MPA, TM2, KNM2>) FCK fck
  (NU nu)
  (RO ro) (G_DYN g) (AMORTISSEMENT am)
  (TEMP temp)
  (RETRAIT FIB_2010 (ER ecs0))
  (FLUAGE FIB_2010 (TRACTION <OUI, NON>))
  (RH rh RM_EC h) (CIMENT <S, N, R>)
  (ROS ros)
  (T_THERM FCMP fcmp (LAMBDA lambda) DTP listdt THETA listeta)
FIN

```

avec :

fck	résistance caractéristique à la compression à 28 jours (en MPa)
nu	coefficient de Poisson
ro	poids volumique
g	accélération de pesanteur (uniquement pour les calculs de masses modales: masse_vol=ro/g)
am	numero du type d'amortissement dynamique
temp	coefficient de dilatation thermique
ecs0	valeur finale du retrait de dessiccation (si cette valeur n'est pas donnée, <b>ST1</b> la calcule à partir des valeurs de rh, h et du type de ciment : S, N, R) le terme de retrait endogène (survenant au cours du durcissement du béton) est toujours calculé par <b>ST1</b> .
rh	hygrométrie ambiante moyenne en %
h	diamètre moyen de la pièce exprimé en mm (2Ac/u)
fcmp	résistance moyenne fcmp à la fin du traitement thermique
lambda	coefficient sur les pertes thermiques appliquées au câble pendant la cure (normalement 0,5) (NB : 1 revient à supprimer ces pertes)
listdt	liste des intervalles de temps (en jour) pendant laquelle est appliquée la liste de température teta
listeta	liste des températures maximales (en degrés) pour le traitement thermique
mots clés :	
S	classe de résistance CEM 32,5 N (lent)
N	classe de résistance CEM 32,5 R, CEM 42,5 N (normal)
R	classe de résistance CEM 42,5 R, CEM 52,5 N et CEM 52,5 R (rapide, haute résistance)
ros	rapport des armatures adhérentes à la section de béton ( $A_s/B$ )

 La définition du module du matériau à partir de la valeur caractéristique  $f_{ck}$  impose de préciser l'unité choisie pour exprimer le module. Ce module peut être exprimé en :

Méga Pascals (MPa)	mot clé MPA
tonnes par mètre carré (t/m <sup>2</sup> )	mot clé TM2
kilo Newtons par mètre carré (kN/m <sup>2</sup> )	mot clé KNM2

— L'accélération  $g$  est définie automatiquement si l'unité du module du matériau est définie par l'utilisateur. Si l'unité est en TM2, ou KNM2 ou MPA, l'accélération  $g$  vaut 9.81.

 Pour les utilisateurs de **ST1 version 2** :

Lors d'un phasage (cf. commande PHASAGE p177), **ST1** tient compte des déformations dues au retrait et au fluage. Ces déformations sont calculées en fonction de  $r_h$ ,  $h$  et du type de ciment. Dans le cas du retrait la valeur finale de retrait peut être imposée (mot clé ER).

— Le fluage peut être pris en compte soit en compression et en traction, soit en compression seulement avec la commande TRACTION

— Le traitement thermique, s'il est défini, n'est pris en compte uniquement pour les phasages de construction selon les règles décrites en annexe. Pour les charges hors phasage, l'utilisateur doit spécifier directement les pertes supplémentaires dans les commandes de chargement forfaitaire.

$\Sigma$  Le traitement thermique (en particulier sur les adaptations du fluage) est une libre adaptation de la norme. Il convient de vérifier par l'utilisateur si le comportement adopté est bien celui souhaité.

$\Sigma$  Dans le cas du traitement thermique, s'il est défini, il convient à l'utilisateur de réduire lui-même la valeur de la résistance  $f_{ck}$  (aucun abattement sur la résistance n'est effectué par **ST1**).

#### EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON SANS FLUAGE

```
MAT 1 'béton C35 FIB 2010'
      E FIB_2010 MPA FCK 35
      RETRAIT FIB_2010
FIN
```

#### EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON C45 DONT LE RETRAIT ET LE FLUAGE SUIVENT LA FIB 2010

```
rayon moyen de la pièce          250 mm
hygrométrie ambiante moyenne en % 70
ciment normal
MAT 1 'béton C45
      E FIB_2010 MPA FCK 45
      RETRAIT FIB_2010
      FLUAGE FIB_2010
      RM_EC 250 RH 70 CIMENT N ROS 0.05
FIN
```

### 3.3.6 - DEFINITION D'UN BETON SUIVANT LE MODELE ACI\_B3

La définition d'un matériau suivant le modèle B3 s'effectue selon la syntaxe suivante :

```
MAT i ('Titre du matériau')
  E ACI_B3 (<MPA, TM2, KNM2>) FCK fck
  (NU nu)
  (RO ro) (G_DYN g) (AMORTISSEMENT am)
  (TEMP temp)
  (RETRAIT ACI_B3 (ER ecs0))
  (ROS ros)
  (FLUAGE ACI_B3 (TRACTION <OUI, NON>))
  (RH rh RM_EC h) (CIMENT classe_ciment)
  (K_FORME ks) (K_CURE kc TEMPS_CURE tc)
  (QUANTITE_EAU w QUANTITE_CIMENT c QUANTITE_AGREGAT ag)
FIN
```

avec :

fck	résistance caractéristique à la compression à 28 jours (en MPa)
nu	coefficient de Poisson
ro	poids volumique
g	accélération de pesanteur (uniquement pour les calculs de masses modales: masse_vol=ro/g)
am	numero du type d'amortissement dynamique
temp	coefficient de dilatation thermique
ecs0	valeur finale du retrait de dessiccation (si cette valeur n'est pas donnée, <b>ST1</b> la calcule à partir des valeurs de rh, h et du type de ciment : I, II, III) le terme de retrait endogène (survenant au cours du durcissement du béton) est toujours calculé par <b>ST1</b> .
rh	hygrométrie ambiante moyenne en %
h	diamètre moyen de la pièce exprimé en mm (2Ac/u)

mots clés :

Type ciment	classe de ciment : <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1 pour une utilisation générale (type I)</li> <li>- 2 pour résistance aux sulfates modérée (type II)</li> <li>- 3 pour un ciment à haute résistance initiale (type III)</li> </ul>
ks	facteur de forme du spécimen (par défaut 1.00)
kc	coefficient dépendant du type de cure (par défaut 1.00)
tc	temps de cure en jours ( $\geq 1.00$ jour, par défaut 1.00)
w	quantité d'eau libre dans le béton en $\text{kg/m}^3$ ( $0.35 \leq w/c \leq 0.85$ )
c	quantité de ciment dans le béton en $\text{kg/m}^3$ ( $160 \text{ kg/m}^3 \leq c \leq 720 \text{ kg/m}^3$ )
ag	quantité d'agrégats dans le béton en $\text{kg/m}^3$ ( $2.5 \leq ag/c \leq 13.5$ )
ros	rapport des armatures adhérentes à la section de béton ( $A_s/B$ )

 La définition du module du matériau à partir de la valeur caractéristique  $f_{ck}$  impose de préciser l'unité choisie pour exprimer le module. Ce module peut être exprimé en :

Méga Pascals (MPa)	mot clé MPA
tonnes par mètre carré (t/m <sup>2</sup> )	mot clé TM2
kilo Newtons par mètre carré (kN/m <sup>2</sup> )	mot clé KNM2

— L'accélération  $g$  est définie automatiquement si l'unité du module du matériau est définie par l'utilisateur. Si l'unité est en TM2, ou KNM2 ou MPA, l'accélération  $g$  vaut 9.81.

— Le fluage peut être pris en compte soit en compression et en traction, soit en compression seulement avec la commande TRACTION

#### EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON SANS FLUAGE

rayon moyen de la pièce	250 mm
hygrométrie ambiante moyenne en %	70
ciment de type	1
forme équivalente de la pièce	dalle infinie : $k_s = 1.00$
cure par évaporation	$\alpha_2 = 0.75$
durée de la cure	7 jours
quantité d'eau en kg/m <sup>3</sup>	205 kg/m <sup>3</sup>

```
MAT 1 'béton C35 ACI_B3'
E ACI_B3 MPA FCK 35
RETRAIT ACI_B3
ROS 0.05
RM_EC 250 RH 70 CIMENT 1
K_FORME 1.00
K_CURE 0.75 TEMPS_CURE 7
QUANTITE_EAU 205
FIN
```

#### EXEMPLE : DEFINITION D'UN BETON C45 DONT LE RETRAIT ET LE FLUAGE SUIVENT LA LOI ACI\_B3

rayon moyen de la pièce	250 mm
hygrométrie ambiante moyenne en %	70
ciment de type	1
forme équivalente de la pièce	dalle infinie : $k_s = 1.00$
cure par évaporation	$k_c = 0.75$
durée de la cure (jours)	7 jours
quantité d'eau en kg/m <sup>3</sup>	205 kg/m <sup>3</sup>
quantité de ciment en kg/m <sup>3</sup>	409 kg/m <sup>3</sup>
quantité d'aggrégats en kg/m <sup>3</sup>	1730 kg/m <sup>3</sup>

```
MAT 1 'béton C35 ACI_B3'
E ACI_B3 MPA FCK 35
RETRAIT ACI_B3
FLUAGE ACI_B3
ROS 0.05
RM_EC 250 RH 70 CIMENT 1
K_FORME 1.00
K_CURE 0.75 TEMPS_CURE 7
QUANTITE_EAU 205 QUANTITE_CIMENT 409 QUANTITE_AGREGAT 1730
FIN
```

### 3.3.7 – PARAMETRES AVANCES SUR LES MATERIAUX

Pour des ouvrages existants, il peut être nécessaire d'adapter les lois de comportement réel de l'ouvrage. Pour modifier l'affinité sur le calcul du Module d'Young ou sur les déformations endogènes et de dessiccation du retrait ou du fluage pour les différents matériaux (BPEL, CEB, EC2), des coefficients de pondération ont été introduits (voir l'application dans les annexes pour chaque loi de comportement p339) :

```
MAT i ('Titre du matériau')
  E ... paramètres ...
  RETRAIT ... paramètres ...
  FLUAGE ... paramètres ...
  AVANCE (K_MODULE km)
          (K_RETRAIT_ENDOGENE kre) (K_RETRAIT_DESSICATION krd)
          (K_FLUAGE_ENDOGENE kfe) (K_FLUAGE_DESSICATION kfd)
          (K_FLUAGE_CINETIQUE kfc)
```

FIN

avec :

km	Coefficient appliqué sur le module d'Young
kre	Coefficient appliqué sur la déformation de retrait endogène
krd	Coefficient appliqué sur la déformation de retrait de dessiccation
kfe	Coefficient appliqué sur la déformation de fluage propre
kfd	Coefficient appliqué sur la déformation de fluage de dessiccation
kfc	Coefficient appliqué sur la cinétique de déformation de fluage propre



*Par défaut tous les coefficients valent 1.*

#### EXEMPLE :

```
MAT 1 'BETON MODIFIE'
  E EC2_BHP1 MPA FCK 80
  RETRAIT EC2_BHP1
  FLUAGE EC2_BHP1
  RM_EC 250 RH 70 CIMENT N ROS 0.05
  AVANCE K_MODULE 0.8 K_RETRAIT_ENDOGENE 0.5
  FIN
```

## 4

DESCRIPTION DE LA  
PRECONTRAINT

## 4.1 - DEFINITION D'UN TYPE DE PRECONTRAINT

La définition d'un type de précontrainte permet la description des caractéristiques d'un dispositif de mise en tension et de certains paramètres du câble.

La définition d'un type de précontrainte s'effectue selon la syntaxe :

```
PREC i ('Titre de la précontrainte')
  SECTION Ap
  TENSION sigma
  E Ep ((<RG fprg, FPK fpk> R1000 ro1000)
  (RECU L g) (SEUIL seuil_relax)
  <(PERTE F f PHI phi), (PERTE MU f KPHI kphi)> (PERTE INST pinst),
  (PRETENSION < PARABOL LG_SCEL lg1,
                LINEAIRE LG_SCEL lg1,
                BILINEAIRE LG_SCEL lg1 lg2 COEF alpha>)
FIN
```

avec :

i	numéro du type de précontrainte
Ap	section du câble de précontrainte
sigma	contrainte à la mise en tension (post-tension : au vérin ; prétension : valeur finale sur banc avant relâchement du banc)
Ep	module des aciers de précontrainte
fprg, fpk	limite de rupture garantie des aciers de précontrainte
ro1000	valeur garantie de la perte par relaxation à 1000 h en %
seuil_relax	Date seuil de la relaxation en heure. Par défaut aucun seuil n'est retenu (relaxation illimitée). Si on définit la valeur 0, le seuil 5.10 <sup>5</sup> h (57 ans) est appliqué, sinon la valeur <code>seuil_relax</code> indiquée est appliquée.
g	valeur de la rentrée d'ancrage (post-tension) (par défaut $g=0$ )
f	coefficient de frottement en courbe ( $rd^{-1}$ ) (post-tension) (par défaut $f=0$ )
phi	coefficient de perte de tension par unité de longueur ( $m^{-1}$ ) (post-tension) (par défaut $j=0$ ) Notion BPEL
kphi	coefficient de perte de tension par unité de longueur ( $rd.m^{-1}$ ) aussi nommé déviation angulaire parasite ou coefficient de festonnage (post-tension) (par défaut $j=0$ ) Notion Eurocode (NB: $kphi*f=phi$ )
pinst	Perte uniforme instantanée (prétension)(peignes, ...) (par défaut $pinst=0$ )
lg1	longueur de scellement ou longueur de transmission (prétension) (EC2-1-1 :lpt)
lg2	longueur d'ancrage totale (EC2-1-1 : lbpd) ( $lg2>lg1$ ) (prétension)
alpha	ratio de la contrainte $\sigma_1$ obtenue à la distance $lg_1$ de l'about sur la contrainte seuil $\sigma_2 (>\sigma_1)$ obtenue à la distance $lg_2$ permettant de décrire la forme de la loi bilinéaire du scellement d'ancrage (voir EC2-1-1 8.10.2 : $alpha=spd/sp0$ ) (alpha est compris entre 0 et 1 et est sans dimension) (prétension)

— La valeur  $E_p$  intervient dans le recul d'ancrage ( $g$  non nul), dans les pertes instantanées de déformation et indirectement par les effets de la précontrainte induits par les déformations issues des différents cas de charges appliqués (dont l'effet du retrait fluage).

Les coefficients  $f_{prg}$  ( $f_{pk}$ ) et  $ro1000$  ne sont obligatoires que si l'on veut que **ST1** calcule les pertes par relaxation.

Par défaut, la précontrainte est calculée en post tension. Dans le cas de la prétension, le mot clé — PRETENSION active à lui seul le calcul de la prétension : Lorsque l'on tend un câble affecté de ce dispositif de précontrainte, l'effort final calculé après mise en précontrainte de l'élément (après relâchement du banc) tient compte de la perte par déformation élastique instantanée.

Valeurs de quelques sections unitaires d'unités de précontrainte :

Nature	Ap (mm <sup>2</sup> )
fil 7mm	38.5
fil 8 mm	50.3
T 13	93
T 13 S	100
T 15	139
T15 S	150

#### EXEMPLE : DEFINITION D'UN CABLE 12T13 CLASSE 1860 (UNITE MPA - PAS DE CALCUL DE RELAXATION) POST-TENSION

```
PREC 2 '12T13'
SECTION 1.116e-3          # Ap=12*93e-6
TENSION 1488             # Sigma= 0.8*1860
RECU 0.006               # Recul d'ancrage 6 mm
PERTE F 0.20 PHI 0.003   # Câble traversant de nombreux joints
E 190000                 # Module apparent des torons
FIN
```

#### EXEMPLE : DEFINITION D'UN CABLE DE SECTION 100 MM2 ET DE TENSION EFFICACE 1300 MPA POST-TENSION

```
PREC 3
SECTION 100e-6
TENSION 1300
FIN
```

#### EXEMPLE : DEFINITION D'UN CABLE 19T15 S CLASSE 1770 (UNITE MPA) POST-TENSION

```
PREC 1 '19T15 S'
SECTION 2.851e-3          # Ap=19*150e-6
TENSION 1416             # Sigma= 0.8*1770
RECU 0.008               # Recul d'ancrage 8 mm
PERTE F 0.18 PHI 0.002   # Câble ne traversant pas de joints
E 190000                 # Module apparent des torons
RG 1770 R1000 2.5       # Classe 1770 Armature TBR
FIN
```

#### EXEMPLE : DEFINITION D'UN CABLE DE PRETENSION CAS BPEL

```
PREC 1 'Pretension BPEL'
SECTION 3.0e-3           # Ap=20*150e-6
TENSION 1400            # Sigma= 1400MPa
E 190000               # Module apparent des torons
RG 1770 R1000 2.5     # Classe 1770 Armature TBR
PRETENSION PARABOL LG_SCEL 2
FIN
```

#### EXEMPLE : DEFINITION D'UN CABLE DE PRETENSION CAS EC2

```
PREC 2 'Pretension ELU EC'
SECTION 3.0e-3           # Ap=20*150e-6
TENSION 1400            # Sigma= 1400MPa
E 190000               # Module apparent des torons
RG 1770 R1000 2.5     # Classe 1770 Armature TBR
PRETENSION BILINEAIRE LG_SCEL 2.5 3 COEF 0.8
FIN
```

## 4.2 - DEFINITION D'UN CABLE DE PRECONTRAINTE

La définition de la géométrie d'un câble s'effectue dans le repère global de la structure selon la syntaxe suivante :

```

CABLE i ('Nom du câble')
  PREC j ((NON) SIMUL n)
  TENSION <OR,EX,OR EX,EX OR>
  (BARRE liste)
  (PAS_CABLE pas)
  (LG_GAINE OR lg1 EX lg2)
  TRACE (INTERIEUR,EXTERIEUR)
  ...
  (X) x1 (Y) y1 ((Z) z1) (ALIGNÉ,PENTE pt,GIS gi,RAYON ray)
  ...
FIN

```

avec :

i	numéro du câble
j	numéro de l'unité précontrainte ( <i>cf. commande PREC p90</i> )
n	nombre d'unité tendues (par défaut n=1)
liste	liste des barres servant de support au câble (par défaut toutes les barres)
pas	pas de discrétisation de l'action du câble sur la structure (par défaut pas=0.25)
x, y, z	coordonnées d'un point de passage du câble (repère général)
pt	pente du tracé du câble (radians) (repère général)
gi	angle en plan du tracé du câble (radians) (repère général)
ray	rayon du tracé du câble au passage d'un pôle
lg1, lg2	longueurs de gainage à l'origine et à l'extrémité du câble, utile dans le cas de la prétension

∑ Pour les structures de géométrie complexes (portique, pont à haubans,...), bien que la saisie des barres soit optionnelle, il est fortement recommandé de spécifier la liste de barres servant de support aux câbles pour être sûr de bien affecter les câbles étudiés aux bonnes barres. En effet l'affectation des poussées des tronçons de câbles s'effectue aux éléments les plus proches et donc pas forcément aux barres souhaitées. Par ailleurs, il est vivement déconseillé d'appliquer la précontrainte sur des barres définies par des excentrement ou discontinues entre elles; il faut spécifier directement les coordonnées des noeuds des barres à leur position réelle (en général le centre d'inertie), car l'affectation peut être ambiguë pour st1 et donc mal représenté localement.

— Un câble défini dans **ST1**, peut représenter plusieurs câbles élémentaires de même géométrie (exemple de câbles d'un pont dalle modélisé en 2D). Ces câbles élémentaires peuvent être tendus simultanément ou non (cf. mots clés `SIMUL` et `NON SIMUL` p92).

— Un câble de post-tension peut être tendu à l'aide d'un ou de deux ancrages actifs. Le mode de tension est décrit par les mots clés suivants :

tension d'un câble comportant un seul ancrage actif

- mise en tension côté origine `TENSION OR`
- mise en tension côté extrémité `TENSION EX`

tension d'un câble comportant deux ancrages actifs

- relâchement côté origine puis côté extrémité `TENSION OR EX`
- relâchement côté extrémité puis côté origine `TENSION EX OR`

**NB :** Dans le cas d'un câble tendu par ses deux extrémités, l'ordre de mise en tension n'a d'influence que si le câble est "court", c'est à dire s'il y a recouvrement des tronçons détendus par recul d'ancrage.

— Un câble de prétension ne nécessite de spécifier le mode de mise en tension à l'aide d'ancrages actifs.

— Un câble modélisé dans **ST1** sollicite la barre la plus proche choisie dans la liste des barres support (mot clé `BARRE`). La définition des barres support doit être utilisée chaque fois qu'il peut y avoir ambiguïté sur le choix de la barre qui doit recevoir l'effet du câble (ex : pont modélisé avec ses piles - la liste des barres support ne doit contenir que les barres du tablier).

En général, la liste des barres doit comporter uniquement les barres qui peuvent recevoir l'effet du câble (par exemple, ne pas inclure des barres verticales reposant sur des appuis).

— Un câble de post-tension peut être intérieur (mots clés `TRACE INTERIEUR`) ou extérieur (mots clés `TRACE EXTERIEUR`) au béton. Pour **ST1**, un câble extérieur n'est pas lié à la structure sur les tronçons rectilignes.

— Un câble de prétension doit être intérieur (mots clés `TRACE INTERIEUR`) au béton.

— Le tracé d'un câble est décrit par les coordonnées de ses points de passage, ou par la définition de points de contrôles appelés "pôles".

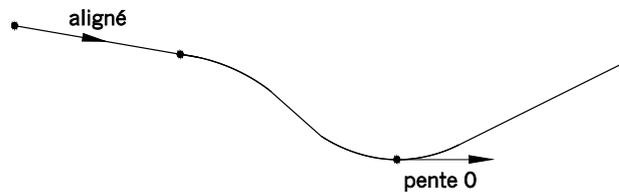
### 4.2.1 - DEFINITION PAR POINTS DE PASSAGE

Un point de passage est défini par ses coordonnées dans le repère global de la structure. Sa description peut être complétée par la définition d'une tangente ou l'imposition d'un alignement droit avec le point suivant :

la tangente en un point est définie par l'angle du câble avec le plan horizontal (mot clé PENTE) et/ou de l'angle du tracé en plan du câble par rapport à l'axe OX global (mot clé GIS)

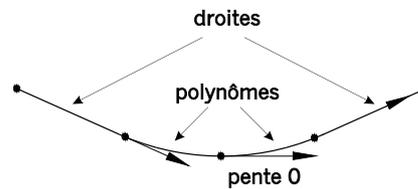
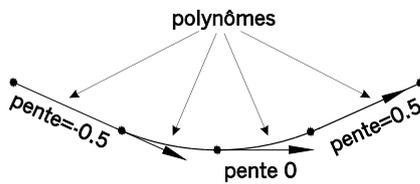
un alignement droit entre deux points peut être imposé par le mot clé ALIGNÉ

<pre>CABLE 1 ... TRACE X 1 Y 3 ALIGNÉ X 3 Y 2.5 X 5 Y 1 PENTE 0 X 9 Y 3 FIN</pre>	ou	<pre>CABLE 1 ... TRACE 1 3 ALIGNÉ 3 2.5 5 1 PENTE 0 9 3 FIN</pre>
---	----	---



### AUTRE EXEMPLE

<pre>CABLE 1 ... TRACE X 0 Z 0 X 1 Z -0.5 PENTE -0.5 X 20 Z -4 PENTE 0 X 39 Z -0.5 PENTE 0.5 X 40 Z 0 FIN</pre>	est pratiquement équivalent à :	<pre>CABLE 1 ... TRACE X 0 Z 0 ALIGNÉ X 1 Z -0.5 X 20 Z -4 PENTE 0 X 39 Z -0.5 ALIGNÉ X 40 Z 0 FIN</pre>
---	---------------------------------	--

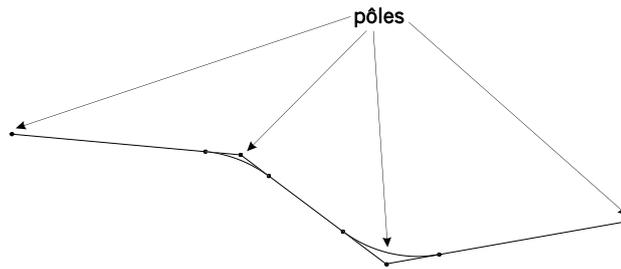


### 4.2.2 - DEFINITION PAR POLES

Les câbles extérieurs s'appuient généralement sur le tracé d'une ligne brisée dont les points anguleux correspondent aux déviateurs et entretoises. Le tracé réel du câble est alors construit en imposant des raccords circulaires au niveau des points anguleux.

Un tel câble est décrit dans **ST1** par la définition des points de passage de la ligne brisée et des rayons de raccordement en ces points.

<pre> CABLE 1 ... TRACE X 1 Y 3 X 3 Y 2.5 RAYON 2 X 5 Y 1 RAYON 2 X 9 Y 3 FIN </pre>	ou	<pre> CABLE 1 ... TRACE 1 3 3 2.5 RAYON 2 5 1 RAYON 2 9 3 FIN </pre>
--	----	--



## 5

# ACTIVATION SÉLECTIVE (HORS PHASAGE)

## 5.1 - ACTIVATION DES BARRES ET DES APPUIS

Par défaut, toutes les barres et tous les appuis définis sont activés.

Une activation sélective des barres et des appuis peut être demandée. Mais dans ce cas, seuls les éléments effectivement activés par la commande `ACTIVER` seront pris en compte.

Les syntaxes sont les suivantes :

activation de tout ce qui a été défini

`ACTIVER TOUT`

activation partielle

`ACTIVER (BARRE liste) (APPUI liste)`

Les éléments activés s'ajoutent aux éléments déjà activés.

### EXEMPLE

L'instruction :

`ACTIVER BARRE 1 a 5 APPUI 2,10`

signifie que les barres 1, 2, 3, 4, 5 et les appuis 2, 10 seront ajoutés aux barres et aux appuis activés.

— *Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot `TOUT`. L'instruction agira sur toutes les barres et tous les appuis déjà définis.*

$\Sigma$  *L'utilisation des mots clés `ACTIVER` ou `DESACTIVER` supprime toute activation par défaut.*

$\Sigma$  *Si aucune activation explicite (par `ACTIVER`) n'a été effectuée, l'emploi de la commande `DESACTIVER` aboutit toujours à désactiver `TOUT` puisqu'il n'y a plus d'activation par défaut.*

## 5.2 - DESACTIVATION DES BARRES ET DES APPUIS

Une désactivation sélective des barres et des appuis peut se faire suivant les syntaxes :

### DESACTIVATION DE TOUT CE QUI A ETE DEFINI

DESACTIVER TOUT

### DESACTIVATION PARTIELLE

DESACTIVER (BARRE liste) (APPUI liste)

### EXEMPLE

L'instruction :

DESACTIVER BARRE 1 a 5 APPUI 2,10

signifie que les barres 1, 2, 3, 4, 5 et les appuis 2, 10 seront enlevés de la liste des barres et des appuis activés.

— *Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur toutes les barres et tous les appuis déjà définis.*

$\Sigma$  *L'utilisation des mots clés ACTIVER ou DESACTIVER supprime toute activation par défaut.*

$\Sigma$  *Si aucune activation explicite (par ACTIVER) n'a été effectuées, l'emploi de la commande DESACTIVER aboutit toujours à désactiver TOUT puisqu'il n'y a plus d'activation par défaut.*

## 6

**DOMAINE D'ETUDE****6.1 - SECTIONS D'ETUDES**

Par défaut, toutes les barres contiennent une section d'étude des efforts à chaque extrémité.

Des sections d'étude peuvent être définies en une abscisse quelconque d'une barre suivant les syntaxes :

**ADDITION DE SECTIONS D'ETUDE AUX SECTIONS DEFINIES PAR DEFAUT**

```
ETUDE (EFFORT) (DEPLA)
liste1 SE liste2 (PAS lpas) (ABS,REL)
```

...

**ADDITION DE SECTIONS D'ETUDE AUX SECTIONS DEJA DEFINIES**

```
ETUDE SUP (EFFORT) (DEPLA)
liste1 SE liste2 (PAS lpas) (ABS,REL)
```

...

**DEFINITION DES SECTIONS D'ETUDE SANS PRISE EN COMPTE DES SECTIONS PAR DEFAUT ET DES SECTIONS DEFINIES PRECEDEMMENT**

```
ETUDE SEUL (EFFORT) (DEPLA)
liste1 SE liste2 (PAS lpas) (ABS,REL)
```

...

avec :

liste1	liste des numéros de barre
liste2	liste des abscisses d'étude
lpas	pas du découpage constant le long des barres des points d'étude (relatif ou absolu)

$\sum$  *En pas relatif, la valeur de lpas doit être une valeur fractionnelle entière.  
Les valeurs 1/2, 1/5, 1/10 sont correctes tandis que 1/3, 1/7 sont incorrectes.*

$\sum$  *Pour les phasages avec fluage ou precontrainte, il convient de définir obligatoirement des sections d'études des déplacements avec un pas suffisamment fin.*

Le mot clé `EFFORT` signifie que les efforts R.D.M. et éventuellement les contraintes seront étudiées.

Le mot clé `DEPLA` signifie que les déplacements et les pressions (pour les poutres sur sol élastique) seront étudiées.

Le mot clé `REL` signifie que l'abscisse est donnée relativement à la longueur de la barre.

Le mot clé `ABS` signifie que l'abscisse est donnée en longueur réelle (par défaut l'abscisse est relative à la longueur de la barre).

#### EXEMPLE

L'instruction :

```
ETUDE EFFORT DEPLA
1 a 2 SE 0. a 1. pas .1
3 a 7 SE 0. a 1. PAS .1
ETUDE SUP DEPLA
9 SE .5 ABS
ETUDE SUP EFFORT
5 SE .25 REL
```

signifie que l'on étudie :

les efforts aux extrémités de toutes les barres, les efforts et les déformées des barres 1 à 7 tous les 1/10 de barre

la déformée de la barre 9 à l'abscisse 0.5 absolue

les efforts de la barre 5 à l'abscisse 0.25 relative

*Dans les instructions ci-dessus, la liste `liste1` peut être remplacée par le mot `TOUT`.*

— *L'instruction agira sur toutes les barres déjà définies.*

## 6.2 - DEFINITION D'UNE CONTRAINTE GENERALISEE

L'étude des contraintes normales ou tangentés en un point quelconque (effet résal, etc.) peut généralement se ramener à l'étude d'une combinaison linéaire des efforts R.D.M. Une telle combinaison est appelée contrainte généralisée.

Les coefficients pondérateurs d'une contrainte généralisée sont définis selon la syntaxe suivante :

```
CONTRG i ('Titre de la contrainte généralisée')
...
(CTE)
liste (N cfn) (TY cfty) ... (MZ cfmz) (CST cst)
...
VAR LIN
liste OR (N cfn) (TY cfty) ... (MZ cfmz) (CST cst)
      EX (N cfn) (TY cfty) ... (MZ cfmz) (CST cst)
...
VAR PARA
liste OR (N cfn) (TY cfty) ... (MZ cfmz) (CST cst)
      MI (N cfn) (TY cfty) ... (MZ cfmz) (CST cst)
      EX (N cfn) (TY cfty) ... (MZ cfmz) (CST cst)
...
FIN
```

avec :

i	numéro de la contrainte généralisée
CTE, VAR LIN, VAR PARA	mots clés indiquant le type de variation des coefficients le long de chaque barre (par défaut les coefficients sont constants)
liste	liste des barres dont les efforts R.D.M. seront pondérés par les coefficients qui suivent
cfn	coefficient pondérateur de l'effort normal
cfty	coefficient pondérateur de l'effort tranchant $t_y$
cftz	coefficient pondérateur de l'effort tranchant $t_z$
cfmx	coefficient pondérateur du moment de torsion
cfmy	coefficient pondérateur du moment fléchissant $m_y$
cfmz	coefficient pondérateur du moment fléchissant $m_z$
cst	constante applicable uniquement pour les charges, non-applicable aux surcharges

Les coefficients pondérateurs utilisables sont :

Option PLANE      cfn, cfty, cfz, cst  
 Option GRILL      cfm, cftz, cfy, cst  
 Option SPATIALE   cfn, cfty, cftz, cfm, cfy, cfz, cst

**EXEMPLE : UTILISATION DE COEFFICIENTS CONSTANTS LE LONG DE CHAQUE BARRE**

```
CONTRG 10 'étude de la contrainte au point 1'
  1 a 2 N 0.25 MZ 0.33
  4 a 5 N 0.22 MZ 0.21 CST 0.5
FIN
```

L'instruction ci-dessus permet l'étude des quantités :

$0.25*n+0.33*mz$                     pour les barres 1 et 2  
 $0.25*n+0.21*mz$                     pour les barres 4 et 5 pour les surcharges  
 $0.25*n+0.21*mz+0.5$                 pour les barres 4 et 5 pour les charges

**EXEMPLE : UTILISATION DE COEFFICIENTS VARIANT LINEAIREMENT LE LONG DE BARRES**

```
CONTRG 11 'étude d'une contrainte tangente'
  1 a 2 TZ 0.11 MX 0.44
  VAR LIN
  4 a 5 OR TZ 0.11 MX 0.44
  EX TZ 0.15 MX 0.55
  CTE
  6 a 7 TZ 0.15 MX 0.55
FIN
```

L'instruction ci-dessus permet l'étude des quantités :

$0.11*tz+0.44*mx$                     pour les barres 1 et 2  
 $c1*tz+c2*mx$                         pour les barres 4 et 5  
 $0.15*tz+0.55*mx$                     pour les barres 6 et 7

Les coefficients  $c1$  et  $c2$  sont définis en fonction de la position de chaque section d'étude (*cf. commande ETUDE p98*) par une fonction linéaire :

Pour une section d'étude située à une abscisse fractionnaire  $xx$  ( $xx=x_e/x_l$  varie de 0 à 1), les coefficients pondérateurs sont donnés par les formules :

$$c1 = 0.11 + (0.15 - 0.11) * xx$$

$$c2 = 0.44 + (0.55 - 0.44) * xx$$

**EXEMPLE : UTILISATION DE COEFFICIENTS INTERPOLES PAR UNE PARABOLE LE LONG DE BARRES**

```

CONTRG 12 'contrainte tangente avec effet resal'
  1 a 2 N 0.10 TZ 0.11 MY 0.44
    VAR PARA
  4 a 5 OR N 0.10 TZ 0.11 MY 0.44
    MI N 0.16 TZ 0.12 MY 0.50
    EX N 0.25 TZ 0.15 MY 0.55
    CTE
  6 a 7 N 0.25 TZ 0.15 MY 0.55
FIN

```

L'instruction ci-dessus permet l'étude des quantités :

$0.10*n+0.11*tz+0.44*my$  pour les barres 1 et 2  
 $c1*n+c2*tz+c3*my$  pour les barres 4 et 5  
 $0.25*n+0.15*tz+0.55*my$  pour les barres 6 et 7

Les coefficients  $c1$ ,  $c2$  et  $c3$  sont définis en fonction de la position de chaque section d'étude (cf. commande *ETUDE* p98) par une interpolation parabolique :

Pour une section d'étude située à une abscisse fractionnaire  $xx$  ( $xx=x_e/x_l$  varie de 0 à 1), les coefficients pondérateurs sont donnés par les formules :

$$cf = a*xx*xx+b*xx+c$$

avec :

$$\begin{aligned}
 a &= 2*(c_{for}-2*c_{fmi}+c_{fex}) \\
 b &= -3*c_{for}+4*c_{fmi}-c_{fex} \\
 c &= c_{fex}
 \end{aligned}$$

— Les contraintes généralisées sont intégrées aux résultats de chaque section d'étude au moment de l'exécution des chargements et des surcharges (cf. commandes *EXEC CHARG* p123 et *EXEC SURCH* p176).

— Les contraintes généralisées peuvent ne pas être définies sur toutes les barres et pour tous les chargements. Dans le cas où elles sont définies, elles sont utilisées dans les combinaisons et les enveloppes (cf. commandes *COMB* p232 et *ENV* p181) au même titre que les autres résultats de la section.

## 7

**CHARGEMENTS FIXES****7.1 - DEFINITION DES CHARGEMENTS FIXES**

La définition d'un chargement fixe a pour syntaxe :

```

CHARG (i) ('Titre du chargement')
  POIDS PROPRE liste
  POIDS PROPRE <X,Y,Z> (POS,NEG) liste
  NOEUD liste (FX fx) (FY fy) ... (MZ mz)
  BARRE
    liste CON XL x1 (REL,ABS) (FX fx) (FY fy) ... (MZ mz) (GLO,LOC)
    liste UNI (FX fx) (FY fy) ... (MZ mz) (GLO,LOC)
    liste LIN XL x11 x12 (REL,ABS)
      (FX fx1 fx2) (FY fy1 fy2) ... (MZ mz1 mz2) (GLO,LOC)
  APPUI liste (DX dx) (DY dy) ... (RZ rz)
  TEMP
    liste UNI dt
    liste (GY dty) (GZ dtz)
  DEFOR
    liste CON XL x1 (REL,ABS) (DX dx) (DY dy) ... (RZ rz) (GLO,LOC)
    liste UNI (DX dx) (DY dy) ... (RZ rz) (GLO,LOC)
    liste LIN XL x11 x12 (REL,ABS)
      (DX dx1 dx2) (DY dy1 dy2) ... (RZ rz1 rz2) (GLO,LOC)
  CABLE
    liste (TENSION)
      (PERTE (INST) (RETRAIT er) (UNI dsig) (RELAX (cf)))
FIN

```

avec :

i                    numéro du chargement (par défaut i=1)

— *Les commandes spécifiques à la définition des chargements fixes sont détaillées dans la suite du chapitre.*

Les chargements fixes comprennent :

- le poids propre des barres
- les charges sur les nœuds
- les charges concentrées sur les barres
- les charges réparties sur les barres
- les déplacements d'appuis rigides
- les dilatations thermiques
- le gradient thermique
- les déformations concentrées sur les barres
- les déformations réparties sur les barres

**EXEMPLE**

```
CHARG 100 'charges permanentes'  
...  
POIDS PROPRE 1 a 10  
...  
BARRE  
1 a 5 CON XL .5 FX 10  
...  
CABLE  
1 a 10 TENSION PERTE INST  
...  
FIN  
EXEC CHARG 100
```

## 7.2 - POIDS PROPRE DES BARRES

Le poids propre des barres est défini selon les syntaxes suivantes :

poids propre suivant la direction par défaut :

POIDS PROPRE liste

poids propre suivant un axe défini :

POIDS PROPRE <X,Y,Z> (POS,NEG) liste

avec :

liste           numéros des barres

La direction du poids propre par défaut est :

Option PLANE       axe Y négatif  
 Option GRILL       pas de poids propre  
 Option SPATIALE   axe Z négatif

Les axes utilisables sont :

Option PLANE       x, y  
 Option GRILL       pas de poids propre  
 Option SPATIALE   x, y, z

### EXEMPLE

L'instruction :

POIDS PROPRE 1 a 4,10

signifie que le poids propre des barres 1, 2, 3, 4, 10 sera pris suivant la direction par défaut.

— *L'instruction POIDS PROPRE ne peut être utilisée avec l'OPTION GRILL car la section droite des poutres n'est jamais définie.*

— *L'instruction POIDS PROPRE ne peut être utilisée que dans la description d'un chargement, c'est à dire entre les mots clés CHARG et FIN.*

— *Le poids propre d'une barre est généré sur toute la longueur de la barre en multipliant le poids volumique par la section de la barre.*

— *Les excentremets éventuels des barres ne sont pas pris en compte pour générer le poids propre.*

— *Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur toutes les barres activées au moment de l'exécution du chargement.*

### 7.3 - CHARGES AUX NŒUDS

Les charges sur les nœuds sont définies dans le repère général de la structure selon les syntaxes suivantes :

#### INSTRUCTION SIMPLE

NOEUD liste (FX fx) (FY fy) ... (MZ mz)

#### INSTRUCTION DE BLOC

NOEUD  
liste (FX fx) (FY fy) ... (MZ mz)  
...

avec :

liste	liste des numéros de nœuds
fx, fy, fz	force suivant les axes OX, OY, OZ
mx, my, mz	couple autour des axes OX, OY, OZ

Les charges utilisables sont :

Option PLANE	fx, fy, mz
Option GRILL	mx, fz, my
Option SPATIALE	fx, fy, fz, mx, my, mz

#### EXEMPLE

L'instruction :

NOEUD 1 a 3 FX 12

signifie que les nœuds 1, 2, 3 sont sollicités par une force égale à 12 suivant l'axe OX du repère général.

— *L'instruction chargement de nœuds ne peut être utilisée que dans la description d'un chargement, c'est à dire entre les mots clés CHARG et FIN.*

— *Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur tous les nœuds activés au moment de l'exécution du chargement.*

## 7.4 - CHARGES CONCENTREES SUR LES BARRES

Les charges concentrées sur les barres sont définies selon la syntaxe suivante :

BARRE

liste CON XL xl (REL,ABS) (FX fx) (FY fy) ... (MZ mz) (GLO,LOC)

...

avec :

liste	liste des numéros de barre
xl	abscisse du chargement sur la barre
fx, fy, fz	force suivant les axes OX, OY, OZ
mx, my, mz	couple autour des axes OX, OY, OZ

Le mot clé REL signifie que l'abscisse est donnée relativement à la longueur de la barre et par rapport au repère de la barre.

Le mot clé ABS signifie que l'abscisse est donnée en longueur réelle (par défaut l'abscisse est en longueur réelle).

Le mot clé GLO signifie que les charges sont données dans le repère global de la structure.

Le mot clé LOC signifie que les charges sont données dans le repère local de la barre (par défaut les charges sont données dans le repère global de la structure).

Les charges utilisables sont :

Option PLANE	fx, fy, mz
Option GRILL	mx, fz, my
Option SPATIALE	fx, fy, fz, mx, my, mz

### EXEMPLE

L'instruction :

```
BARRE 1 a 3 CON XL .5 REL FX 12 FY 15
```

signifie que les barres 1, 2, 3 sont sollicitées en leur milieu par une force égale à 12 suivant l'axe OX et égale à 15 suivant l'axe OY du repère général.

L'instruction :

```
BARRE 1 a 3 CON XL 1.2 ABS FX 7 LOC
```

signifie que les barres 1, 2, 3 sont sollicitées à l'abscisse 1.2 par rapport au nœud origine de la barre par une force égale à 7 suivant l'axe OX du repère local de chaque barre.

— La définition d'une charge concentrée ne peut être utilisée que dans la description d'un chargement, c'est-à-dire entre les mots clés *CHARG* et *FIN*.

— Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot *TOUT*. L'instruction agira sur toutes les barres activées au moment de l'exécution du chargement.

— Les abscisses de chargement d'une barre doivent toujours être comprises entre le début et la fin de la barre. Une abscisse relative (*REL*) doit être comprise entre 0 (chargement au début de la barre) et 1 (chargement à l'extrémité de la barre). Une abscisse absolue (*ABS*) est exprimée en coordonnées réelles, comptées depuis le nœud origine de la barre. Elle doit donc être comprise entre 0 (chargement au début de barre) et la longueur de la barre (chargement à l'extrémité de la barre). Par défaut les abscisses sont absolues.

## 7.5 - CHARGES UNIFORMEMENT REPARTIES SUR LES BARRES

Les charges réparties sont définies selon la syntaxe suivante :

BARRE

liste UNI (FX fx) (FY fy) ... (MZ mz) (GLO, LOC, PRO)

...

avec :

liste	liste des numéros de barre
fx, fy, fz	force suivant les axes OX, OY, OZ
mx, my, mz	couple autour des axes OX, OY, OZ

Le mot clé GLO signifie que les charges sont données dans le repère global de la structure.

Le mot clé LOC signifie que les charges sont données dans le repère local de la barre (par défaut les charges sont données dans le repère global de la structure).

Le mot clé PRO signifie que seules les projections des charges définies dans le repère global sont appliquées. (voir exemple)

Les charges utilisables sont :

Option PLANE	fx, fy, mz
Option GRILL	mx, fz, my
Option SPATIALE	fx, fy, fz, mx, my, mz

### EXEMPLE

L'instruction :

```
BARRE 1 a 3 UNI FX 12
```

signifie que les barres 1, 2, 3 sont sollicitées par une force répartie de valeur 12 suivant l'axe OX du repère global de la structure.

— *La définition d'une charge répartie ne peut être utilisée que dans la description d'un chargement, c'est à dire entre les mots clés CHARG et FIN.*

— *Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur toutes les barres activées au moment de l'exécution du chargement.*

— *Les abscisses de chargement d'une barre doivent toujours être comprises entre le début et la fin de la barre. Une abscisse relative (REL) doit être comprise entre 0 (chargement au début de la barre) et 1 (chargement à l'extrémité de la barre). Une abscisse absolue (ABS) est exprimée en coordonnées réelles, comptées depuis le nœud origine de la barre. Elle doit donc être comprise entre 0 (chargement au début de barre) et la longueur de la barre (chargement à l'extrémité de la barre). Par défaut les abscisses sont absolues.*

- Pour une barre inclinée dans le repère global (dont l'axe local  $X$  n'est pas parallèle aux axes globaux), la commande **PRO** permet d'obtenir la projection parallèle à la direction de la charge d'une charge sur la barre.

Contrairement à une charge globale ou locale, où la valeur de la charge appliquée est toujours égale à la densité intégrée sur la longueur de l'élément définie par l'utilisateur quelque soit l'inclinaison de la barre, avec la commande **PRO**, la résultante de la charge est égale au produit de la densité par la longueur projetée de la barre sur un plan orthogonal à la direction de la charge (voir exemple suivant). Cette commande est utile pour la prise en compte des actions des terres pour le calcul des buses ou des voutes par exemple.

#### EXEMPLE COMMANDE PRO EN OPTION PLANE

On définit une barre inclinée

```
aalpha=45 #angle en degre
NOEUD 100 x 0.    y 0.
NOEUD 200 x 10*cos(aalpha*pi/2/90)  y 10.*sin(aalpha*pi/2/90)
BARRE 100 100 200
...
```

On définit la charge projetée :

```
CHARG 1 'Charge unite PRO'
      barre 100  LIN xl 0. 1. rel fy -1 -1 PRO
FIN
```

est équivalent à

```
CHARG 2 'effort unité normal barre GLO - equivalent charg PRO 1'
      barre 100  LIN xl 0. 1. rel fy -1*cos(aalpha*pi/2/90) -1*cos(aalpha*pi/2/90) GLO
FIN
```

De même

```
CHARG 6 'Charge unite horizontal PRO'
      barre 100  LIN xl 0. 1. rel fx 1 1 PRO
FIN
```

est équivalent à

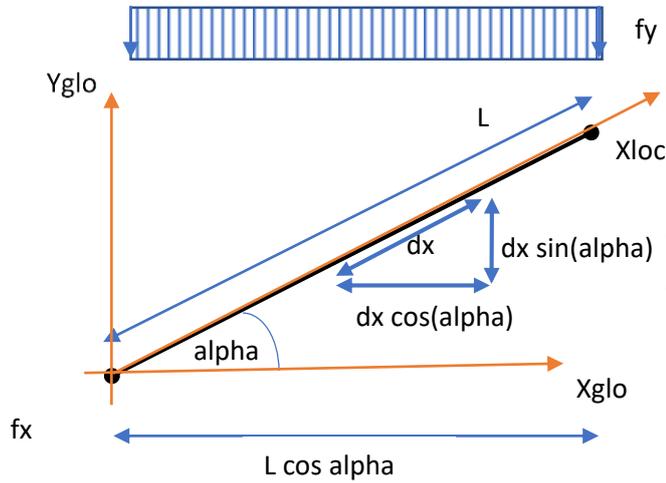
```
CHARG 7 'effort unité horizontal tgt barre GLO-equivalent PRO'
      barre 100  LIN xl 0. 1. rel fx +1*sin(aalpha*pi/2/90) +1*sin(aalpha*pi/2/90) GLO
FIN
```

Charge globale en OPTION PLANE :

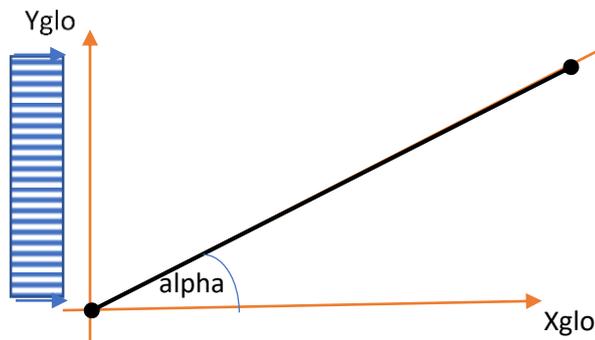
Si  $dQ_{GLO} = f_y \cdot dx$      $Q_{GLO} = f_y \cdot L$   
 Si  $\alpha = 0$ ,             $Q = f_y \cdot L$   
 Si  $\alpha = \pi/2$ ,         $Q = f_y \cdot L$

Si  $dQ_{GLO} = f_x \cdot dx$      $Q_{GLO} = f_x \cdot L$   
 Si  $\alpha = 0$ ,             $Q = f_x \cdot L$   
 Si  $\alpha = \pi/2$ ,         $Q = f_x \cdot L$

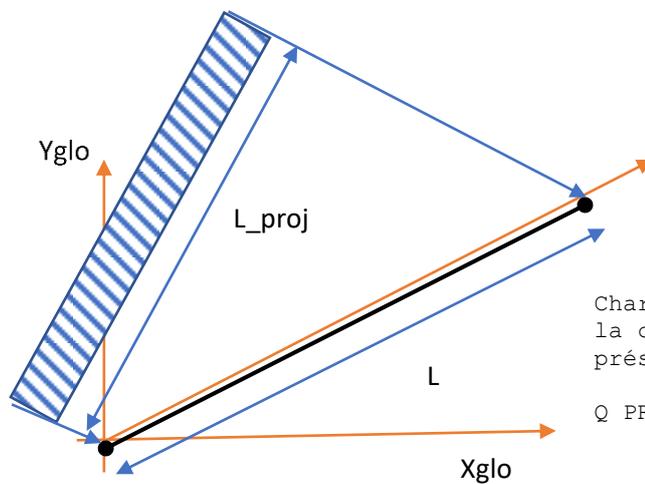
Charge projetée en OPTION PLANE :



Charge projetée selon  $f_y$   
 $dQ_{PRO} = f_y \cdot dx \cdot \cos(\alpha)$   
 $Q_{PRO} = f_y \cdot L \cdot \cos(\alpha)$   
 Si  $\alpha = 0$ ,             $Q_{PRO} = f_y \cdot L$   
 Si  $\alpha = \pi/2$ ,         $Q_{PRO} = 0$



Charge projetée selon  $f_x$   
 $dQ_{PRO} = f_x \cdot dx \cdot \sin(\alpha)$   
 $Q_{PRO} = f_x \cdot L \cdot \sin(\alpha)$   
 Si  $\alpha = 0$ ,             $Q_{PRO} = 0$   
 Si  $\alpha = \pi/2$ ,         $Q_{PRO} = f_x \cdot L$



Charge projetée selon la direction de la charge quand deux composantes sont présentes  
 $Q_{PRO} = L_{proj} \cdot (f_x \cdot e_x + f_y \cdot e_y + f_z \cdot e_z)$

## 7.6 - CHARGES VARIANT LINEAIREMENT SUR LES BARRES

Les charges sont supposées varier linéairement d'une valeur  $v_1$  (située à une abscisse  $x_{11}$ ) à une valeur  $v_2$  (située à une abscisse  $x_{12}$ ).

Les charges sont définies selon la syntaxe suivante :

BARRE

```
liste LIN XL x11 x12 (REL,ABS)
      (FX fx1 fx2) (FY fy1 fy2) ... (MZ mz1 mz2) (GLO,LOC,PRO)
```

...

avec :

liste	liste des numéros de barre
$x_{11}, x_{12}$	abscisses de début et de fin du chargement sur la barre
$fx_1, fx_2$	valeurs extrêmes de la force répartie suivant l'axe OX
$fy_1, fy_2$	valeurs extrêmes de la force répartie suivant l'axe OY
$fz_1, fz_2$	valeurs extrêmes de la force répartie suivant l'axe OZ
$mx_1, mx_2$	valeurs extrêmes du couple réparti autour de l'axe OX
$my_1, my_2$	valeurs extrêmes du couple réparti autour de l'axe OY
$mz_1, mz_2$	valeurs extrêmes du couple réparti autour de l'axe OZ

Le mot clé REL signifie que les abscisses sont données relativement à la longueur de la barre.

Le mot clé ABS signifie que les abscisses sont données en longueur réelle (par défaut les abscisses sont en longueur réelle).

Le mot clé GLO signifie que les charges sont données dans le repère global de la structure.

Le mot clé LOC signifie que les charges sont données dans le repère local de la barre (par défaut les charges sont données dans le repère global de la structure).

Le mot clé PRO signifie que seules les projections des charges définies dans le repère global sont appliquées dans le repère local de la barre. (voir exemple charge BARRE UNI pour plus de détails)

Les charges utilisables sont :

Option PLANE	$fx_1, fx_2, fy_1, fy_2, mz_1, mz_2$
Option GRILL	$mx_1, mx_2, fz_1, fz_2, my_1, my_2$
Option SPATIALE	$fx_1, fx_2, fy_1, fy_2, fz_1, fz_2, mx_1, mx_2, my_1, my_2, mz_1, mz_2$

### EXEMPLE

L'instruction :

```
BARRE 1 a 3 LIN XL .2 .7 FX 12 15
```

signifie que les barres 1, 2, 3 sont sollicitées entre les abscisses 0.2 et 0.7 par une force répartie qui varie linéairement de la valeur 12 à la valeur 15.

— *La définition d'une charge linéairement répartie ne peut être utilisée que dans la description d'un chargement, c'est à dire entre les mots clés CHARG et FIN.*

— *Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur toutes les barres activées au moment de l'exécution du chargement.*

— *Les abscisses de chargement d'une barre doivent toujours être comprises entre le début et la fin de la barre. Une abscisse relative (REL) doit être comprise entre 0 (chargement au début de la barre) et 1 (chargement à l'extrémité de la barre). Une abscisse absolue (ABS) est exprimée en coordonnées réelles, comptées depuis le nœud origine de la barre. Elle doit donc être comprise*

*entre 0 (chargement au début de barre) et la longueur de la barre (chargement à l'extrémité de la barre). Par défaut les abscisses sont absolues.*

## 7.7 - DEPLACEMENT DES APPUIS RIGIDES

Le déplacement des appuis rigides est défini dans le repère global de la structure selon les syntaxes suivantes :

### INSTRUCTION SIMPLE

APPUI liste (DX dx) (DY dy) (DZ dz) (RX rx) (RY ry) (RZ rz)

### INSTRUCTION DE BLOC

APPUI  
liste (DX dx) (DY dy) (DZ dz) (RX rx) (RY ry) (RZ rz)  
...

avec :

liste      liste des numéros des nœuds appuyés rigidement

Les déplacements d'appui utilisables sont :

Option PLANE      dx, dy, rz  
Option GRILL      rx, dz, ry  
Option SPATIALE   dx, dy, dz, rx, ry, rz

### EXEMPLE

L'instruction :

APPUI 1 a 3 DX .1 RZ 2.3

signifie que les appuis 1, 2, 3 sont déplacés de 0.1 suivant l'axe OX du repère général et subissent une rotation de 2.3 autour de l'axe OZ du repère général.

— *Les rotations sont exprimées en radians.*

— *La définition d'un déplacement d'appui rigide ne peut être utilisée que dans la description d'un chargement, c'est à dire entre les mots clés CHARG et FIN.*

— *Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur toutes les barres activées au moment de l'exécution du chargement.*

## 7.8 - DILATATIONS THERMIQUES

Les dilatations thermiques des barres sont définies selon les syntaxes suivantes :

### INSTRUCTION SIMPLE

```
TEMP liste UNI dt
```

### INSTRUCTION DE BLOC

```
TEMP  
liste UNI dt
```

...

avec :

liste	liste des numéros de barre
dt	écart de température

### EXEMPLE

L'instruction :

```
TEMP 1 a 3 UNI 20.
```

signifie que les barres 1, 2, 3 subissent une dilatation thermique provoquée par un écart de température de 20 degrés.

— *La définition d'une dilatation thermique ne peut être utilisée que dans la description d'un chargement, c'est à dire entre les mots clés CHARG et FIN.*

— *La prise en compte d'un effet thermique ne peut avoir lieu que si le coefficient de dilatation a été défini (cf. commande CONS p72).*

— *Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur toutes les barres activées au moment de l'exécution du chargement.*

## 7.9 - GRADIENT THERMIQUE

L' effet d'un gradient thermique sur les barres est défini selon les syntaxes suivantes :

### INSTRUCTION SIMPLE

TEMP liste (GY dty) (GZ dtz)

### INSTRUCTION DE BLOC

TEMP  
liste (GY dty) (GZ dtz)

...

avec :

liste	liste des numéros de barre
dty	écart de température entre les fibres supérieure et inférieure de l'axe $o_y$ du repère local des barres
dtz	écart de température entre les fibres supérieure et inférieure de l'axe $o_z$ du repère local des barres

— *Un écart de température est positif si la température de la fibre supérieure est plus élevée que celle de la fibre inférieure.*

Les écarts de température utilisables sont :

Option PLANE	dty
Option GRILL	dtz
Option SPATIALE	dty, dtz

### EXEMPLE

L'instruction :

TEMP 1 a 3 GY 15.

signifie que les barres 1, 2, 3 ont un écart de température entre leurs fibres supérieure et inférieure (suivant les axes locaux des barres) de 15 degrés.

— *La définition d'un gradient thermique ne peut être utilisée que dans la description d'un chargement, c'est à dire entre les mots clés CHARG et FIN.*

— *La prise en compte d'un gradient thermique ne peut avoir lieu que si le coefficient de dilatation (cf. commande CONS p72) et les fibres supérieure et inférieure (cf. commande CARA p59) ont été définis.*

— *Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur toutes les barres activées au moment de l'exécution du chargement.*

## 7.10 - DEFORMATIONS CONCENTREES SUR LES BARRES

Les déformations concentrées sur les barres sont définies selon la syntaxe suivante :

```
DEFOR
liste CON XL xl (REL,ABS) (DX dx) (DY dy) ... (RZ rz) (GLO,LOC)
...
```

avec :

liste	liste des numéros de barre
xl	abscisse de la déformation sur la barre
dx, dy, dz	déformation suivant les axes OX, OY, OZ
rx, ry, rz	rotation autour des axes OX, OY, OZ

Le mot clé REL signifie que l'abscisse est donnée relativement à la longueur de la barre.

Le mot clé ABS signifie que l'abscisse est donnée en longueur réelle (par défaut l'abscisse est en longueur réelle).

Le mot clé GLO signifie que les déformations sont données dans le repère global de la structure.

Le mot clé LOC signifie que les déformations sont données dans le repère local de la barre (par défaut les déformations sont données dans le repère local de la barre).

Les déformations utilisables sont :

Option PLANE	dx, dy, rz
Option GRILL	rx, dz, ry
Option SPATIALE	dx, dy, dz, rx, ry, rz

### EXEMPLE

L'instruction :

```
DEFOR 1 a 3 CON XL .5 REL DX 12 DY 15
```

signifie que les barres 1, 2, 3 sont sollicitées en leur milieu par une déformation égale à 12 suivant l'axe  $ox$  et égale à 15 suivant l'axe  $oy$  du repère local de chaque barre.

L'instruction :

```
DEFOR 1 a 3 CON XL 1.2 ABS DX 7 GLO
```

signifie que les barres 1, 2, 3 sont sollicitées à l'abscisse 1.2 par rapport au nœud origine de la barre par une déformation égale à 7 suivant l'axe  $OX$  du repère global de la structure.

— *La définition d'une déformation concentrée ne peut être utilisée que dans la description d'un chargement, c'est à dire entre les mots clés CHARG et FIN.*

— *Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur toutes les barres activées au moment de l'exécution du chargement.*

— *L'application de déformations unitaires permet de calculer les lignes d'influence.*

— *Les déformations sont toujours relatives.*

## 7.11 - DEFORMATIONS UNIFORMEMENT REPARTIES SUR LES BARRES

Les déformations réparties sont définies selon la syntaxe suivante :

```
DEFOR
liste UNI (DX dx) (DY dy) ... (RZ rz) (GLO,LOC)
...
```

avec :

liste	liste des numéros de barre
dx, dy, dz	déformation répartie suivant les axes OX, OY, OZ
rx, ry, rz	rotation répartie autour des axes OX, OY, OZ

Le mot clé GLO signifie que les déformations sont données dans le repère global de la structure.

Le mot clé LOC signifie que les déformations sont données dans le repère local de la barre (par défaut les déformations sont données dans le repère local des barres).

Les déformations utilisables sont :

Option PLANE	dx, dy, rz
Option GRILL	rx, dz, ry
Option SPATIALE	dx, dy, dz, rx, ry, rz

### EXEMPLE

L'instruction :

```
DEFOR 1 a 3 UNI DX 12
```

signifie que les barres 1, 2, 3 sont uniformément déformées d'une valeur de 12 suivant l'axe  $Ox$  du repère local de chaque barre.

— *La définition d'une déformation répartie ne peut être utilisée que dans la description d'un chargement, c'est à dire entre les mots clés CHARG et FIN.*

— *Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur toutes les barres activées au moment de l'exécution du chargement.*

— *Les déformations sont toujours relatives.*

## 7.12 - DEFORMATIONS VARIANT LINEAIREMENT SUR LES BARRES

Les déformations sont supposées varier linéairement d'une valeur  $v_1$  (située à une abscisse  $x_{11}$ ) à une valeur  $v_2$  (située à une abscisse  $x_{12}$ ).

DEFOR

```
liste LIN XL x11 x12 (REL,ABS)
      (DX dx1 dx2) (DY dy1 dy2) ... (RZ rz1 rz2) (GLO,LOC)
```

...

avec :

liste	liste des numéros de barre
$x_{11}, x_{12}$	abscisses de début et de fin de la déformation sur la barre
$dx_1, dx_2$	valeurs extrêmes de la déformation répartie suivant l'axe OX
$dy_1, dy_2$	valeurs extrêmes de la déformation répartie suivant l'axe OY
$dz_1, dz_2$	valeurs extrêmes de la déformation répartie suivant l'axe OZ
$rx_1, rx_2$	valeurs extrêmes de la rotation répartie autour de l'axe OX
$ry_1, ry_2$	valeurs extrêmes de la rotation répartie autour de l'axe OY
$rz_1, rz_2$	valeurs extrêmes de la rotation répartie autour de l'axe OZ

Le mot clé REL signifie que les abscisses sont données relativement à la longueur de la barre.

Le mot clé ABS signifie que les abscisses sont données en longueur réelle (par défaut les abscisses sont en longueur réelle).

Le mot clé GLO signifie que les déformations sont données dans le repère global de la structure.

Le mot clé LOC signifie que les déformations sont données dans le repère local de la barre (par défaut les déformations sont données dans le repère local de chaque barre).

Les déformations utilisables sont :

Option PLANE	$dx_1, dx_2, dy_1, dy_2, rz_1, rz_2$
Option GRILL	$rx_1, rx_2, dz_1, dz_2, ry_1, ry_2$
Option SPATIALE	$dx_1, dx_2, dy_1, dy_2, dz_1, dz_2, rx_1, rx_2, ry_1, ry_2, rz_1, rz_2$

### EXEMPLE

L'instruction :

```
DEFOR 1 a 3 LIN XL .2 .7 DX 12 15
```

signifie que les barres 1, 2, 3 sont sollicitées entre les abscisses 0.2 et 0.7 par une déformation répartie qui varie linéairement de la valeur 12 à la valeur 15.

— *La définition d'une déformation linéairement répartie ne peut être utilisée que dans la description d'un chargement, c'est à dire entre les mots clés CHARG et FIN.*

— *Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur toutes les barres activées au moment de l'exécution du chargement.*

— *Les déformations sont toujours relatives.*

## 7.13 - ACTION D'UN CÂBLE DE PRECONTRAINTE

L'action d'un câble de précontrainte est définie selon la syntaxe suivante :

```
CABLE
liste (TENSION) (PERTE (INST) (RETRAIT er) (UNI dsig) RELAX (cf))
...
```

avec :

liste	liste des numéros de câble	
er	valeur du retrait pour le calcul des pertes	
dsig	perte uniforme de tension (sert à tenir compte du fluage, dsig>0 pour une perte de tension)	cf. - 2
cf	coefficient pondérateur des pertes dues à la relaxation	cf. - 2

L'action d'un câble est décomposée en deux effets :

l'effet de la tension du câble sans perte	(mot clé TENSION)
l'effet des pertes instantanées et différées	(mot clé PERTE)

L'effet des pertes est décomposé de la manière suivante :

pertes instantanées (frottement et recul d'ancrage)	(mot clé INST)
pertes différées dues au retrait	(mot clé RETRAIT er)
pertes différées dues au fluage	(mot clé UNI dsig)
pertes différées dues à la relaxation	(mot clé RELAX (cf))

Chaque effet peut être pris de manière indépendante ou cumulé :

### EXEMPLE : EFFET DES CABLES 1 ET 2 SANS PERTES INSTANTANÉES OU DIFFÉREES

```
CABLE 1,2 TENSION
```

### EXEMPLE : EFFET DU CÂBLE 1 EN TENANT COMPTE DES PERTES INSTANTANÉES

```
CABLE 1 TENSION PERTE INST
```

### EXEMPLE : EFFET DES PERTES INSTANTANÉES DU CÂBLE 3

```
CABLE 3 PERTE INST
```

### EXEMPLE : EFFET DES CABLES 1 A 10 AVEC PERTES INSTANTANÉES ET DIFFÉREES

```
CABLE 1 a 10 TENSION PERTE INST RETRAIT 2e-4 UNI 120 RELAX 5/6
```

### EXEMPLE : EFFET DES PERTES DIFFÉREES DES CABLES 1 A 100

```
CABLE 1 a 100 PERTE RETRAIT 2e-4 UNI 125 RELAX 5/6
```

**EXEMPLE : PRISE EN COMPTE DE L'ACTION D'UN CÂBLE 12T13 CLASSE 1860**

```

### DEFINITION DU TYPE DE PRECONTRAINTE ###
PREC 1 '12T13'
SECTION 1.116e-3          # Ap=12*93e-6
TENSION 1488              # Sigma= 0.8*1860
RECU 0.006                # recul d'ancrage 6 mm
PERTE F 0.20 PHI 0.003   # câble traversant de nombreux joints
EP 190000                 # module apparent des torons
RG 1860 R1000 2.5        # classe 1860 Armature TBR
FIN
### DEFINITION DES CARACTERISTIQUES DU CÂBLE ###
CABLE 1
PREC 1                    # référence au type de précontrainte défini ci-dessus
TENSION OR EX            # mise en tension par 2 ancrages actifs
BARRE 1 a 10             # liste des barres support du câble
TRACE
1 3                      # coordonnées d'un point de passage
3 2.5
5 1 PENTE 0
9 3
FIN
### DEFINITION D'UN CHARGEMENT CONTENANT L'EFFET DU CÂBLE ###
CHARG 1 'effet du câble 1'
CABLE 1 TENSION PERTE INST
FIN
### DEFINITION D'UN CHARGEMENT AVEC L'EFFET DES PERTES DIFFEREES DU CÂBLE ###
CHARG 2 'pertes différées du câble 1'
CABLE 1 PERTE RETRAIT 2e-4 UNI 110 RELAX 5/6
FIN

```

- 1 *La prise en compte d'une armature de précontrainte suppose que l'on a préalablement défini un type de précontrainte (cf. commande [PREC p90](#)) et un câble de précontrainte (cf. commande [CABLE p92](#)).*
- La définition de l'action d'un câble ne peut être utilisée que dans la description d'un chargement, c'est à dire entre les mots clés `CHARG` et `FIN`.*
- Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot `TOUT`. L'instruction agira sur tous les câbles définis au moment de l'exécution du chargement.*
- Les pertes différées calculées à l'intérieur d'un chargement ne sont prises en compte que de manière simplifiée. Pour tenir compte des effets différés de manière plus exacte il faut faire appel à un phasage (cf. commande [PHASAGE p177](#) uniquement pour les utilisateurs de **ST1 version 2**).*
- 2 *Des détails sur les calculs effectués sont donnés en [Annexe B p332](#).*

### 7.13.1 - PERTES DUES AU FLUAGE

La perte de tension due au fluage peut être évaluée par l'utilisateur au moyen de la formule du BPEL (§3.3,22) :

$$dsig = 2.5\sigma_b \frac{E_p}{E_{ij}}$$

avec :

$\sigma_b$	contrainte moyenne finale dans le béton (généralement 6 à 8 MPa)
$E_p$	module apparent des torons (190000 MPa)
$E_{ij}$	module du béton lors de la mise en tension

Le tableau ci-dessous donne les pertes de tension dues au fluage pour des bétons courants mis en charge à des âges différents :

Age béton	B25	B30	B35	B40
3 jours	$20\sigma_b$	$19\sigma_b$	$18\sigma_b$	$17\sigma_b$
4 jours	$19\sigma_b$	$18\sigma_b$	$17\sigma_b$	$16\sigma_b$
7 jours	$17\sigma_b$	$16\sigma_b$	$15\sigma_b$	$14\sigma_b$
10 jours	$16\sigma_b$	$15\sigma_b$	$14\sigma_b$	$14\sigma_b$
28 jours	$15\sigma_b$	$14\sigma_b$	$13\sigma_b$	$13\sigma_b$

#### EXEMPLE

Soit un béton B35 mis en tension à l'âge de 3 jours et dont la contrainte moyenne finale est de 8 MPa :

$$Dsig = 18\sigma_b + 18 \times 8 = 140 \text{ MPa}$$

```
### DEFINITION DU FLUAGE ###
TENSION UNI 140
```

### 7.13.2 - PERTES DUES A LA RELAXATION DES ACIERS

Dans le cas d'une prise en compte simultanée des pertes dues au retrait, au fluage et à la relaxation, il faut (voir BPEL §3.3,24) pondérer les pertes dues à la relaxation par le coefficient 5/6. Ce coefficient correspond au coefficient  $c_f$  de l'instruction RELAX  $c_f$  (cf. p120).

## 7.14 – CHARGEMENTS COMBINES

La commande CHARG existante a été complétée, par la possibilité d'appliquer directement une combinaison de charge. Cette commande est utile pour les calculs non linéaires au feu ou sol plastique.

La commande s'effectue selon la syntaxe suivante :

```
CHARG i COMB ('Titre')
      CHARG liste coef
...
FIN
```

avec :

liste      Numéro de charge  
coef      Coefficient de pondération du chargement (1 par défaut)

- *Il faut distinguer la « charge combinée » définie ici de la « combinaison de charge » définie avec la commande COMB. En effet la charge combinée est formée de plusieurs charges de définition et on calcule l'effet de toutes ces charges combinées ensemble (commande EXEC CHARG sur une seule charge combinée), alors que dans une combinaison de charge, on calcule l'effet charge par charge (commande EXEC CHARG appliquée sur chaque charge de la combinaison), puis on combine les effets des différentes charges avec la commande COMB.*

$\Sigma$  *Attention, l'effet sur les cables de précontrainte ne peut pas être pondéré.*

## 7.15 - EXECUTION DES CHARGEMENTS

Les chargements précédemment définis sont exécutés par la commande suivante :

```
EXEC CHARG (liste)
```

avec :

liste      liste de numéros de chargement précédemment définis (par défaut tous les chargements définis (cf. commande CHARG p103) seront exécutés)

- *La commande EXEC CHARG stocke les résultats en base de données.*

- *Dans l'instruction ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur tous les chargements définis (ceci est alors équivalent à ne pas mettre de liste).*

## 7.16 - EXECUTION DES CHARGEMENTS AVEC POUTRES SUR RESSORT PLASTIQUE

Les chargements précédemment définis et qui comporte dans le modèle des poutres sur sols plastiques sont exécutés par la commande suivante :

```
EXEC CHARG PSE (liste)
```

avec :

liste      liste de numéros de chargement précédemment définis (par défaut tous les chargements définis (cf. commande CHARG p103) seront exécutés)

- *La commande EXEC CHARG PSE stocke les résultats en base de données.*

- *Dans l'instruction ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur tous les chargements définis (ceci est alors équivalent à ne pas mettre de liste).*

- *Pour la création de la charge, il peut être très pratique d'utiliser une charge réalisée avec la commande `CHARG COMB` au lieu d'une simple charge, du fait de la non linéarité du calcul.*

## 8

**CHARGES D'EXPLOITATION****8.1 - DEFINITION DES CHARGES D'EXPLOITATION ROUTIERES****8.1.1 - PRESENTATION**

Les charges d'exploitation de **ST1** font référence soit aux charges réglementaires françaises définies dans le Fascicule 61 Titre II du C.P.C. (Cahier des Prescriptions Communes applicable aux marchés de travaux publics relevant des services de l'Equipement) et à la circulaire sur les transports exceptionnels R/EG 3 du 20 juillet 1983, soit aux charges de l'Eurocode EN 1991-2.

**ST1** distingue trois types de charges d'exploitation :

- les charges réparties entre zéros de ligne d'influence (Al, ..., Trottoir)
- les charges roulantes (Bc, Bt, ..., Mc120, Excep, ...)
- les charges Eurocodes (LM1, LM2, LM3, LM4)

$\sum$  Les charges prédéfinies du règlement français (Bc, Al, ...) sont exprimées en tonnes. Pour obtenir des résultats en kilo-Newtons (kN), il faut pondérer les charges par un facteur de 9.81 (cf. option POND de la commande SURCH p138, p144 et p168).

$\sum$  Les charges prédéfinies de l'Eurocode (LM1, LM2, ...) sont exprimées en kilo-Newton (cf. p165).

$\sum$  Les convois exceptionnels du règlement français sont exprimés en tonnes s'ils sont exprimés seuls. Ils sont exprimés en kilo-Newton s'ils sont utilisés avec le LM3 de l'Eurocode.

Pour chaque section d'étude (cf. commande *ETUDE* p98), et pour chaque effet (effort, déplacement, contrainte, ...), **ST1** détermine la ligne d'influence correspondante, et positionne les charges d'exploitation de manière à obtenir les extrêmes de l'effet étudié.

Les charges d'exploitation peuvent être positionnées longitudinalement et transversalement en fonction de l'implantation des chaussées et des trottoirs sur la structure étudiée.

La définition du profil en travers (cf. commande *TABLIER p128*) permet la prise en compte automatique des largeurs de voies et des coefficients de pondération transversaux ainsi que de l'effet de l'excentrement des voies pour les structures GRILL ou SPATIALE (ex : chargements *en damier* de A(l) pour l'étude de la torsion).

L'étude des charges d'exploitation nécessite dans **ST1** :

la définition d'un tablier (cf. commande *TABLIER p128*)

la définition d'une surcharge (cf. commande *SURCH p138, p144 et p168*)

l'exécution de l'étude (cf. commande *EXEC SURCH p176*)

**EXEMPLE : ETUDE DE L'EFFET DE LA CHARGE A(L) (FASC. 61 TITRE II) SUR UNE LARGEUR DE 1.00 m CENTREE SUR L'AXE DES BARRES 1 A 10**

```
TABLIER
  BARRE 1 a 10
FIN
SURCH 1 'effet de A(l)'
  AL
FIN
EXEC SURCH 1
```

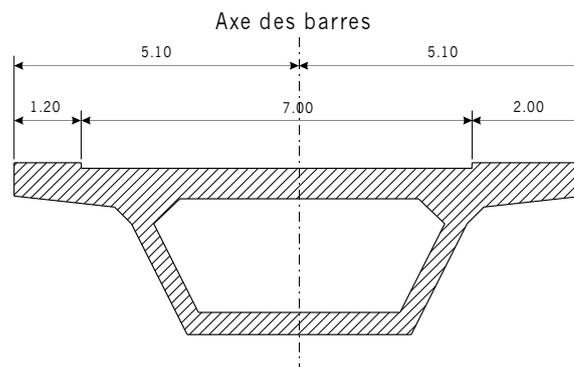
**EXEMPLE : ETUDE DE L'EFFET DES CHARGES BC ET DE TROTTOIR (FASC. 61 TITRE II) SOLLICITANT LES BARRES 7 A 80 POUR UN PONT DE CLASSE 1 (FASC. 61 TITRE II)**

Profil en travers de l'ouvrage :

un trottoir à gauche de largeur 1.20m

une chaussée de largeur 7.00m

un trottoir à droite de largeur 2.00m



```
TABLIER
  CLASSE 1
  BARRE 7 a 80
  ZONE_TRANS
    1 LARG 1.20
    2 LARG 7.00
    3 LARG 2.00
FIN
SURCH 1 'effet de Bc sur la chaussée'
  ZONE 2
  BC
FIN
SURCH 2 'effet de la charge de trottoir'
  ZONE 1,3
TROT
FIN
EXEC SURCH 1,2
```

### 8.1.2 - METHODES UTILISEES

La recherche des extrêmes sous charges d'exploitation dépend du type de surcharge utilisé (cf. commande *SURCH* p138, p144 et p168) de l'option de calcul (cf. commande *OPTION* p43) et de la définition du tablier (cf. commande *TABLIER* p128).

Deux types d'étude peuvent être utilisés :

- une étude longitudinale seule
- une étude longitudinale et transversale

#### CHARGES DE TYPE : CONVOI DE CAMIONS (BC, MC, ...)

##### ETUDE LONGITUDINALE

Le positionnement longitudinal des convois est déterminé par l'étude des lignes d'influence. Il consiste à calculer la ligne d'influence d'un camion du convoi, et à positionner autant de camions qu'il est nécessaire pour obtenir l'extrême de l'effet recherché.

##### ETUDE TRANSVERSALE

L'étude transversale s'effectue en deux étapes (dans le cas du Fascicule 61 Titre II) :

- étude indépendante de chaque file chargeable et cumul de l'effet de chaque file avec pondération de dégressivité transversale réglementaire
- calcul de la ligne d'influence de  $n$  camions de front en prenant en compte la pondération de dégressivité transversale réglementaire et ensuite exploitation de cette ligne d'influence

— *La deuxième étape n'est généralement nécessaire que pour l'étude de la torsion.*

#### CHARGES REPARTIES ENTRE ZEROS DE LIGNE D'INFLUENCE (A(L), TROTTOIR, ...)

##### ETUDE LONGITUDINALE

Les zones chargées sont déterminées par l'étude des zéros des lignes d'influence. Les zones positives ou négatives sont chargées de manière à obtenir l'extrême de l'effet recherché.

##### ETUDE TRANSVERSALE

L'effet dû à plusieurs voies transversales est obtenu par cumul de l'effet de chaque voie étudiée indépendamment pondéré par les coefficients de dégressivité transversaux réglementaires.

## 8.2 - DEFINITION DU TABLIER

Le lieu de positionnement des charges d'exploitation sur la structure est défini par la déclaration du tablier selon la syntaxe suivante :

```
TABLIER
  (CLASSE (TRAFIC) iclass)
  (ZONE_TRANS izezone LARG larg (VOIE nvoie))
  (PAS_LIGNE pasl)
  (LDIF ldif)
  BARRE listeb
  (REP_TRANS
    KBARRE listekb KTRANS listek
    ...
  )
FIN
```

avec :

iclass	si commande TRAFIC absente : classe de l'ouvrage Fascicule 61 Titre II Article 3 (par défaut iclass=1) si commande TRAFIC présente : classe de l'ouvrage Eurocode (par défaut iclass=2)
izezone	numéro de la zone transversale
larg	largeur de la zone transversale
nvoie	nombre de voies affectées à la zone transversale (voir Fasc. 61 Titre II Article 2) (par défaut : si 0.00<=larg< 5.00 nvoie=1 si 5.00<=larg<=6.00 nvoie=2 sinon nvoie=larg/3)
pasl	distance minimum entre deux points calculés de la ligne d'influence (par défaut pasl=0.50m)
listeb	liste des barres servant de support aux charges d'exploitation (la liste des barres doit représenter un ensemble de barres géométriquement continu)
ldif	largeur de diffusion autour des impacts de roues, la diffusion s'effectue dans les directions longitudinale et transversale, la dimension finale de l'impact diffusé est donc la dimension de l'impact auquel s'ajoute deux fois la largeur de diffusion ldif (par défaut ldif=0). On limite la diffusion à la largeur totale des zones transversales définies. La diffusion ne s'applique pas aux charges réparties (AL, UDL, ...).
listekb	liste des barres sur lesquelles sont appliqués les coefficients de répartition transversale identiques
listek	liste des coefficients de répartition transversale définie sur le profil en travers

*La classe des ponts route fait référence à l'article 3 du Fasc. 61 Titre II du C.P.C. :*

—	classe 1	7.00 m <=	largeur roulable (ou cas particuliers)
	classe 2	5.50 m <	largeur roulable < 7.00m
	classe 3		largeur roulable <= 5.50m

— *Pour les charges A(l), Bc et Bt du Fasc. 61 Titre II, les pondérations transversales sont définies à partir de la classe de l'ouvrage (mot clé CLASSE).*

— *La définition de la classe n'a aucune influence sur les charges autre que les charges A(l), Bc et Bt du Fasc. 61 Titre II.*

— *Un positionnement longitudinal et transversal des charges d'exploitation n'est possible que si l'implantation des voies (cf. mot clé ZONE\_TRANS p128), et l'affectation des charges sur ces voies (cf. commande SURCH p138, p144 et p168) sont définies. Dans le cas où l'une de ces deux conditions n'est pas réalisée, ST1 se limite à un positionnement longitudinal des charges sans pondération transversale.*

— *Conformément à la philosophie de ST1, une redéfinition du tablier ne réinitialise pas l'ensemble du tablier, mais prend en compte uniquement les modifications apportées.*

*En particulier, si plusieurs zones sont définies dans un premier tablier, et si un deuxième tablier est défini avec un nombre de zones inférieur à celui du premier tablier, les zones non redéfinies sont conservées.*

*Si on souhaite les supprimer, il suffit de mettre des zones longueur nulle. Cela peut s'avérer nécessaire pour les calculs avec répartition transversale ou en OPTION SPATIALE.*

#### **EXEMPLE : DEFINITION DU TABLIER D'UN PONT ROUTE DE CLASSE 1 SANS DEFINITION DU PROFIL EN TRAVERS**

```
TABLIER
  BARRE 1 a 15
FIN
```

Les charges A(l), a(l), ... sont appliquées sur une largeur de 1.00 m sans pondération transversale.

Les charges roulantes Bc, Bt, ... sont appliquées sur une voie sans pondération transversale.

#### **EXEMPLE : DEFINITION DU TABLIER D'UN PONT ROUTE DE CLASSE 1 COMPORTANT UNE LARGEUR CHARGEABLE DE 7.00 M**

```
TABLIER
  CLASSE 1
  ZONE_TRANS
    1_LARG 7.
  BARRE 1 a 10
FIN
```

Les charges d'exploitation sont appliquées en tenant compte du positionnement et des coefficients de pondération transversaux (ex : pour A(l) coefficients a1, a2 et pour Bc et Bt coefficients bc et bt du Fasc. 61 Titre II).

### Profil en travers - zones transversales

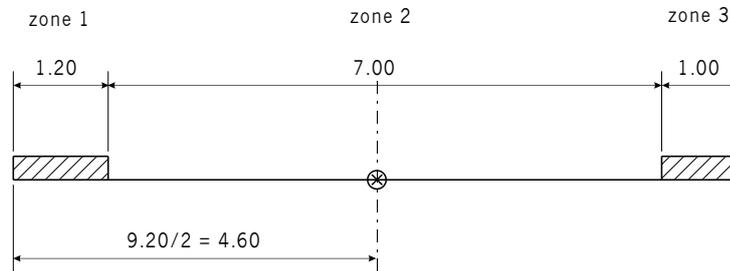
Le profil en travers de la voie portée est décrit dans **ST1** par un découpage transversal du tablier (cf. mot clé `ZONE_TRANS` p128) en zones juxtaposées.

La somme des largeurs des zones définies détermine la largeur du tablier. Celui-ci reste toujours centré sur l'axe des barres qui lui servent de support.

Les zones transversales ainsi définies n'ont pas d'affectation à priori et doivent être chargées par des charges d'exploitation (cf. commande `SURCH` p138, p144 et p168).

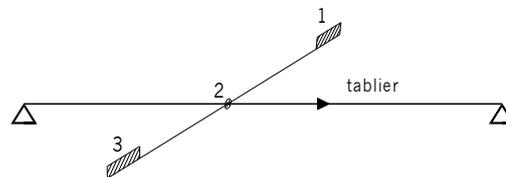
#### EXEMPLE 1

```
TABLIER
CLASSE 1
ZONE_TRANS
1 LARG 1.20
2 LARG 7.00
3 LARG 1.00
FIN
```



Axe des barres

— Les zones sont présentées avec la zone 1 côté gauche et la zone n côté droit dans le sens d'orientation du tablier.

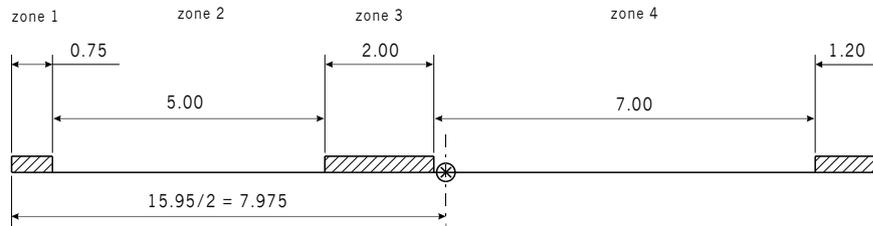


**EXEMPLE 2**

```

TABLIER
CLASSE 1
ZONE_TRANS
1 LARG 0.75
2 LARG 5.00
3 LARG 2.00
4 LARG 7.00
5 LARG 1.20
FIN

```

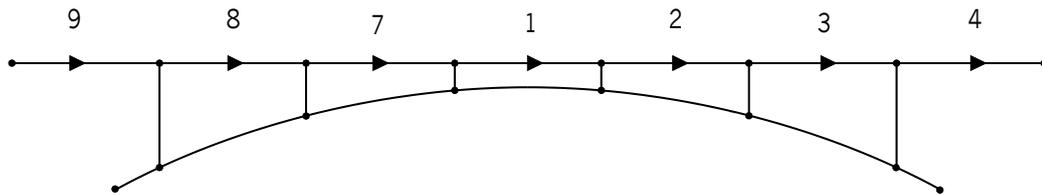


Axe des barres

La liste des barres servant de support aux charges d'exploitation doit représenter une suite de barres géométriquement continue. Ceci revient à dire que si l'on parcourt les barres du tablier en suivant l'ordre défini par la liste, on doit passer d'une barre à l'autre sans effectuer de saut.

**EXEMPLE**

Structure étudiée

**DEFINITIONS CORRECTES :**

```

TABLIER
CLASSE 2
BARRE 9,8,7,1 a 4
FIN

```

```

ou
TABLIER
CLASSE 2
BARRE 4,3,2,1,7,8,9
FIN

```

**DEFINITIONS INCORRECTES :**

```

TABLIER
CLASSE 2
BARRE 1 a 4,7,8,9
FIN

```

```

ou
TABLIER
CLASSE 2
BARRE 4,3,2,1,7,9,8
FIN

```

## Commande de répartition transversale

REP\_TRANS est définie en OPTION PLANE uniquement et permet de prendre en compte une répartition transversale définie par l'utilisateur (par exemple de type Courbon).

Les charges mobiles sont alors placées longitudinalement et transversalement automatiquement selon la composante d'effort étudiée pour tous les points d'études.

REP\_TRANS ne peut être défini sans définir ZONE\_TRANS. Le profil en travers pondéré par REP\_TRANS est défini par l'ensemble des zones décrites par ZONE\_TRANS.

Trois cas peuvent alors se présenter :

si la liste des coefficients ne contient qu'une seule valeur, cette valeur est conservée pour tout le profil en travers, la position transversale de la charge n'a pas d'effet, le coefficient introduit joue le rôle d'un simple coefficient de pondération

si la liste de coefficients comprend 2 valeurs, ces 2 valeurs sont les coefficients du point d'étude pour des charges appliquées sur les bords extrêmes de l'ensemble des zones du profil en travers défini par ZONE\_TRANS

si la liste comprend plus de 2 valeurs, le premier coefficient et le dernier coefficient de la liste `listek` sont appliqués aux bords extrêmes du profil en travers défini par ZONE\_TRANS, les autres coefficients sont ensuite répartis sur le profil en travers à intervalles constants en fonction du nombre de coefficients fournis

— *Les valeurs des coefficients de répartition sont prises égales à 1 pour les barres de la liste principale `listeb` non utilisées dans `listek`.*

**EXEMPLE 1 : OA AVEC DES POUTRES IDENTIQUES - METHODE DE COURBON**

```

OPTION PLANE
...
CARA 1 a 4 SX 1 IZ 1          # caractéristiques d'une poutre d'un ouvrage
                              multi-poutres modélisé

...
vlarg1 = 3                    # largeurs des voies
vlarg2 = 8
vlarg3 = 1
vlargtablier = vlarg1+vlarg2+vlarg3  # largeur totale tablier

# --- formule de Courbon pour 1 poutre pour les bords extrêmes du profil en travers
défini ---

npout = 3                     # nombre de poutres
numpout = 1                   # numéro de la poutre étudiée
lambda = 4                    # entre-axe des poutres
echarg = -vlargtablier/2      # bord extrême gauche du profil défini dans
                              ZONE_TRANS
ct1 = (1-6*(npout+1-2*numpout)/(npout**2-1)*echarg/lambda)/npout

echarg = +vlargtablier/2      # bord extrême droit du profil défini dans
                              ZONE_TRANS
ct2 = (1-6*(npout+1-2*numpout)/(npout**2-1)*echarg/lambda)/npout

TABLIER
  CLASSE TRAFIC 2
  ZONE_TRANS
    1 larg vlarg1
    2 larg vlarg2
    3 larg vlarg3
  BARRE 1 a 4
    REP_TRANS KBARRE 1,2,3,4 KTRANS ct1,ct2
FIN

SURCH 1 'LM1'
  LM1 CARA
  ZONE 2
FIN
...

```

**EXEMPLE 2 : CALCUL DALLE K = F(Y)**

```
OPTION PLANE
...
CARA 1 a 3 SX sectdalle1m IZ inertdalle1m # la section de dalle de 1m de large
                                         est modélisée

...
vlarg1 = 3 # largeurs des voies
vlarg2 = 8
vlarg3 = 1
vlargtablier = vlarg1+vlarg2+vlarg3 # largeur totale du tablier

listcoeff1 = 1.0, 1.2, 1.3, 1.1, 0.8, 0.6
listcoeff2 = 1.2, 1.4, 1.2, 1.0, 0.7, 0.5

TABLIER
  classe trafic 2
  zone_trans
    1 larg vlarg1
    2 larg vlarg2
    3 larg vlarg3
  barre 1 a 3
  REP_TRANS
    KBARRE 1,3 KTRANS listcoeff1
    KBARRE 2 KTRANS listcoeff2
FIN

surch 1 'LM1 cara '
  LM1 cara
  zone 2
  POND 1/vlargtablier # calcul pour un 1m de dalle
FIN
...
```

**Modèle 3D****Ouvrage de type monocaisson :**

La définition d'un seul tablier est bien adaptée au calcul d'un ouvrage de type mono caisson. Le tablier de l'ouvrage est dans ce cas modélisé par une série de barre continue et le tablier est affectée à cette serie de barre. Les charges mobiles vont charger les totalement ou partiellement toutes les zones transversales du tablier, et permettent d'obtenir les effets de flexion et de torsion maximaux et minimaux.

**Ouvrages de type grillage de poutre ou mixtes multipoutres :**

A partir du moment ou plusieurs poutres sont chargées simultanément, il faut décomposer le profil en travers autant de tablier qu'il y a de voies physiques.

Il y a 2 cas :

- soit l'ouvrage présente un grand nombre de poutres structurelles longitudinales (par exemple un pont à poutrelles enrobées), chaque voie physique peut se voir directement affectée une file de poutres longitudinales, celles-ci vont donc servir de support à chaque tablier composé de 1 voie.

- soit l'ouvrage est composé de poutres très espacées entre elles, dans ce cas il n'est pas possible d'affecter une voie physique à une file de poutre existante (ce serait erroné), il faut dans ce cas définir dans le modèle des files de poutres fictives avec faibles caracteristiques mecanique, c'est-à-dire d'inertie et de section, ou bien avec un module tres faible. Cette file de poutre fictive sera centré sur la voie physique et servira de support de charge mobile pour la commande tablier. Les charges sont transmises via les pièces de ponts (et pas les entretoises) ou bien le hourdis du tablier, qui doit être discretisé par des éléments transversaux.

Pour une voie physique, on va définir un tablier avec une zone transversale correspondant à une largeur de voie (3m en général à l'Eucode). Puis on va appliquer les charges mobiles qui s'applique à cette voie.

On retire l'étape précédente pour chaque voie de calcul.

Puis on fait une enveloppe combinée sur l'effet des différentes voies.

On recommence l'opération en pemutant l'ordre des voies, on obtiendra ainsi l'effet des autres positions transversales, puis à la fin on prend l'enveloppe des ces différentes enveloppes combinées pour avoir l'effet global.

**EXEMPLE : MODELE 3D POUR UN OUVRAGE A 2 POUTRES LONGITUDINALES**

```

OPTION SPATIALE
# Cas pont a 2 poutres espaces de 6m avec piece de pont en 3d
# chaussée de 9m
#   NOEUDS

NOEUD  1      0.00      0.000      0
NOEUD  2     10.00      0.000      0
NOEUD  3     20.00      0.000      0
NOEUD 11      0.00      3.000      0
NOEUD 12     10.00      3.000      0
NOEUD 13     20.00      3.000      0
NOEUD 21      0.00      6.000      0
NOEUD 22     10.00      6.000      0
NOEUD 23     20.00      6.000      0

#   BARRES
# poutres reelles : barre 1,2 et 21,22
# poutres fictives : barre 11,12

BARRE 1 DE  1 A  2
BARRE 2 DE  2 A  3

```

```

BARRE 11 DE 11 A 12
BARRE 12 DE 12 A 13
BARRE 21 DE 21 A 22
BARRE 22 DE 22 A 23

```

```

BARRE 101 DE 1 A 11
BARRE 102 DE 11 A 21
BARRE 201 DE 2 A 12
BARRE 202 DE 12 A 22
BARRE 301 DE 3 A 13
BARRE 302 DE 13 A 23

```

```
# APPUIS
```

```

APPUI 1 NOEUD 1 DX DY DZ
APPUI 2 NOEUD 2 DX DZ
APPUI 3 NOEUD 3 DX DZ

```

```

APPUI 21 NOEUD 21 DY DZ
APPUI 22 NOEUD 22 DZ
APPUI 23 NOEUD 23 DZ

```

```
# CARACTERISTIQUES MECANIQUES
```

```

CARA tout SX 1.0 IX 1 IY 1 IZ 1.0
CARA 11,12 SX 0.001 IX 0.001 IY 0.001 IZ 0.001

```

```
# DEFINITION DES POINTS D'ETUDE
```

```

ETUDE EFFORT DEPLA
1,2 SECTION 0.000 A 1.00 PAS 0.50 RELATIF
21,22 SECTION 0.000 A 1.00 PAS 0.50 RELATIF
FIN

```

```
# DEFINITION DES MATERIAUX
```

```
# Beton pour etudes de court terme
```

```

MATERIAU 10 "mat"
E 10000e3
RO 25.00
FIN

```

```
# AFFECTATION DU MATERIAU
```

```
CONSTANTES tout MATERIAU 10
```

```
#
```

```
#
```

```
#
```

```
-----
DEFINITION CHARGEMENTS
```

```

CONVOI 100 "Convoi unite"
MAX_CAM 1
MAX_FILE 1
LARG 1
LONG 3
COEFF TRANS 1
ESSIEU
1 XL 1 POIDS 1 IMPACT 0.5 0.5 y1 0 # impact long trans
2 XL 2 POIDS 1 IMPACT 0.5 0.5 y1 0 # impact long trans
FIN

```

```

# LISTES de BARRES UTILES POUR LA DEFINITION DU TABLIER

Lst1_Travee = 1 a 2
Lst2_Travee = 11 a 12
Lst3_Travee = 21 a 22

# placement TS coté gauche TS1 > TS2 > TS3
# (voie 1 - Lst1_Travee/ voie 2 - Lst2_Travee / voie 3 - Lst3_Travee)
# voie 1 sur Lst1_Travee
TABLIER
  BARRES Lst1_Travee
FIN

SURCH 1 "convoi v1"
  CONV 100
  POND 300.0
FIN
EXEC SURCH 1

# voie 2 sur Lst2_Travee
TABLIER
  BARRES Lst2_Travee
FIN

SURCH 2 "convoi v2"
  CONV 100
  POND 200.0
FIN
EXEC SURCH 2

# voie 3 sur Lst3_Travee
TABLIER
  BARRES Lst3_Travee
FIN

SURCH 3 "convoi v3"
  CONV 100
  POND 100.0
FIN
EXEC SURCH 3

ENV 1 COMB 'v1+v2+v3 coté gauche'
  SURCH 1 1
  SURCH 2 1
  SURCH 3 1
FIN

# on reitere ces calculs (surch) en permutant l'affectation de la voie 1, 2 et 3
# aux listes de barres 1,2 et 3 et on trouve de nouvelles enveloppes combinées :
# TABLIER (voie 1 - Lst3_Travee/ voie 2 - Lst2_Travee / voie 3 - Lst1_Travee)
# ENV 2 COMB 'v1+v2+v3 coté droit'
...
# TABLIER (voie 3 - Lst1_Travee/ voie 1 - Lst2_Travee / voie 3 - Lst1_Travee)
# ENV 3 COMB 'v3+v1+v2'
...
# TABLIER (voie 2 - Lst1_Travee/ voie 1 - Lst2_Travee / voie 3 - Lst3_Travee)
# ENV 4 COMB 'v2+v1+v3'
...
# Puis on effectue l'enveloppe globale
ENV 100 'effet global'
  ENV 1
  ENV 2
  ENV 3
  ENV 4
FIN

```

### 8.3 - DEFINITION DES CHARGES : TYPE CHARGES REPARTIES

$\Sigma$  Rappel : Les charges du Règlement Français sont exprimées en tonnes.

L'étude de l'effet des charges d'exploitation du type *charge répartie entre zéros de ligne d'influence*, est définie selon la syntaxe suivante :

```
SURCH i ('Titre de la surcharge')
  ( < EFFORT <N, TY, TZ, MX, MY, MZ>,
    DEPLA <DX, DY, DZ, RX, RY, RZ>,
    CONTR <VY, VZ, WY, WZ, VYVZ, VYWZ, WYVZ, WYWZ> >
    CONTRG j
    PRESS <PX, PY, PZ, MX> )
  (REAC <FX, FY, FZ, MX, MY, MZ>)
  < AL, AL FREIN, AL PLANCHER, AL PLANCHER FREIN,
    TROT, AL PIETON,
    ALG j >
  (ZONE liste)
  (POND pond)
  (SEUIL seuil)
FIN
```

avec :

i	numéro de la surcharge
j	numéro de la contrainte généralisée
liste	liste des zones transversales chargées (cf. commande <i>TABLIER p128</i> )
pond	coefficient de pondération de la surcharge (par défaut pond=1)
seuil	seuil de prise en compte des zones positives ou négatives soit une ligne d'influence $y_1, \dots, y_n$ et $y_{\max} = \text{MAX}(\text{ABS}(y_1), \dots, \text{ABS}(y_n))$ un point d'ordonnée $y_i$ appartient à : une zone positive si $y_i > y_{\max} * \text{seuil}$ une zone négative si $y_i < -y_{\max} * \text{seuil}$ (par défaut $\text{seuil} = 0.01$ : valeur conseillée dans le cas général)

Les commandes EFFORT, DEPLA, CONTR, CONTRG j, PRESS ou REAC permettent de définir une composante privilégiée. L'étude de la surcharge consiste à chercher les deux extrêmes de cette composante et les valeurs concomitantes des autres composantes.

Par défaut il n'y a pas de concomitance, c'est à dire que l'étude de la surcharge consiste à établir les extrêmes de toutes les composantes.

Les mots clés utilisables sont :

	(EFFORT)	DEPLA	CONTR	PRESS	(REAC)
Option PLANE	n, ty, mz	dx, dy, rz	vy, wy	px, py	fx, fy, mz
Option GRILL	mx, tz, my	rx, dz, ry	vz, wz	pz, mx	fz, my
Option SPATIALE	n, ty, tz, mx, my, mz	dx, dy, dz, rx, ry, rz	vyvz, vywz, wyvz, wywz	px, py, pz	fx, fy, fz mx, my, mz

Les mots clés utilisables pour la définition des charges d'exploitation sont :

pour les charges du Fasc. 61 Titre II (description ci-dessous) :

AL, AL FREIN

AL PLANCHER, AL PLANCHER FREIN

TROT, AL PIETON

pour les charges de type A(l) généralisé (cf. commande ALG p158) :

ALG j

— Pour les charges d'exploitation, l'enveloppe des déplacements ne peut s'effectuer qu'aux sections d'étude définies sur les barres (cf. commande ETUDE p98). L'enveloppe des déplacements des nœuds n'est jamais étudiée.

— La prise en compte des charges d'exploitation nécessite la définition d'un tablier (cf. commande TABLIER p128), la définition d'une surcharge (cf. commande SURCH p138, p144 et p168) et l'exécution de la surcharge (cf. commande EXEC SURCH p176).

— Un positionnement longitudinal et transversal des charges d'exploitation n'est possible que si l'implantation des voies (cf. commande TABLIER p128), et l'affectation des charges sur ces voies (cf. mot clé ZONE p138) sont définies. Dans le cas où l'une de ces deux conditions n'est pas réalisée, **ST1** se limite à un positionnement longitudinal des charges sans pondération transversale.

## DESCRIPTION DES CHARGES D'EXPLOITATION DU FASC. 61 TITRE II

**CHARGE A(L) FASC. 61 TITRE II ART. 4 (SANS A(L) PLANCHER) - MOT CLE AL**

La charge A(L) générée par **ST1** est équivalente à une force répartie appliquée suivant la direction du poids propre et dont la valeur en fonction de la longueur chargée L, est donnée par la formule :

$$AL = 0.23 + 36 / (12 + L)$$

Cette formule correspond à des tonnes par mètre carré si les longueurs sont exprimées en mètres.

En fonction de la classe du pont (cf. commande *TABLIER p128*), du nombre et de la largeur des voies chargées (cf. mot clé *ZONE p138*), la valeur de AL est multipliée par les coefficients a1 et a2.

**Définition du coefficient a1 :**

Nombre de voies chargées	1	2	3	4	>=5
classe 1	1.00	1.00	0.90	0.75	0.70
classe 2	1.00	0.90	0.	0.	0.
classe 3	0.90	0.80	0.	0.	0.

**Définition du coefficient a2 :**

$$a2 = v0 / \text{largeur réelle de la voie}$$

avec v0 défini par :

classe 1	3.50
classe 2	3.00
classe 3	2.75

**FREINAGE DE A(L) FASC. 61 TITRE II ART. 6 (SANS A(L) PLANCHER) - MOT CLE AL FREIN**

L'effet du freinage de A(L) généré par **ST1** est équivalent à une force répartie appliquée suivant l'axe  $Ox$  local des barres et dont la valeur en fonction de la longueur chargée L et de la surface chargée S, est donnée par la formule :

$$AL \text{ FREIN} = (0.23 + 36 / (12 + L)) / (20 + 0.0035 * S)$$

Cette formule correspond à des tonnes par mètre carré si les longueurs sont exprimées en mètres.

En fonction de la classe du pont (cf. commande *TABLIER p128*), du nombre et de la largeur des voies chargées (cf. mot clé *ZONE p138*), la valeur AL est multipliée par les coefficients a1 et a2 définis ci-dessus.

**CHARGE A(L) PLANCHER FASC. 61 TITRE II ART. 4.21 - MOT CLE AL PLANCHER**

La charge A(L) plancher générée par **ST1** est équivalente à une force répartie appliquée suivant la direction du poids propre et dont la valeur en fonction de la longueur chargée  $L$ , est donnée par la formule :

$$AL \text{ PLANCHER} = 0.4 - 0.0002 * L$$

Cette formule correspond à des tonnes par mètre carré si les longueurs sont exprimées en mètres.

En fonction de la classe du pont (*cf. commande TABLIER p128*) et de la largeur des voies chargées (*cf. mot clé ZONE p138*), la valeur  $AL$  est multipliée par le coefficient  $a_2$  défini ci-dessus.

**FREINAGE DE A(L) PLANCHER FASC. 61 TITRE II ART. 6 - MOT CLE AL PLANCHER FREIN**

L'effet du freinage de A(L) plancher généré par **ST1** est équivalent à une force répartie appliquée suivant l'axe  $ox$  local des barres et dont la valeur en fonction de la longueur chargée  $L$  et de la surface chargée  $S$ , est donnée par la formule :

$$AL \text{ PLANCHER FREIN} = (0.4 - 0.0002 * L) / (20 + 0.0035 * S)$$

Cette formule correspond à des tonnes par mètre carré si les longueurs sont exprimées en mètres.

En fonction de la classe du pont (*cf. commande TABLIER p128*) et de la largeur des voies chargées (*cf. mot clé ZONE p138*), la valeur  $AL$  est multipliée par le coefficient  $a_2$  défini ci-dessus.

**CHARGE DE TROTTOIR FASC. 61 TITRE II ART. 13.1 - MOT CLE TROT**

La charge de trottoir générée par **ST1** est équivalente à une force répartie appliquée suivant la direction du poids propre et dont la valeur est :

$$TROT = 0.150$$

Cette valeur correspond à des tonnes par mètre carré.

**CHARGE A(L) PIETONS ET CYCLES FASC. 61 TITRE II ART. 13.2 - MOT CLE AL PIETON**

La charge A(L) piétons et cycles générée par **ST1** est équivalente à une force répartie appliquée suivant la direction du poids propre et dont la valeur en fonction de la longueur chargée  $L$ , est donnée par la formule :

$$AL \text{ PIETON} = 0.2 + 15 / (50 + L)$$

Cette formule correspond à des tonnes par mètre carré si les longueurs sont exprimées en mètres.

**EXEMPLE : ENVELOPPE SANS CONCOMITANCE SOUS LA CHARGE A(L) (FASC. 61 TITRE II) POUR 1.00 m DE LARGEUR SANS PONDERATION PAR LES COEFFICIENTS A1, A2**

```
SURCH 1 'effet de A(l), 1.00 m de largeur, pondération : 7.78'
  AL
  POND 7.78
FIN
```

**EXEMPLE : ENVELOPPE SUR LES MOMENTS, AVEC CONCOMITANCE DES AUTRES EFFORTS ET EVENTUELLEMENT DES DEPLACEMENTS, CONTRAINTES, PRESSIONS**

Enveloppe sur les réactions d'appui sans concomitance.

Etude sous la charge de trottoir (Fasc. 61 Titre II) pour 1.00 m de largeur.

```
SURCH 2 'charge de trottoir sur 1.00 m de largeur'
  EFFORT MZ
  TROT
FIN
```

**EXEMPLE : ENVELOPPE SUR LES PRESSIONS PY DES POUTRES SUR SOL ELASTIQUE (cf. commande CARA p59), AVEC CONCOMITANCE DES AUTRES PRESSIONS ET EVENTUELLEMENT DES EFFORTS, DEPLACEMENTS, CONTRAINTES**

Enveloppe sur la réaction d'appui d'axe OY avec concomitance des autres réactions.

Etude du freinage de A(l) (Fasc. 61 Titre II) pour 1.00 m de largeur sans pondération transversale par les coefficients a1, a2.

```
SURCH 3 'freinage de A(l) sur 1.00 m de largeur'
  PRESS PY
  REAC FY
  AL FREIN
FIN
```

**EXEMPLE : ENVELOPPE SUR LA CONTRAINTE SUPERIEURE DE L'AXE OY, AVEC CONCOMITANCE DES AUTRES CONTRAINTES, DES EFFORTS ET EVENTUELLEMENT DES DEPLACEMENTS, PRESSIONS**

Enveloppe sur la réaction d'appui d'axe oy avec concomitance des autres réactions.

Etude de la charge A(1) (Fasc. 61 Titre II) positionnée sur les zones 2, 3 (cf. mot clé *ZONE\_TRANS* de la commande *TABLIER p128*) avec pondération transversale par les coefficients a1, a2.

```
SURCH 4 'A(1) sur la chaussée - pondération : 1.2 '  
CONTR VY  
REAC FY  
ZONE 2,3  
AL  
POND 1.2  
FIN
```

— *Dans cet exemple, les zones 2 et 3 sont considérées comme séparées par un système de sécurité inamovible.*

Par exemple en classe 1 au sens du fascicule 61 :

zone 2 de 5 m	=>	1 voie
zone 3 de 4 m	=>	1 voie
zone 2, 3 de 9 m	=>	2 voies
zone 4 de 9 m	=>	3 voies

**EXEMPLE : ENVELOPPE SANS CONCOMITANCE POUR LES SECTIONS D'ETUDE DES BARRES**

Enveloppe sur le moment d'encastrement mz des appuis avec concomitance des autres réactions.

Etude de la charge répartie généralisée ALG 1 (cf. commande *ALG p158*) positionnée sur la zone 4 (cf. mot clé *ZONE\_TRANS* de la commande *TABLIER p128*) avec pondération transversale.

```
SURCH 5 'charge ALG 1 sur zone transversale numéro 4'  
REAC MZ  
ZONE 4  
ALG 1  
FIN
```

## 8.4 - DEFINITION DES SURCHARGES : TYPE CHARGES ROULANTES

$\Sigma$  Rappel : Les charges du Règlement Français sont exprimées en tonnes.

L'étude de l'effet des charges d'exploitation de type *charges roulantes* est décrite selon la syntaxe suivante :

```
SURCH i ('Titre de la charge roulante')
  ( < EFFORT <N, TY, TZ, MX, MY, MZ>,
    DEPLA <DX, DY, DZ, RX, RY, RZ>,
    CONTR <VY, VZ, WY, WZ, VYVZ, VYWZ, WYVZ, WYWZ> >
    CONTRG j
    PRESS <PX, PY, PZ, MX> )
  (REAC <FX, FY, FZ, MX, MY, MZ>)
  < BC, BC FREIN, BT,
    MC80, ME80, MC120, ME120,
    CV_C2, CV_D2F1, CV_D3F1, CV_D3F2, CV_E2F1, CV_E3F1, CV_E3F2,
    VS_F61_D, VS_F61_E,
    VS_1946_3CL, VS_1946_4CL,
    VS_48_GRUE,
    VS_72_OAN, VS_72_GRUE, VS_72_OAE,
    VS_94_OAN, VS_94_GRUE, VS_94_OAE,
    VS_120_OAN, VS_108_GRUE, VS_120_OAE,
    CONV j >
  (ZONE liste)
  (PAS CONV pasc) (SENS psens)
  (POND pond)
FIN
```

avec :

i	numéro de la surcharge
j	numéro de la contrainte généralisée
liste	liste des zones transversales chargées ( <i>cf. commande TABLIER p128</i> )
pasc	pas maximal de déplacement des charges roulantes sur les lignes d'influence (par défaut pasc=0.5)
psens	sens de déplacement des charges roulantes sur le tablier (psens=1 sens croissant, psens=2 sens décroissant, par défaut psens=3 dans les 2 sens)
pond	coefficient de pondération de la surcharge (par défaut pond=1)

Les commandes EFFORT, DEPLA, CONTR, CONTR j, PRESS ou REAC permettent de définir une composante privilégiée. L'étude de la surcharge consiste à chercher les deux extrêmes de cette composante et les valeurs concomitantes des autres composantes.

Par défaut il n'y a pas de concomitance, c'est à dire que l'étude de la surcharge consiste à établir les extrêmes de toutes les composantes.

Les mots clés utilisables sont :

	(EFFORT)	DEPLA	CONTR	PRESS	(REAC)
Option PLANE	n, ty, mz	dx, dy, rz	vy, wy	px, py	fx, fy, mz
Option GRILL	mx, tz, my	rx, dz, ry	vz, wz	pz, mx	fz, my
Option SPATIALE	tx, ty, tz, mx, my, mz	dx, dy, dz, rx, ry, rz	vyvz, vywz, wyvz, wywz	px, py, pz	fx, fy, fz mx, my, mz

**POUR LES CHARGES DU FASC. 61 TITRE II :**

BC, BC FREIN, BT

MC80, ME80, MC120, ME120

Les convois D (280t) et E (400t) circule seul sans autre pondération.

VS\_F61\_D, VS\_F61\_E

**POUR LES CHARGES DU FASC. 61 DE 1946 :**

Il comprend uniquement la file de camion de 3eme classe 70t tous les 40m (d'axe en axe de camion) et la file de camion de 100t de 4eme classe tous les 60m, sans aucune autre charge d'accompagnement.

VS\_1946\_3CL, VS\_1946\_4CL

**POUR LES CONVOIS EXCEPTIONNELS DE LA LETTRE - CIRCULAIRE R/EG.3 DU 20 JUILLET 1983 :**

CV\_C2

CV\_D2F1, CV\_D3F1, CV\_D3F2

CV\_E2F1, CV\_E3F1, CV\_E3F2

**POUR LES CONVOIS EXCEPTIONNELS DU GUIDE SUR LE FRANCHISSEMENT DES OUVRAGES D'ART DU CEREMA DE 2022 :**

Il comprend les charges de 48t, 72t, 94t et 120t de type grue ou pour les ouvrages neufs ou pour les ouvrages existants (avant eurocode)

VS\_48\_GRUE,  
VS\_72\_OAN, VS\_72\_GRUE, VS\_72\_OAE,  
VS\_94\_OAN, VS\_94\_GRUE, VS\_94\_OAE,  
VS\_120\_OAN, VS\_108\_GRUE, VS\_120\_OAE

**POUR LES CONVOIS GENERALISES** (cf. commande **CONV** p162) :

CONV j

- Pour les charges d'exploitation, l'enveloppe des déplacements ne peut s'effectuer qu'aux sections d'étude définies sur les barres (cf. commande **ETUDE** p98). L'enveloppe des déplacements des nœuds n'est jamais étudiée.

- La prise en compte des charges d'exploitation nécessite la définition d'un tablier (cf. commande **TABLIER** p128), la définition d'une surcharge (cf. commande **SURCH** p138, p144 et p168) et l'exécution de la surcharge (cf. commande **EXEC SURCH** p176).

- Un positionnement longitudinal et transversal des charges d'exploitation n'est possible que si l'implantation des voies (cf. commande **TABLIER** p128), et l'affectation des charges sur ces voies (cf. mot clé **ZONE** p138) sont définies. Dans le cas où l'une de ces deux conditions n'est pas réalisée, **ST1** se limite à un positionnement longitudinal d'une file de camions sans pondération transversale.

- Les charges roulantes circulent dans les 2 sens sur le tablier. Les résultats sont néanmoins sensibles au pas de déplacement des charges (cf. commande **PAS\_CONV** p144).

$\Sigma$  Attention, la commande **SENS** est bien adaptée pour les charges verticales. Pour les convois généralisés, cette commande étant découplée du coefficient directeur local éventuel défini dans le convoi. Elle ne fera qu'inverser la position des essieux, mais pas les coefficients directeurs. Ainsi, si l'on souhaite modéliser le freinage, il sera nécessaire de faire 2 convois, et de les appliquer respectivement sur 2 surcharges circulant chacune dans le sens de circulation correspondant.

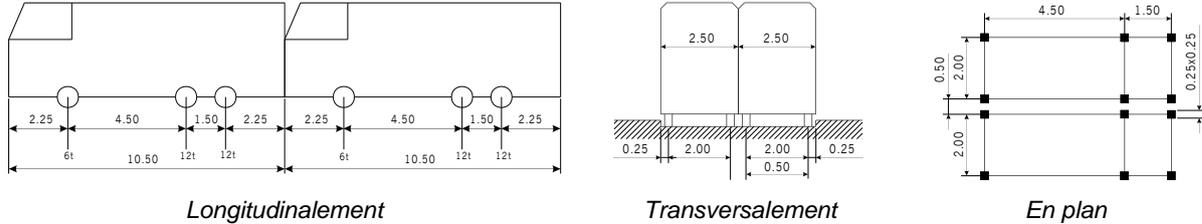
- Les charges roulantes, affectées à des zones spécifiques, sont placées sur toute la largeur des zones attribuées. C'est le cas pour les charges de type B, de type militaires et exceptionnelles. Il convient donc à l'utilisateur de définir des largeurs de zones appropriées

### 8.4.1 - DESCRIPTION DES CHARGES D'EXPLOITATION DU FASC. 61 TITRE II

Les charges générées automatiquement par **ST1** ne tiennent pas en compte de coefficient de majoration dynamique des charges du système B (Fasc. 61 Titre II Art. 5.5).

#### CHARGE BC FASC. 61 TITRE II ART. 5.2 - MOT CLE BC

L'effet du convoi BC généré par **ST1** est équivalent à deux groupes de trois forces réparties, appliquées suivant la direction du poids propre et dont les positions et les valeurs sont conformes aux schémas ci-dessous :



En fonction de la classe du pont (cf. commande *TABLIER p128*), du nombre et de la largeur des voies chargées (cf. mot clé *ZONE p138*), la valeur de BC est multipliée par un coefficient bc.

Définition du coefficient bc :

Nombre de voies chargées	1	2	3	4	>=5
classe 1	1.20	1.10	0.95	0.80	0.70
classe 2	1.00	1.00	0.	0.	0.
classe 3	1.00	0.80	0.	0.	0.

#### FREINAGE DE BC FASC. 61 TITRE II ART. 6 - MOT CLE BC FREIN

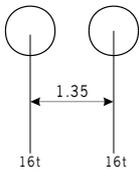
L'effet du freinage de BC généré par **ST1** est équivalent à un groupe de trois forces réparties, dirigées suivant l'axe  $ox$  local des barres et dont les positions et les valeurs sont conformes au schéma ci-dessous :



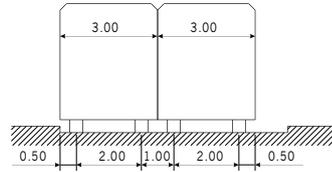
Sur une même file, les 2 camions BC sont placés indépendamment l'un de l'autre  
 — longitudinalement (hormis le chevauchement) pour avoir les effets le plus défavorable.

**CHARGE BT FASC. 61 TITRE II ART. 5.4 - MOT CLE BT**

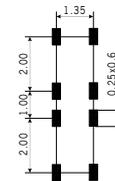
L'effet du convoi BT généré par **ST1** est équivalent à un groupe de deux forces réparties, appliquées suivant la direction du poids propre et dont les positions et les valeurs sont conformes aux schémas ci-dessous :



Longitudinalement



Transversalement



En plan

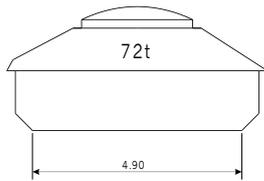
En fonction de la classe du pont (cf. commande *TABLIER p128*), du nombre et de la largeur des voies chargées (cf. mot clé *ZONE p138*), la valeur de BT est multipliée par un coefficient bt.

Définition du coefficient bt :

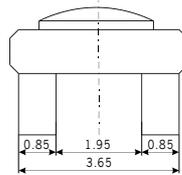
Nombre de voies chargées	1	2	>=3
classe 1	1.00	1.00	0.
classe 2	0.90	0.90	0.
classe 3	0.	0.	0.

**CHARGE MC80 FASC. 61 TITRE II ART. 9.21 - MOT CLE MC80**

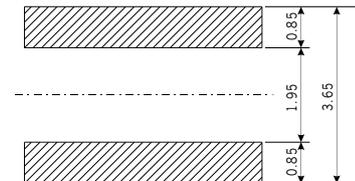
L'effet du convoi MC80 généré par **ST1** est équivalent à dix forces réparties séparées au minimum par 30.50 m, appliquées suivant la direction du poids propre et dont les positions et les valeurs sont conformes aux schémas ci-dessous :



Longitudinalement



Transversalement

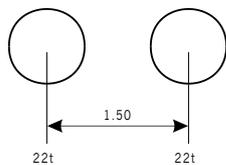


En plan

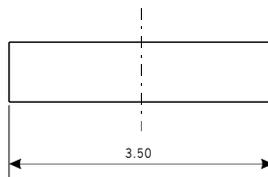
Pour les chars MC, il en va de même que pour les camions BC en tenant compte des distances — minimales entre chars.

**CHARGE ME80 FASC. 61 TITRE II ART. 9.21 - MOT CLE ME80**

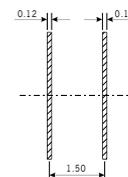
L'effet du convoi ME80 généré par **ST1** est équivalent à un groupe de deux forces appliquées suivant la direction du poids propre et dont les positions et les valeurs sont conformes aux schémas ci-dessous :



Longitudinalement



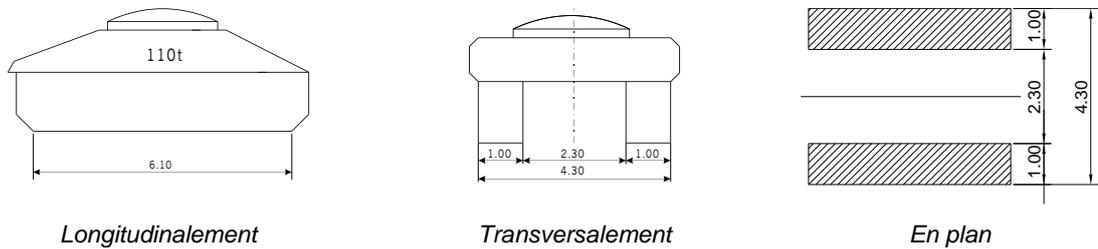
Transversalement



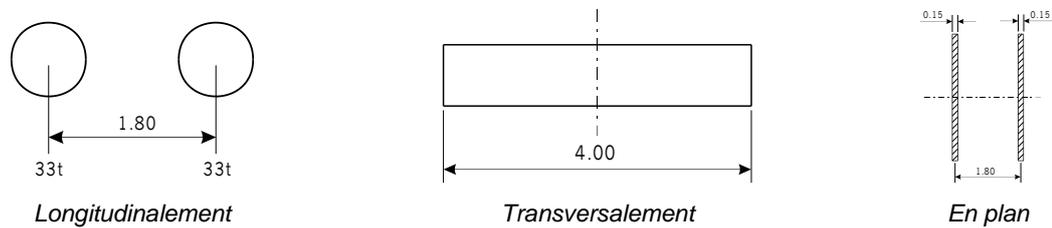
En plan

**CHARGE MC120 FASC. 61 TITRE II ART. 9.21 - MOT CLE MC120**

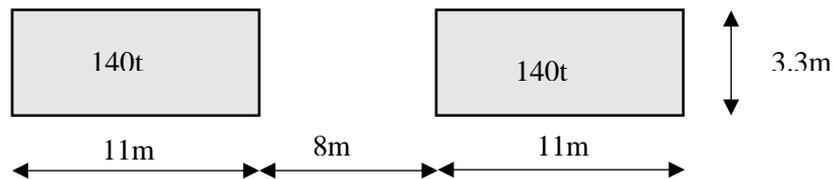
L'effet du convoi MC120 généré par **ST1** est équivalent à dix forces réparties séparées au minimum par 30.50 m, appliquées suivant la direction du poids propre et dont les positions et les valeurs sont conformes aux schémas ci-dessous :

**CHARGE ME120 FASC. 61 TITRE II ART. 9.21 - MOT CLE ME120**

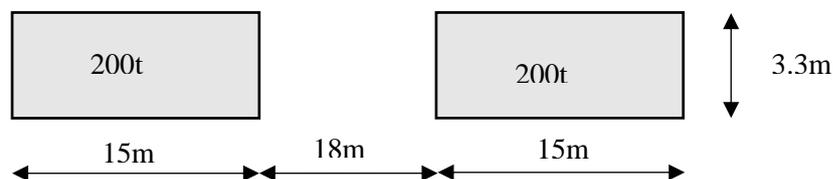
L'effet du convoi ME120 généré par **ST1** est équivalent à un groupe de deux forces appliquées suivant la direction du poids propre et dont les positions et les valeurs sont conformes aux schémas ci-dessous :

**CONVOI D FASC. 61- MOT CLE VS\_F61\_D**

L'effet du convoi D généré par **ST1** est équivalent à un groupe de deux forces réparties, appliquées suivant la direction du poids propre et dont les caractéristiques sont conformes au schéma ci-dessous :

**CONVOI E FASC. 61- MOT CLE VS\_F61\_E**

L'effet du convoi E généré par **ST1** est équivalent à un groupe de deux forces réparties, appliquées suivant la direction du poids propre et dont les caractéristiques sont conformes au schéma ci-dessous :

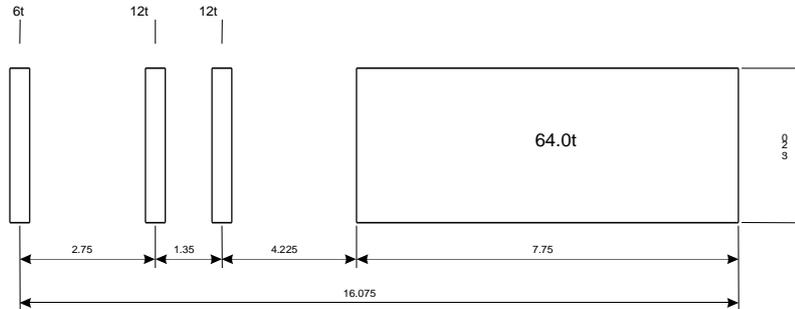


### 8.4.2 - CHARGES EXCEPTIONNELLES DE LA LETTRE-CIRCULAIRE R/EG 3 DU 20 JUILLET 1983

Les charges générées automatiquement par **ST1** ne tiennent pas compte du coefficient de 1.1 dû au déséquilibre des charges sur les essieux (Cir. R/EG.3 Art. 4.4).

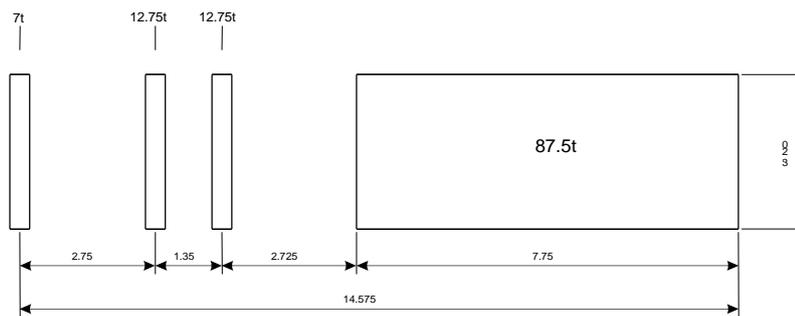
#### CONVOI C2 CIR. R/EG.3 20 JUILLET 1983 - MOT CLE cv\_c1

L'effet du convoi C1 généré par **ST1** est équivalent à un groupe de quatre forces réparties, appliquées suivant la direction du poids propre et dont les positions et les valeurs sont conformes au schéma ci-dessous :



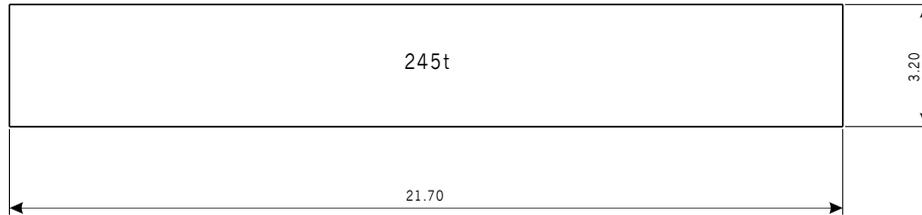
#### CONVOI C2 CIR. R/EG.3 20 JUILLET 1983 - MOT CLE cv\_c2

De même, l'effet du convoi C2 généré par **ST1** est équivalent au schéma ci-dessous :

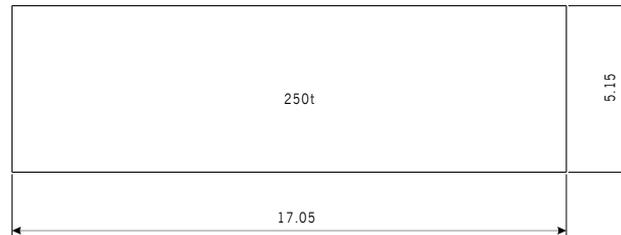


**CONVOI D2F1 CIR. R/EG.3 20 JUILLET 1983 - MOT CLE CV\_D2F1**

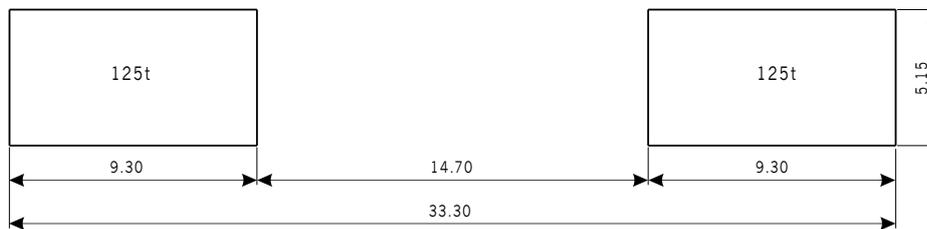
L'effet du convoi D2F1 généré par **ST1** est équivalent à une force répartie, appliquée suivant la direction du poids propre et dont les caractéristiques sont conformes au schéma ci-dessous :

**CONVOI D3F1 CIR. R/EG.3 20 JUILLET 1983 - MOT CLE CV\_D3F1**

L'effet du convoi D3F1 généré par **ST1** est équivalent à une force répartie, appliquée suivant la direction du poids propre et dont les caractéristiques sont conformes au schéma ci-dessous :

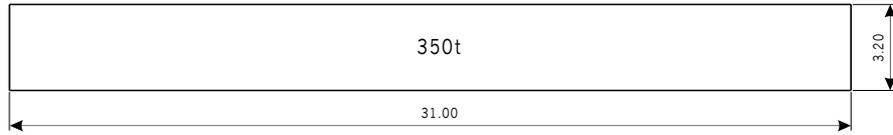
**CONVOI D3F2 CIR. R/EG.3 20 JUILLET 1983 - MOT CLE CV\_D3F2**

L'effet du convoi D3F2 généré par **ST1** est équivalent à un groupe de deux forces réparties, appliquées suivant la direction du poids propre et dont les caractéristiques sont conformes au schéma ci-dessous :

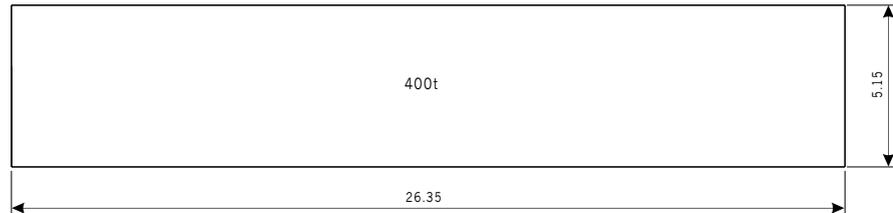


**CONVOI E2F1 CIR. R/EG.3 20 JUILLET 1983 - MOT CLE CV\_E2F1**

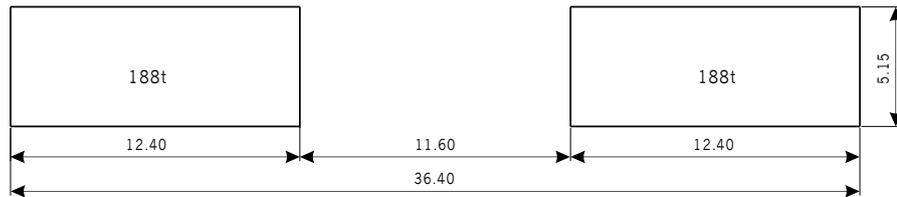
L'effet du convoi E2F1 généré par **ST1** est équivalent à une force répartie, appliquée suivant la direction du poids propre et dont les caractéristiques sont conformes au schéma ci-dessous :

**CONVOI E3F1 CIR. R/EG.3 20 JUILLET 1983 - MOT CLE CV\_E3F1**

L'effet du convoi E3F1 généré par **ST1** est équivalent à une force répartie, appliquée suivant la direction du poids propre et dont les caractéristiques sont conformes au schéma ci-dessous :

**CONVOI E3F2 CIR. R/EG.3 20 JUILLET 1983 - MOT CLE CV\_E3F2**

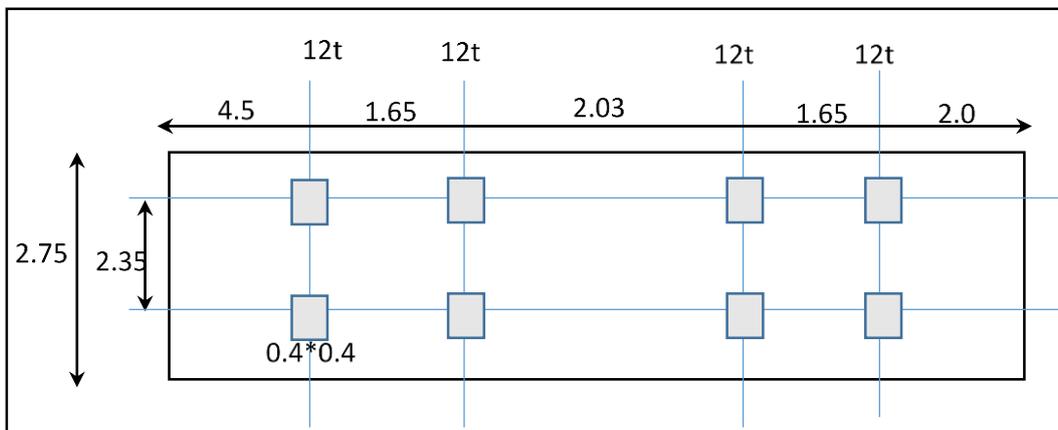
L'effet du convoi E3F2 généré par **ST1** est équivalent à un groupe de deux forces réparties, appliquées suivant la direction du poids propre et dont les caractéristiques sont conformes au schéma ci-dessous :



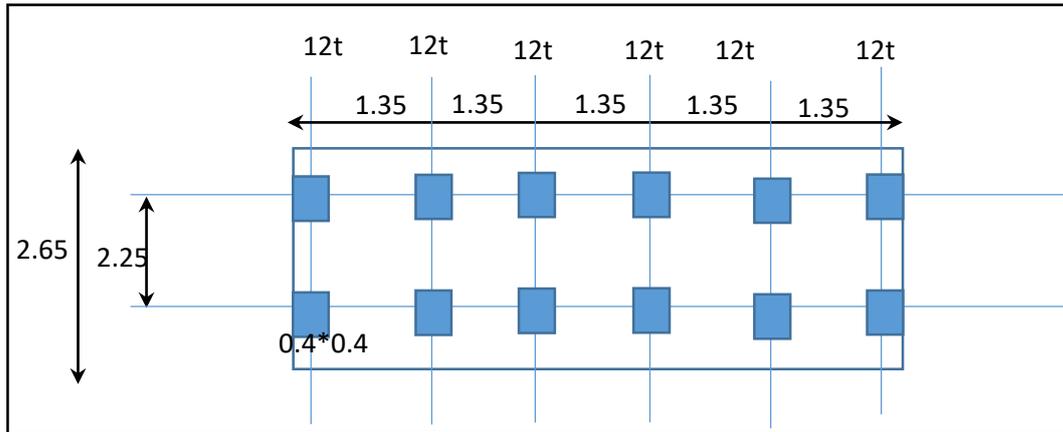
### 8.4.3 - CHARGES EXCEPTIONNELLES DU GUIDE SUR LES FRANCHISSEMENT DES OUVRAGES – TRANSPORTS EXCEPTIONNELS DU CEREMA DE 2022

Les charges générées automatiquement par **ST1** ne tiennent pas compte du coefficient de 1.1 dû au déséquilibre des charges sur les essieux (Cir. R/EG.3 Art. 4.4). Les charges ont exprimées en t.

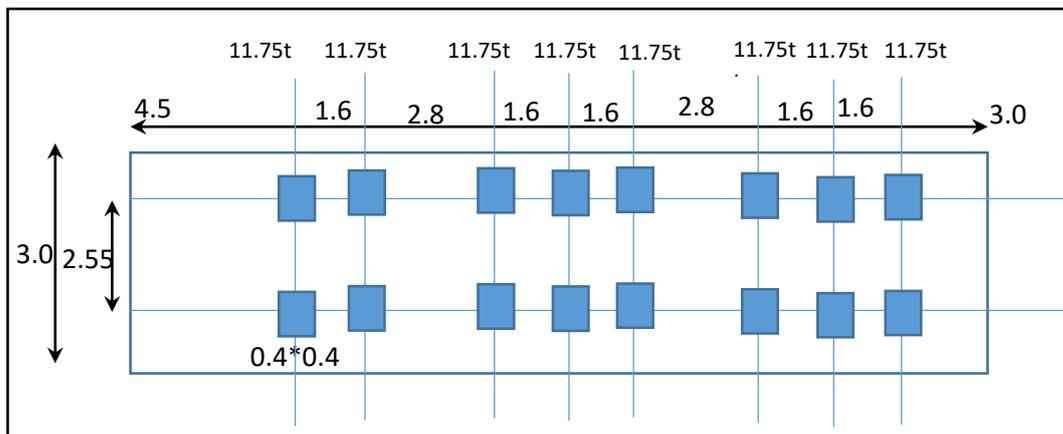
VS\_48\_GRUE



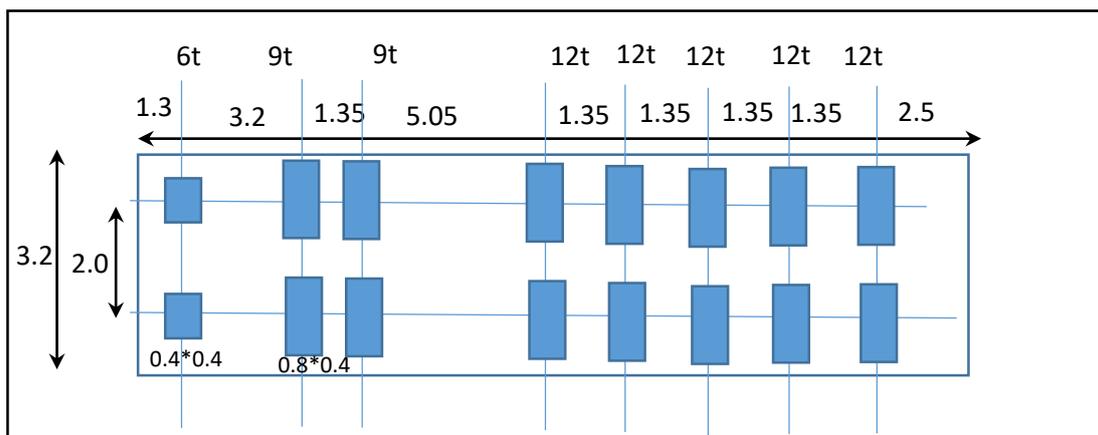
VS\_72\_OAN  
 Pour les ouvrages neufs



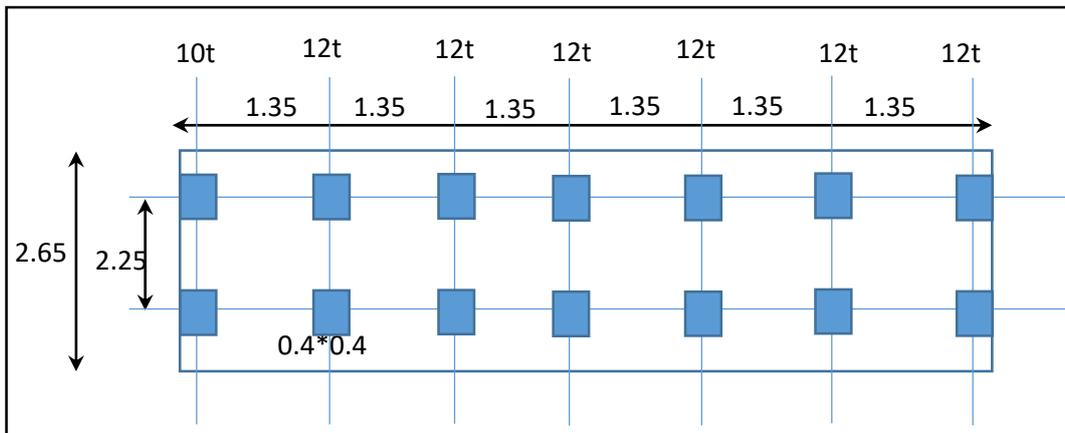
VS\_72\_GRUE



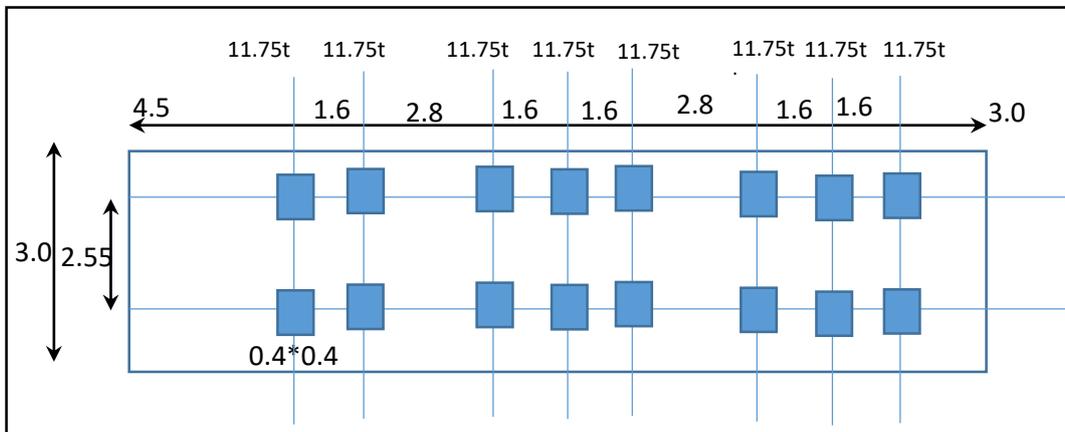
VS\_72\_OAE  
 Pour les ouvrages existants



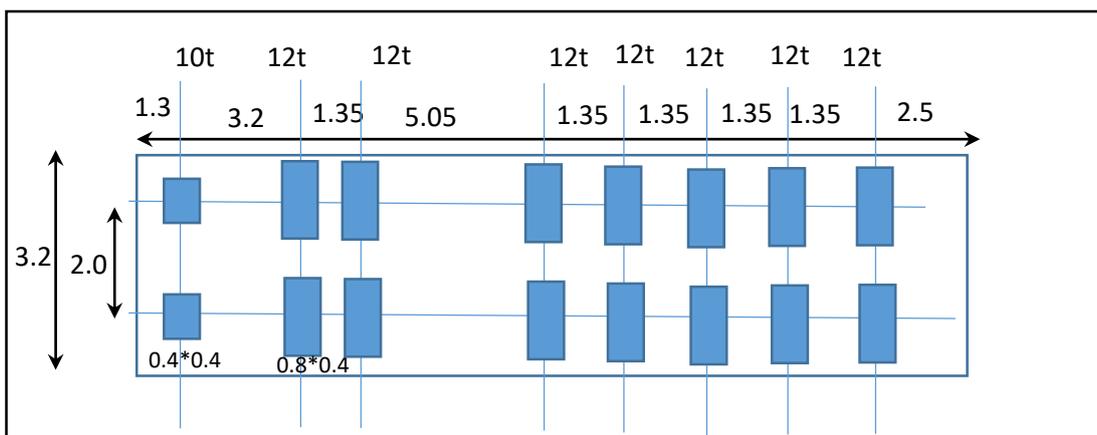
VS\_94\_OAN  
 Pour les ouvrages neufs



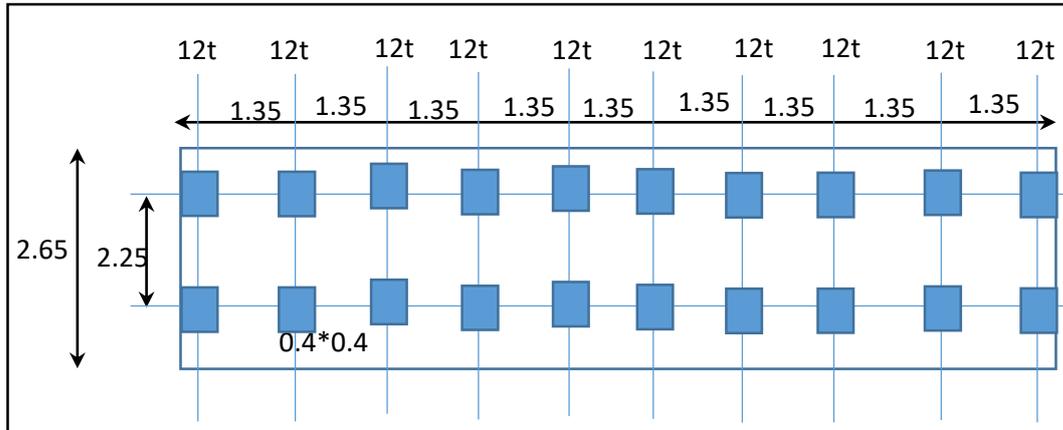
VS\_94\_GRUE



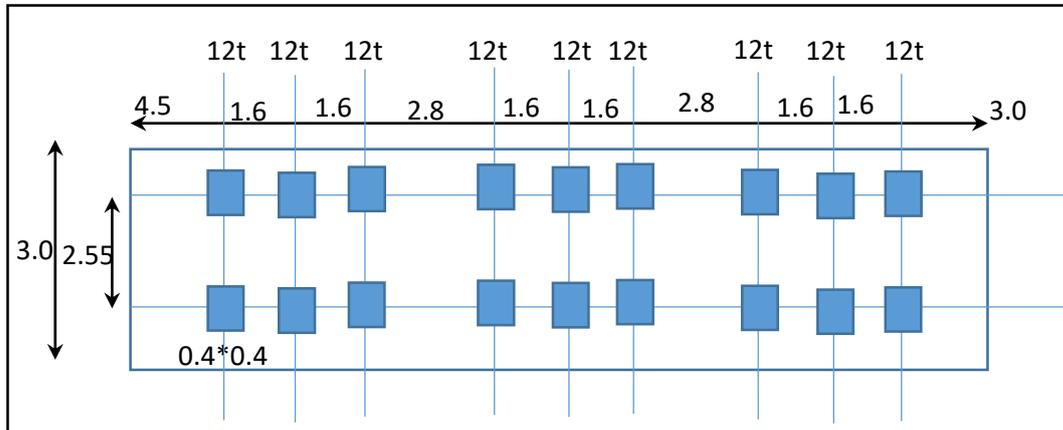
VS\_94\_OAE  
 Pour les ouvrages existants



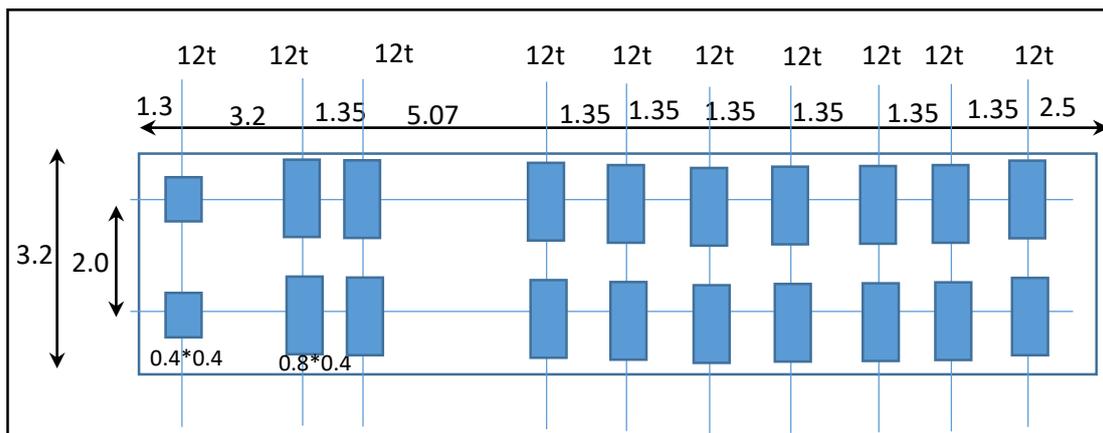
VS\_120\_OAN  
 Pour les ouvrages neufs



VS\_108\_GRUE



VS\_120\_OAE  
 Pour les ouvrages existants

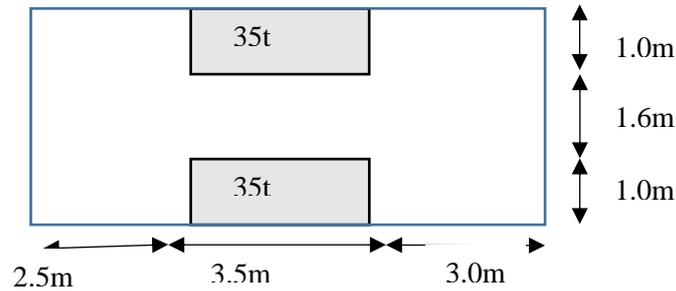


#### 8.4.4 - DESCRIPTION DES CHARGES D'EXPLOITATION DU FASC. 61 DE 1946

Deux charges du règlement de 1946 utilisé dans les années 60 en France sont disponible. Seules les camions de 3eme classe et 4eme classe de ce règlement sont pris en compte. Les charges réparties accompagnant possiblement à cote de ces camions ne sont pas modélisées.

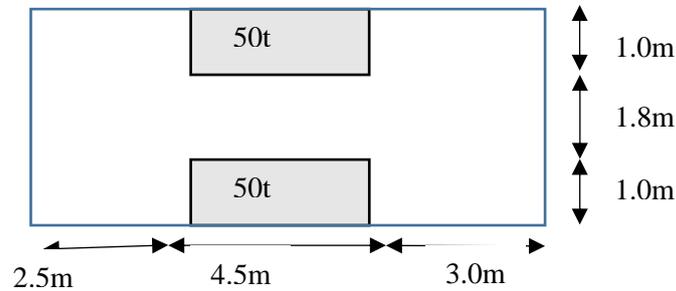
##### CHARGE 3EME CLASSE FASC. 61 DE 1946 - MOT CLE VS\_1946\_3CL

L'effet du convoi de 3eme classe de 1946 généré par **ST1** est équivalent à 10 groupes de charge d'essieu réparties, écartées de 40m(axe en axe), appliquées suivant la direction du poids propre et dont les positions et les valeurs d un groupe de charge sont conformes aux schémas ci-dessous :



##### CHARGE 4EME CLASSE FASC. 61 DE 1946 - MOT CLE VS\_1946\_4CL

L'effet du convoi de 4eme classe de 1946 généré par **ST1** est équivalent à 10 groupes de charge d'essieu réparties, écartées de 60m (axe en axe), appliquées suivant la direction du poids propre et dont les positions et les valeurs d un groupe de charge sont conformes aux schémas ci-dessous :



**EXEMPLE : ENVELOPPE SANS CONCOMITANCE SOUS LA CHARGE Bc (FASC. 61 TITRE II) POUR UNE FILE SANS PONDERATION TRANSVERSALE**

```
SURCH 1 'effet d'une file Bc'
      BC
FIN
```

**EXEMPLE : ENVELOPPE SUR LES MOMENTS, AVEC CONCOMITANCE DES AUTRES EFFORTS ET EVENTUELLEMENT DES DEPLACEMENTS, CONTRAINTES, PRESSIONS.**

Enveloppe sur les réactions d'appui sans concomitance.

Etude sous la charge Bt (Fasc. 61 Titre II) pour une file sans pondération par le coefficient bc.

```
SURCH 2 'charge d'une file Bt'
      EFFORT MZ
      BT
FIN
```

**EXEMPLE : ENVELOPPE SUR LES PRESSIONS PY DES POUTRES SUR SOL ELASTIQUE (cf. commande CARA p59), AVEC CONCOMITANCE DES AUTRES PRESSIONS ET EVENTUELLEMENT DES EFFORTS, DEPLACEMENTS, CONTRAINTES**

Enveloppe sur la réaction d'appui d'axe OY avec concomitance des autres réactions.

Etude du freinage de Bc (Fasc. 61 Titre II).

```
SURCH 3 'freinage de Bc'
      PRESS PY
      REAC FY
      BC FREIN
FIN
```

**EXEMPLE : ENVELOPPE SUR LA CONTRAINTE SUPERIEURE DE L'AXE OY, AVEC CONCOMITANCE DES AUTRES CONTRAINTES, DES EFFORTS ET EVENTUELLEMENT DES DEPLACEMENTS, PRESSIONS**

Enveloppe sur la réaction d'appui d'axe OY avec concomitance des autres réactions.

Etude de la charge Bc (Fasc. 61 Titre II) positionnée sur les zones 2, 3 (cf. mot clé ZONE\_TRANS de la commande TABLIER p128) avec pondération par le coefficient bc.

```
SURCH 4 'Bc sur la chaussée'
      CONTR VY
      REAC FY
      ZONE 2,3
      BC
FIN
```

**EXEMPLE : ENVELOPPE SANS CONCOMITANCE POUR LES SECTIONS D'ETUDE DES BARRES**

Enveloppe sur le moment d'encastrement mz des appuis avec concomitance des autres réactions.

Etude de la charge roulante généralisée CONV 1 (cf. commande CONV p162) positionnée sur la zone 4 (cf. mot clé ZONE\_TRANS de la commande TABLIER p128) avec pondération transversale.

```
SURCH 5 'CONV 1 sur zone transversale numéro 4'
      REAC MZ
      ZONE 4
      CONV 1
FIN
```

## 8.5 - DEFINITION DES CHARGES DE TYPE A(L) GENERALISE

$\Sigma$  Rappel : Les charges du Règlement Français sont exprimées en tonnes.

En complément des charges réglementaires du Fasc. 61 Titre II (cf. commandes AL, ..., TROT p138), il est possible de décrire dans **ST1**, des charges d'exploitation réparties entre zéros de lignes d'influence dont la densité varie en fonction de la longueur chargée. Ces charges appelées *charges A(l) généralisées* sont décrites selon la syntaxe suivante :

```
ALG i ('Titre de la charge répartie')
  (DIR GLO (FX fx) (FY fy) (FZ fz) (MX mx) (MY my) (MZ mz))
  (DIR LOC (FX fx) (FY fy) (FZ fz) (MX mx) (MY my) (MZ mz))
DENS
  longl densl
  ...
  longi densi
  ...
(LARG VOIE v0)
(COEF TRANS liste)
FIN
```

avec :

- |                           |  |
|---------------------------|--|
| i                         | numéro de la charge de type A(l)   |
| fx, fy, fz,<br>mx, my, mz | coefficients multiplicateurs de la charge pour obtenir la composante suivant l'axe désigné   |
| longi                     | longueur chargée   |
| densi                     | densité positive de la charge (pour 1 m de largeur) correspondant à une longueur chargée égale à longi (la densité de charge est une fonction de la longueur chargée)<br>elle est décrite point par point à l'aide des couples (longi, densi)<br>dans le cas où la longueur chargée est extérieure à l'intervalle explicitement défini, c'est la densité de la borne la plus proche qui est appliquée)   |
| v0                        | largeur de référence (ou nominale) d'une voie<br>ce paramètre permet de déterminer un coefficient de pondération (a2) de la charge surfacique destiné à obtenir une charge linéique identique pour chaque voie, indépendamment de sa largeur réelle $a2=v0/\text{largeur réelle de la voie}$<br>par défaut v0 n'est pas définie ce qui équivaut à charger le tablier sur une largeur de :<br>- 1.00m si les zones transversales ne sont pas définies (cf. commandes <i>TABLIER</i> p128 et <i>SURCH</i> p138, p144 et p168)<br>- la largeur des zones transversales si elles sont définies |

`liste` liste des coefficients à prendre en compte en fonction du nombre de voies chargées les coefficients transversaux ne sont pris en compte que si des zones transversales sont définies (cf. commandes *TABLIER* p128 et *SURCH* p138, p144 et p168) dans le cas où le nombre de voies est supérieur au nombre de coefficients définis, c'est le dernier coefficient qui est utilisé (par défaut `liste=1.00`)

Les mots clés `DIR GLO` signifient une définition dans le repère global de la structure.

Les mots clés `DIR LOC` signifient une définition dans le repère local des barres.

Les composantes utilisables sont :

Option <code>PLANE</code>	<code>fx, fy, mz</code>
Option <code>GRILL</code>	<code>mx, fz, mz</code>
Option <code>SPATIALE</code>	<code>fx, fy, fz, mx, my, mz</code>

(par défaut la direction est suivant la direction du poids propre)

— *La prise en compte des charges d'exploitation nécessite la définition d'un tablier (cf. commande *TABLIER* p128), la définition d'une surcharge (cf. commande *SURCH* p138, p144 et p168) et l'exécution de la surcharge (cf. commande *EXEC SURCH* p176).*

— *Un positionnement longitudinal et transversal des charges d'exploitation n'est possible que si l'implantation des voies (cf. commande *TABLIER* p128), et l'affectation des charges sur ces voies (cf. commande *SURCH* p138, p144 et p168) sont définies. Dans le cas où l'une de ces deux conditions n'est pas réalisée, **ST1** se limite à un positionnement longitudinal des charges sans pondération transversale.*

— *La notion de classe (cf. commande *TABLIER* p128) n'a aucune influence sur les charges de type *A(l)* généralisé.*

**EXEMPLE : DEFINITION D'UNE CHARGE UNIFORME DE 0.150 T/M2 REPARTIE ENTRE LES ZEROS DES LIGNES D'INFLUENCE ET DIRIGEE SUIVANT LA DIRECTION DU POIDS PROPRE**

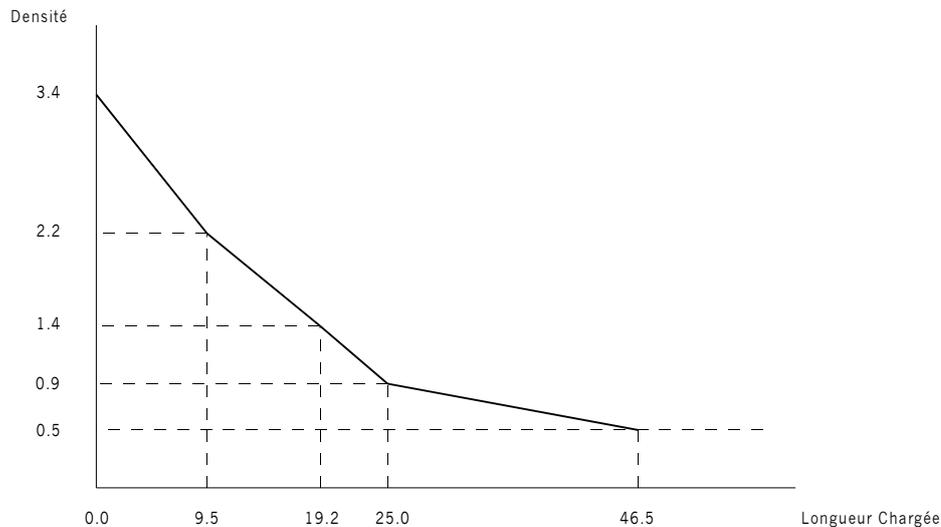
Les descriptions ci-dessous sont équivalentes :

```
ALG 1 'charge équivalente à la charge de trottoir'
  DENS
    0 .150
    100 .150
  FIN
```

ou

```
ALG 1 'charge équivalente à la charge de trottoir'
  DENS
    0 .150
  FIN
```

**EXEMPLE : DEFINITION D'UNE CHARGE DEPENDANT DE LA LONGUEUR CHARGEE SUIVANT UNE COURBE DE DENSITE**



De plus, si l'on suppose qu'il s'agit d'une charge verticale excentrée de 1.75 m par rapport à l'axe des barres du tablier on obtient la décomposition suivante :

1.75 suivant l'axe  $m_x$  local

1.00 suivant l'axe  $OZ$  global

```

ALG 2 'charge repartie excentre'
DIR LOC MX 1.75
DIR GLO FZ -1.00
DENS
  0. 3.4
  9.5 2.2
 19.2 1.4
 25.0 0.9
 46.5 0.5
FIN

```

Par exemple, dans le cas où la longueur chargée est égale à 15 m, on obtient une densité de charge de :

$$2.2 + (1.4 - 2.2) * (15. - 9.5) / (19.2 - 9.5) = 1.7464$$

La charge qui est alors effectivement appliquée par **ST1** est décomposée comme suit :

un couple réparti  $mx = 1.7464 * 1.75$

une force globale répartie  $fz = -1.7464 * 1.00$

**EXEMPLE : DEFINITION D'UNE CHARGE REPARTIE EQUIVALENTE A LA CHARGE A(L) DU FASC. 61 TITRE II POUR UN PONT ROUTE DE CLASSE 1**

```

AL 3 'charge équivalente à A1 du Fasc. 61 Titre II'
DENS
  0. 3.23
  2. 2.80
  4. 2.48
  6. 2.23
  8. 2.03
 10. 1.87
 15. 1.56
 20. 1.35
 25. 1.20
 30. 1.08
 35. 1.00
 50. 0.81
 100. 0.55
 150. 0.45
 200. 0.40
 250. 0.37
 500. 0.30
LARG VOIE 3.5
COEF TRANS 1.00,1.00,0.90,0.75,0.70
FIN

```

## 8.6 - DEFINITION DES CHARGES ROULANTES GENERALISEES

En complément des charges réglementaires du Fasc. 61 Titre II (*cf. commandes BC, BT, ..., MC120 p144*), et des convois exceptionnels de la lettre - circulaire R/EG 3 du 20 juillet 1983 (*cf. commandes CV\_C2, CV\_D2F1, ..., p144*), il est possible de décrire dans **ST1**, des charges roulantes généralisées selon la syntaxe suivante :

```

CONV i ('Titre du convoi')
      (DIR GLO (FX fx) (FY fy) (FZ fz) (MX mx) (MY my) (MZ mz))
      (DIR LOC (FX fx) (FY fy) (FZ fz) (MX mx) (MY my) (MZ mz))
ESSIEU
      j XL xl POIDS poids (YL listeyl) (IMPACT impactl impactt)
      ...
      (MAX_CAM ncam)
      (MAX_FILE nfile)
      (LONG xlong)
      (LARG xlarg)
      (COEF TRANS liste)
FIN

```

avec :

i	numéro du convoi
fx, fy, fz, mx, my, mz	coefficients multiplicateurs de la charge pour obtenir la composante suivant l'axe désigné
j	numéro de l'essieu
xl	position de l'essieu par rapport à l'avant du camion
poids	poids de l'essieu (positif)
listeyl	liste des positions transversales des roues composant l'essieu j par rapport à l'axe de l'essieu (par défaut listeyl =0.00)
impactl et impactt	dimensions longitudinale et transversale d'un impact (par défaut impactl=0.00 et impactt=0.00)
ncam	nombre maximum de camions par file (par défaut ncam=1)
nfile	nombre maximum de files chargées (par défaut nfile=nombre de voies chargées)
xlong	longueur d'encombrement d'un camion (par défaut xlong=max(xl+impact/2) )

xlarg	largeur d'encombrement d'un camion qui n'est prise en compte que si des zones transversales sont définies (cf. commandes <i>TABLIER p128</i> et <i>SURCH p138, p144 et p168</i> )
liste	<p>liste des coefficients à prendre en compte en fonction du nombre de voies chargées. Attention, chaque coefficient est appliqué à l'ensemble des voies (au sens du fascicule 61 titre2: le 1<sup>er</sup> coefficient pour 1 voie, le 2eme coefficient pour 2 voies, etc..), les voies sont donc toutes chargées uniformément.</p> <p>les coefficients transversaux ne sont pris en compte que si des zones transversales sont définies (cf. commande <i>TABLIER p128</i>) et servent de support aux convois (cf. commande <i>SURCH p138, p144 et p168</i>)</p> <p>dans le cas où le nombre de voies est supérieur au nombre de coefficients définis, c'est le dernier coefficient qui est utilisé</p> <p>par défaut (liste=1.00)</p>

Les mots clés DIR GLO signifient une définition dans le repère global de la structure.

Les mots clés DIR LOC signifient une définition dans le repère local des barres.

Les composantes utilisables sont :

Option PLANE	fx, fy, mz
Option GRILL	mx, fz, mz
Option SPATIALE	fx, fy, fz, mx, my, mz

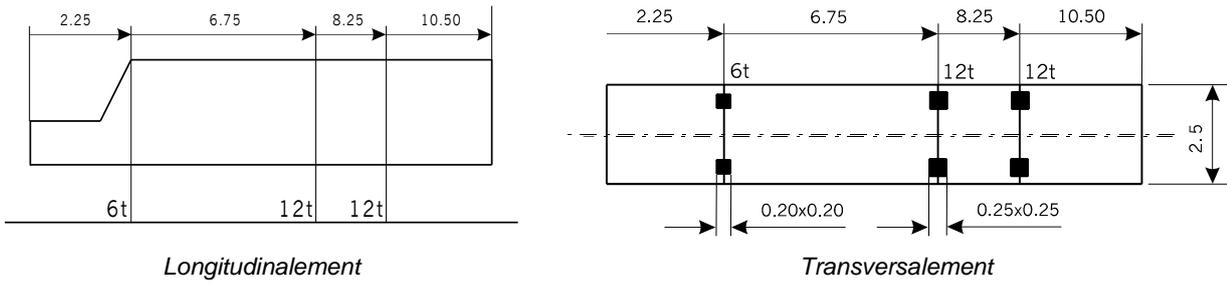
(par défaut la direction est suivant la direction du poids propre)

— *La prise en compte des charges d'exploitation nécessite la définition d'un tablier (cf. commande *TABLIER p128*), la définition d'une surcharge (cf. commande *SURCH p138, p144 et p168*) et l'exécution de la surcharge (cf. commande *EXEC SURCH p176*).*

— *Un positionnement longitudinal et transversal des charges d'exploitation n'est possible que si l'implantation des voies (cf. commande *TABLIER p128*), et l'affectation des charges sur ces voies (cf. commande *SURCH p138, p144 et p168*) sont définies. Dans le cas où l'une de ces deux conditions n'est pas réalisée, **ST1** se limite à un positionnement longitudinal des charges sans pondération transversale.*

— *La notion de classe (cf. commande *TABLIER p128*) n'a aucune influence sur les charges roulantes généralisées.*

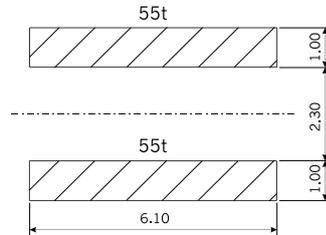
**EXEMPLE : DEFINITION D'UN CONVOI GENERALISE EQUIVALENT A LA CHARGE BC DU FASC. 61 TITRE II POUR UN PONT ROUTE DE CLASSE 1**



```

CONV 1 'convoi équivalent à Bc'
MAX_CAM 2
LARG 2.50
LONG 10.50
ESSIEU
  1 XL 2.25 POIDS 6 IMPACT 0.20 0.20 YL -1.0,1.0
  2 XL 6.75 POIDS 12 IMPACT 0.25 0.25 YL -1.0,1.0
  3 XL 8.25 POIDS 12 IMPACT 0.25 0.25 YL -1.0,1.0
COEF TRANS 1.20,1.10,0.95,0.80,0.70
FIN
  
```

**EXEMPLE : DEFINITION D'UN CONVOI EQUIVALENT A LA CHARGE MILITAIRE MC120 DU FASC. 61 TITRE II**



```

CONV 1 'convoi MC120'
MAX_CAM 10
MAX_FILE 1
LARG 4.30
ESSIEU
  1 XL 3.05 POIDS 110 IMPACT 6.10 1.00 YL -1.65,1.65
LONG 36.60
FIN
  
```

## 8.7 - DEFINITION DES CHARGES EUROCODE

ST1 permet également d'appliquer des chargements conformes à l'Eurocode 1-2 (EN 1991-2).

$\Sigma$  Rappel : Les charges Eurocode sont exprimées en kN.

Les modèles de chargement utilisables dans ST1 sont :

Modèle	Charges	Description
LM1	UDL	charge uniformément répartie, de densité constante
	TS	charge roulante type tandem de deux essieux
LM2	essieu	charge à essieu unique (deux roues de 200 kN chacune)
LM3	UDL	comme LM1
	TS	comme LM1
	VS	charge roulante type véhicule spécial

Chacun de ces modèles supporte en outre la charge répartie sur les *aires résiduelles*, c'est à dire les parties de zones chargeables non chargées par une voie.

La charge TS est composée de deux essieux ; le poids de chaque essieu est de la forme  $\alpha_Q \cdot Q_k$ , où les  $\alpha_Q$  sont des facteurs d'ajustement. La surface d'impact de chaque roue est supposée être un carré de 0,40 m de côté.

La charge UDL correspond à un poids par mètre carré égal à  $\alpha_q \cdot q_k$ ,  $\alpha_q$  étant un facteur d'ajustement.

Les valeurs caractéristiques des charges UDL et TS sont les suivantes :

Position	Tandem TS	UDL
	Charge essieu $Q_{ik}$ (kN)	$q_{ik}$ (ou $q_{rk}$ ) (kN/m <sup>2</sup> )
voie 1	300	9
voie 2	200	2,5
voie 3	100	2,5
autres voies	0	2,5
aires résiduelles	0	2,5

Pour chaque numéro de voie, les valeurs des coefficients d'ajustement dépendent de la classe de trafic. L'Eurocode 1-2 définit trois classes de trafic selon sa composition moyenne :

Classes de trafic	
1	accumulation de trafic très lourd sur la voie 1 (classe d'usage non courant)
2	pour les compositions de trafic les plus courantes (sur réseau principal et autoroutier)
3	présence de véhicules lourds probable mais en petit nombre ou occasionnelle

Les coefficients d'ajustement, selon la classe de trafic et le numéro  $i$  de voie sont les suivants :

Classe de trafic	$\alpha_{Q1}$	$\alpha_{Qi}, i > 1$	$\alpha_{q1}$	$\alpha_{qi}, i > 1$	$\alpha_{qr}$	$\beta_{QLM2}$
1	1	1	1	1,2	1,2	0,8
2	0,9	0,8	0,7	1	1	0,8

— Ces différents coefficients sont définis dans le fichier de paramétrage *ST1.par*.

Enfin les effets des charges UDL et TS sont pondérés par des coefficients  $\Psi$  dont les valeurs dépendent du type de combinaison :

Combinaison	UDL	TS	LM2
FREQUENT	0,4	0,75	0,75
CARACTERISTIQUE	1	1	1

Le nombre maximal de voies chargées et leur largeur sont définis en fonction de la largeur chargeable, selon le tableau ci-dessous :

Largeur chargeable (L)	Nombre de voies	Largeur d'une voie (mètres)
$L < 5,40$ m	1	3,00
$5,40 \leq L < 6,00$	2	$L / 2$
$6,00 < L$	Entier( $L/3$ )	3,00

Lorsque la largeur du tablier est divisée en plusieurs zones chargeables, la largeur chargeable à considérer pour la détermination du nombre de voies est la largeur chargeable totale, à laquelle il faut ajouter les largeurs de séparateurs s'il ne s'agit pas de dispositifs physiquement permanents.

La numérotation des voies est commune à l'ensemble de la largeur chargeable (pour plus de précisions, voir EN 1991-2, 4.2.3 et 4.2.4).

— Les charges Eurocode sont utilisées dans le fichier *exemple4.st1 p294*.

### Limitation de tonnage en France :

Trois autres classes de trafic ont également été définies pour les limitations de tonnages des camions:

Classes de trafic	
4	Limitation à 19t
5	Limitation à 12t
6	Limitation à 3,5t

Les valeurs caractéristiques des charges TS et UDL du LM1 et du LM2 sont inchangées.

Les coefficients d'ajustement (pour une voie de 3m), selon la classe de trafic et le numéro  $i$  de voie sont les suivants :

Classe de trafic	$\alpha_{Q1}$	$\alpha_{Qi}, i > 1$	$\alpha_{q1}$	$\alpha_{qi}, i > 1$	$\alpha_{qr}$	$\beta_{QLM2}$
4	0.32	0.48	0.58	2.09	2.09	0.56
5	0.20	0.30	0.36	1.30	1.30	0.36
6	0.06	0.09	0.21	0.76	0.76	0.15

NB : Pour les classes 4 à 6, la densité de charge UDL des voies est corrigée pour se ramener au poids de la charge de voies de 3m.

$$\alpha_{wq} = 3m \cdot (n_v / w)$$

où  $w$  is la largeur de zone de chaussée et  $n_v$  le nombre de voies sur cette zone.

Les paramètres des commandes **ST1** permettant de modifier les valeurs par défaut des charges Eurocode sont décrits ci-dessous :

EUROCODE

```
(PSI_FREQ (TS psits) (UDL psiudl))
(POIDS (TS list_poidsts) (UDL listpoidsudl))
(CLASSE iclass AJUSTEMENT (TS listcoeff) (UDL listcoeff) (LM2 coeflm2)
...)
```

FIN

avec :

psits,psiudl	coefficients de valeurs fréquentes appliquées aux valeurs caractéristiques de TS et UDL (sans dimension)
list_poidsts	liste des poids des essieux des camions TS pour les voies 1,2 et 3 de calcul (limitée à 3 coefficients, le dernier coefficient de la liste est pris en compte pour les voies suivantes) (kN)
list_poidudl	liste des densités des charges UDL pour les voies 1,2,3 et suivantes de calcul (limitée à 4 coefficients, le dernier coefficient de la liste est pris en compte pour les voies suivantes) (kN/m <sup>2</sup> )
iclass	classe de trafic Eurocode (maximum 3 classes )
list_coeff	listes des coefficients d'ajustement alpha pour les voies 1 et suivantes selon la classe pour les charges TS ou UDL (limitée à 2 coefficients, le dernier coefficient de la liste est pris en compte pour les voies suivantes) (sans dimension)
coeflm2	coefficient d'ajustement beta pour la charge LM2 (sans dimension)

**EXEMPLE :**

EUROCODE

```
PSI_FREQ TS 0.75 UDL 0.4
POIDS TS 300,200,100 UDL 9,2.5
CLASSE 1
  AJUSTEMENT TS 1,1 UDL 1.0,1.2 LM2 0.8
CLASSE 2
  AJUSTEMENT TS 0.9,0.8 UDL 0.7,1 LM2 0.8
```

FIN

Les paramètres des commandes **ST1** spécifiques aux chargements Eurocode sont décrits ci-dessous :

TABLIER

CLASSE TRAFIC icltra

...

FIN

avec :

icltra classe de trafic (par défaut icltra = 2)

SURCH i ('Titre de la surcharge')

( < EFFORT <N, TY, TZ, MX, MY, MZ>,

DEPLA <DX, DY, DZ, RX, RY, RZ> ,

CONTR <VY, VZ, WY, WZ, VYVZ, VYWZ, WYVZ, WYWZ> >

CONTRG j

PRESS <PX, PY, PZ, MX> )

(REAC <FX, FY, FZ, MX, MY, MZ>)

< LM1 <(CARA), FREQ> <(CENTRE), LIBRE> ,

LM2 <CARA, FREQ> ,

LM3 <VSJ, nj>

(ZONEVS kvs YVS yvs1 yvs2 (REL, ABS)) (<EXC exc, DEBORDVOIE debv>) (PONDVS pondvs)

(LM1 <CARA, (FREQ), NUL><(CENTRE), LIBRE> (LGEXCLU lg) (CORRELE vj vk)),

LM4 <CTE, VAR> ,

TROT EC, TROT LM1,

CH\_23M3, CH\_34M3,

LMF3, LMF3B

>

(ZONE liste)

(POND pond)

FIN

avec :

CARA, FREQ le LM1 ou LM2 est soit caractéristique, soit fréquent

LM1 CENTRE le tandem TS est centré dans sa voie

LM1 LIBRE le tandem TS est libre dans sa voie

LM4 CTE charge de foule LM4  $(q_{fk}=5 \text{ kN/m}^2)$

LM4 VAR charge de piéton LM4 avec  $q_{fk} = 2+120/(L+30) \text{ kN/m}^2$

$(2.5 \text{ kN/m}^2 \leq q_{fk} \leq 5 \text{ kN/m}^2)$

TROT\_EC charge de trottoir Eurocode  $(q_{fk}=5 \text{ kN/m}^2)$

TROT\_LM1 charge de trottoir d'accompagnement du LM1  $(q_{fk}=3 \text{ kN/m}^2)$

et pour le LM3:

nj	numéro du convoi défini par l'utilisateur via la commande CONV (cf. p162) dans le cas d'un convoi défini par l'utilisateur via la commande CONV, un seul camion est pris en compte pour la définition du LM3 la zone d'exclusion du camion vis à vis du LM1 est définie par la longueur et la largeur d'un seul camion (CONV) défini par l'utilisateur la largeur du camion VS doit être inférieure à la largeur de 2 voies la commande DIR de CONV (coefficient multiplicateur selon la direction) n'est pas prise en compte
kvs	numéro de la zone dans laquelle est définie éventuellement la restriction de largeur de zone dans laquelle doit rouler le véhicule exceptionnel VS (par défaut, cette zone est la 1 <sup>ère</sup> zone définie dans le tablier)
yvs1, yvs2	positions limites des bords du VS sur la zone k en relatif ou absolue sur la largeur de zone k (par défaut toute la zone est chargée par le VS : yvs1=0 et yvs2=1 REL on rappelle que le profil des zones est défini de gauche à droite dans le sens de définition du tablier)
pondvs	pondération sur le camion VS seul
CARA, FREQ, NUL	le LM1 du LM3 pris en accompagnement du VS est soit caractéristique, soit fréquent, soit nul
debv	le camion VS est placé à une position debv par rapport au bord de la voie 1 du LM1, les permutations droite et gauche sur la voie étant faites par défaut le VS est placé au bord de la voie 1 (debv=0)
exc	le camion VS est excentré d'une position exc par rapport à l'axe dans sa voie dans le cas d'un VS inférieur à 3m ou à l'axe des 2 voies dans cas d'un VS sur 2 voies
CENTRE	le camion VS est centré dans sa voie par défaut
lg	longueur d'exclusion (longitudinalement) du VS vis à vis du LM1 (par défaut lg=10m)
vj, vk	numéros des voies du LM1 sur lequel circule le véhicule spécial (par défaut vj=1 et vk=2) NB : le numéro maximum des voies doit être inférieur au nombre maximal de voie de la zone chargée et les numéros de voies doivent se suivre : $abs(vj - vk) = 1$

*Un seul camion VS est pris en compte dans le LM3.*

- *Par défaut le camion VS inférieur à 3m de large est placé sur la voie 1 du LM1, le camion VS entre 3m et 6m est placé sur les voies 1 et 2 du LM1.*

$\sum$  *Les charges des convois généralisés sont exprimées dans l'unité défini par l'utilisateur. Néanmoins, l'utilisateur doit se souvenir que s'il utilise le LM3, la charge d'accompagnement du VS est le LM1 (charge eurocode qui est définie kN par défaut), l'utilisateur doit donc convertir le convoi en kN*

- Par défaut, pour le convoi LM3, la charge LM1 accompagnant le convoi exceptionnel est prise en combinaison fréquente. Les charges exceptionnelles C, D, E du Règlement Français utilisées avec le convoi LM3 sont exprimées en kilo-Newton.

VSJ label du camion LM3 défini dans l'Eurocode 1.

VSJ	Notation modèles de véhicules spéciaux pour ponts routes (annexe A EN1991-2)	Largeur modèle (m)	Adaptation Largeur (m) selon AN France
VS1	VS_600_150	3	inchangé
VS2	VS_900_150	3	inchangé
VS3	VS_1200_150	3	inchangé
VS4	VS_1200_200	3	inchangé
VS5	VS_1500_150	3	inchangé
VS6	VS_1500_200	3	inchangé
VS7	VS_1800_150	3	inchangé
VS8	VS_1800_200	3	inchangé
VS9	VS_2400_200	3	inchangé
VS10	VS_2400_240	4,5 (2voies)	inchangé
VS11	VS_2400_200_200	3	inchangé
VS12	VS_3000_200	3	inchangé
VS13	VS_3000_240	4,5 (2voies)	inchangé
VS14	VS_3000_200_200	3	inchangé
VS15	VS_3600_200	3	inchangé
VS16	VS_3600_240	4,5 (2voies)	inchangé
VS17	VS_3600_240_240	4,5 (2voies)	inchangé
VS18	LECLERC (=>p.e.b. leclerc)	3,35 (2voies)	3 (1 voie)
VS20	CV_C2	3,2 (2voies)	3 (1 voie)
VS21	CV_D2F1	3,2 (2voies)	3 (1 voie)
VS22	CV_D3F1	5,15 (2voies)	inchangé
VS23	CV_D3F2	5,15 (2voies)	inchangé
VS24	CV_E2F1	3,2 (2voies)	3 (1 voie)
VS25	CV_E3F1	5,15 (2voies)	inchangé
VS26	CV_E3F2	5,15 (2voies)	inchangé
VS27	CV_C1	3,2 (2voies)	3 (1 voie)

∑ La charge exceptionnelle LECLERC ne comporte qu'un seul camion ici qui peut être accompagné du LMI ou non. Si l'on souhaite modéliser plusieurs PEB\_LECLERC sur une même voie et si l'on souhaite en plus le faire accompagner du LMI via la commande LM3, il faut repasser par la commande CONVOI, c'est-à-dire les convois génériques, en créant un convoi constitué de 2 camions avec un espacement constant, distance fixé par l'utilisateur. Si lon ne l'accompagne pas du LMI, la commande CONVOI, permet de modeliser plusieurs camions sur une meme voie avec un écartement variable.

**EXEMPLE : UTILISATION DU LM3**

TABLIER

```

CLASSE TRAFIC 2
barre 1 a 3
ZONE_TRANS
1 LARG 2
2 LARG 8
3 LARG 8
4 LARG 1

```

FIN

#----- le VS et le LM1 se déplacent sur la zone 2 -----

```

SURCH 1 'LM3 vs2'
      ZONE 2
      LM3 VS_600_150

```

FIN

#----- le VS est seul, sans LM1 -----

```

SURCH 2 'LM3 VS sans LM1'
      ZONE 2
      LM3 VS_2400_240 LM1 NUL

```

FIN

#----- le VS est un camion à 2 essieux à 2 roues chacun -----

```

#
CONV 10 'VS'
      ESSIEU
      1 XL 10 POIDS 5 YL -1,1 IMPACT 0.25 0.25
      2 XL 20 POIDS 5 YL -1,1 IMPACT 0.25 0.25
      LONG 30
      LARG 3
      MAX FILE 1
      MAX_CAM 1

```

FIN

#----- le LM1 se déplace sur les zones 2,3 -----

#----- et le VS est entre 1m et 7m à l'intérieur de la zone 2 -----

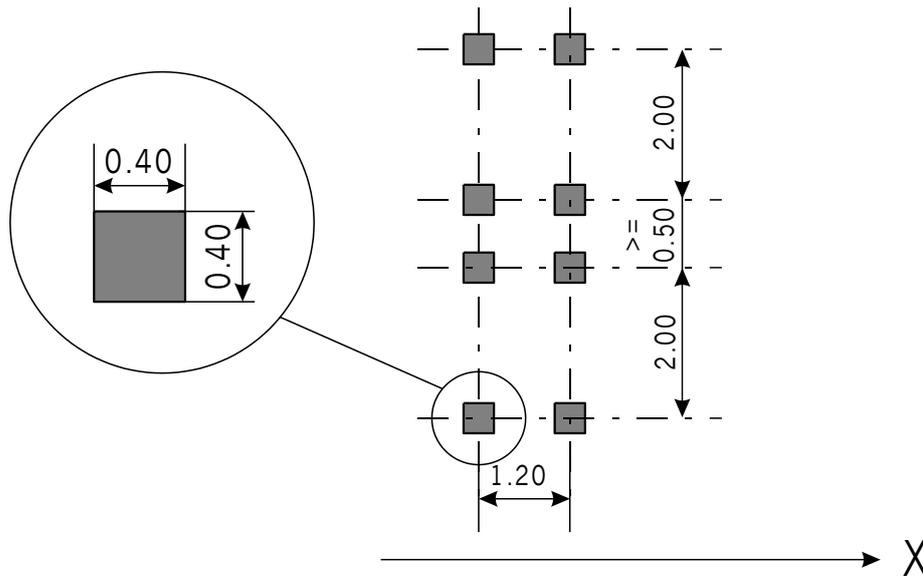
```

SURCH 3 'LM3 Convoi'
      LM3 10
      ZONEVS 2 YVS 1 7 ABS PONDVS 1.1
      LM1 LGEXCLU 25
      ZONE 2,3
      POND 1.35

```

FIN

## SYSTEME PRINCIPAL DE CHARGEMENT : MODELE DE CHARGE N° 1 (EN PLAN)



L'axe X est longitudinal.

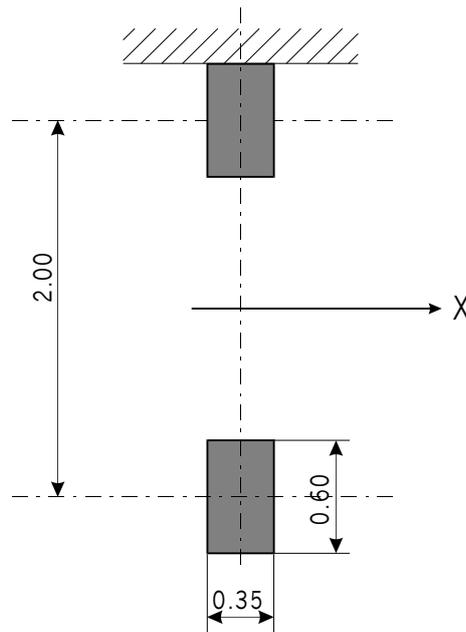
Le schéma montre deux véhicules de type TS, placés côte à côte ; la position longitudinale de chacun est indépendante, et résulte de la forme de la surface d'influence.

Chaque TS comporte deux essieux.

Dans **ST1**, chaque TS se déplace sur un axe centré sur sa voie.

Le modèle n°1 comporte en outre une charge répartie (UDL) de densité constante. Elle est appliquée uniquement sur les parties de zones chargeables défavorables, longitudinalement et transversalement.

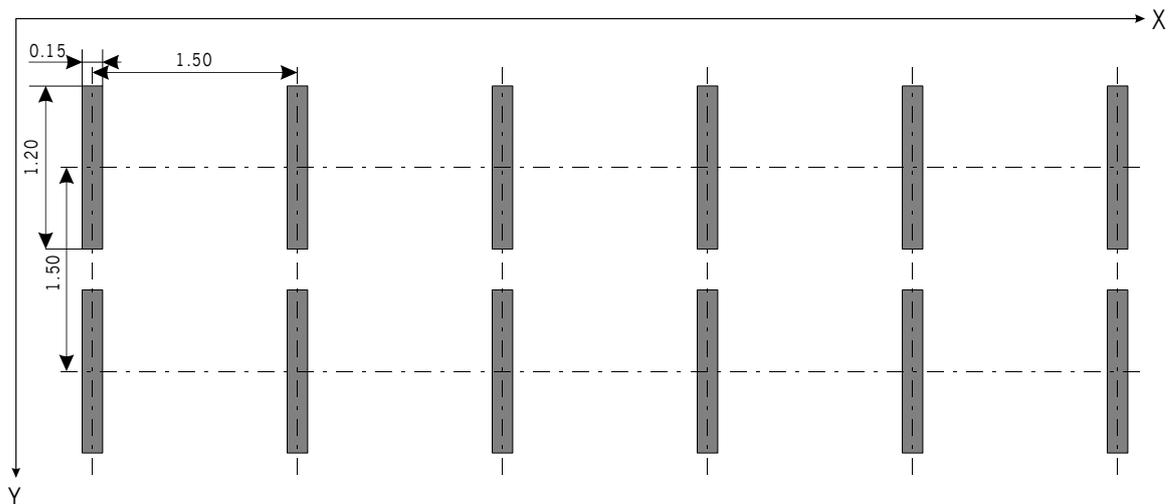
Pour chaque élément de surface ainsi chargée on applique une pondération dépendant du numéro de la voie qui contient l'élément. Celui-ci peut être situé sur une partie chargeable du tablier, hors de toute voie (aires résiduelles).

**MODELE A ESSIEU UNIQUE : MODELE DE CHARGE N° 2 (EN PLAN)**

Le déplacement de cette charge est entièrement libre longitudinalement et transversalement.

Le schéma montre une charge à essieu unique placée au bord de la zone chargeable.

Le modèle n° 2 ne comporte aucune charge répartie.

**MODELE DE VEHICULE SPECIAL : MODELE DE CHARGE N° 3 (EN PLAN) - EXEMPLE : VS4 1200/200**

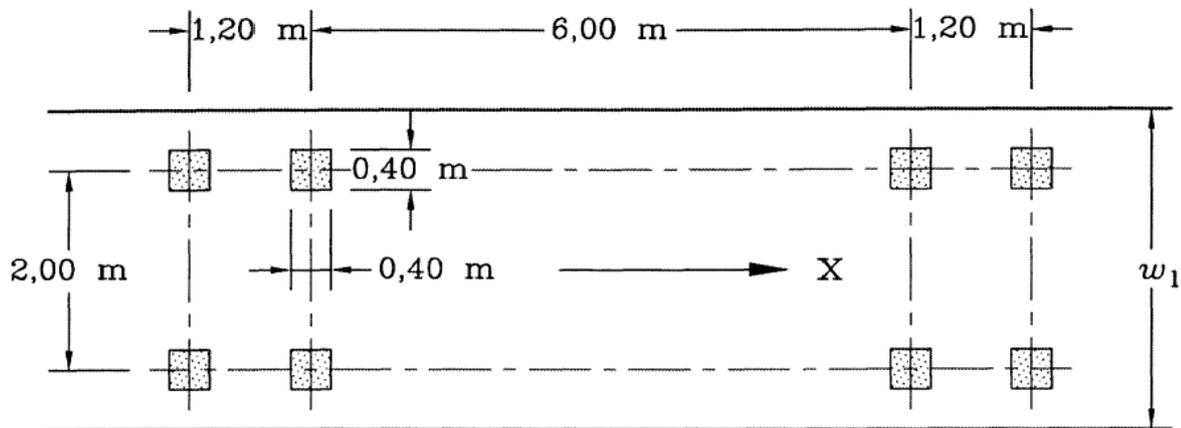
L'Eurocode 1 définit un grand nombre de véhicules spéciaux (VS).

La charge VS s'ajoute à celles du modèle n° 1 (UDL + TS) en valeur fréquente.

La charge VS de six essieux se déplace longitudinalement au bord de la voie. La présence de charge répartie (UDL) ou véhicule (TS) est exclue dans la zone occupée par le VS et prolongée sur une longueur de 10 m en avant et en arrière du véhicule (soit par exemple pour le VS4 la charge de six essieux, sur une longueur totale de 27,65 m).

## MODELES DE VEHICULE DE FATIGUE: LMF3 ET LMF3B

L'Eurocode 1-2 définit un engin de calcul pour la fatigue.



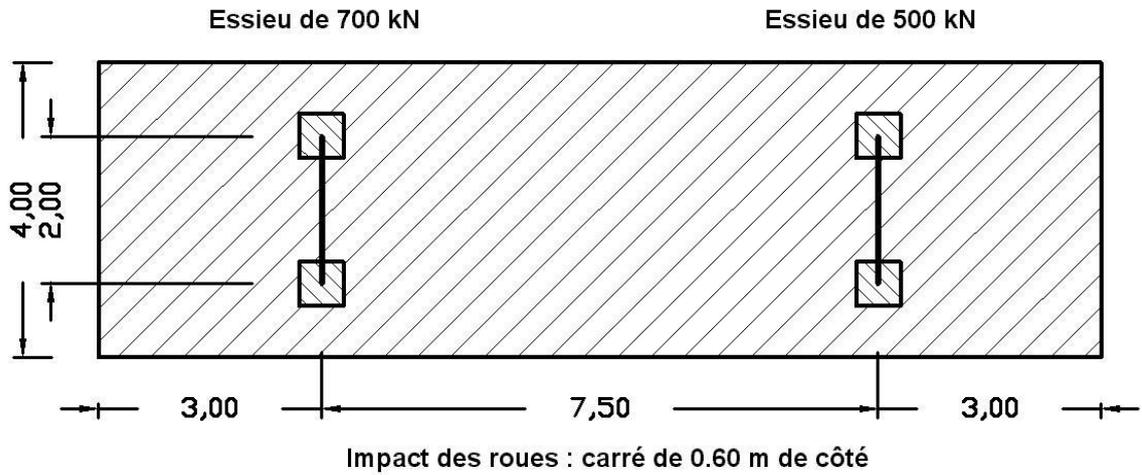
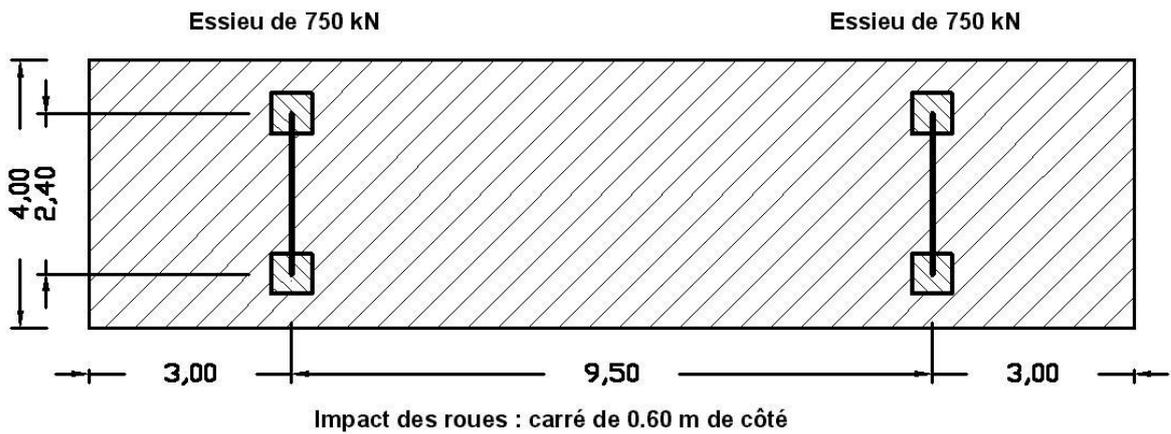
**Modèle de charge de fatigue LMF3 (120kN/essieu)**

— Le convoi de fatigue LMF3 est centré sur sa voie.

— Le convoi de fatigue LMF3B est constitué de 2 engins LMF3 placés sur la même file, sauf que le 2<sup>ème</sup> engin possède des essieux de 36kN au lieu de 120 kN.

## MODELES DE VEHICULE DE CHANTIER : CH\_23M3 ET CH\_34M3

L'annexe nationale de l'Eurocode 1-2 définit deux engins de calcul pour les phases chantiers.

**Modèle de charge pour un engin de terrassement de 23 m<sup>3</sup>**23m<sup>3</sup>**Modèle de charge pour un engin de terrassement de 34 m<sup>3</sup>**

## 8.8 - EXECUTION DES CHARGES D'EXPLOITATION

L'étude des charges d'exploitation précédemment définies (cf. commande *SURCH* p138, p144 et p168) est exécutée par la commande suivante :

```
EXEC SURCH (liste)
```

avec :

liste        liste de numéros des surcharges précédemment définies (par défaut toutes les surcharges définies seront étudiées)

— *La commande EXEC SURCH stocke les résultats en base de données.*

— *Dans l'instruction ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur toutes les surcharges définies (ceci est alors équivalent à ne pas mettre de liste).*

## 9

## PHASAGE DE CONSTRUCTION (ST1 V2 SEULEMENT)

∑ Les commandes détaillées dans ce chapitre ne concernent que les utilisateurs de **ST1 version 2** (version avec convention annuelle renouvelable) et ne seront pas accessibles avec **ST1 version 1** (version commercialisée).

### 9.1 - DEFINITION D'UN PHASAGE

Un phasage contient une description chronologique des activations et des sollicitations d'une structure. Il permet de tenir compte d'une manière précise des phasages de construction et du comportement différé des matériaux.

La définition d'un phasage s'effectue selon la syntaxe :

```
PHASAGE (i) ('Titre du phasage')
  (SUITE PHASAGE liste)
  ENV v ( < EFFORT <N, TY, TZ, MX, MY, MZ>,
          DEPLA <DX, DY, DZ, RX, RY, RZ>,
          CONTR <VY, VZ, WY, WZ, VYVZ, VYWZ, WYWZ>,
          CONTRG c
          PRESS <PX, PY, PZ, MX> > )
  (REAC <FX, FY, FZ, RX, RY, RZ>)
  (ACTIVER, DESACTIVER) ENV liste
  DATE d
  ACTIVER APPUI liste
  VERINER APPUI liste
  ACTIVER BARRE liste (AGE a) (MODE <ABS, REL>)
  DESACTIVER (BARRE liste, APPUI liste)
  CHARG
  ...
  FIN
  TENDRE CABLE liste (NON) (INJECTE)
  DETENDRE CABLE liste
  ETAT e
  MODIFIER APPUI liste
FIN PHASAGE
```

avec :

i                    numéro du phasage (par défaut i=1)

*Les commandes spécifiques au phasage sont détaillées dans la suite du chapitre.*

#### EXEMPLE

```
PHASAGE 1 'Exemple phasage'
...
DATE 125
ACTIVER BARRE 12 AGE 3
...
TENDRE CABLE 8
...
DATE 150
MODIFIER APPUI 12 DY
...
TENDRE CABLE 11
...
FIN PHASAGE
EXEC PHASAGE 1
```

#### MOT CLÉ ET :

Certaines actions doivent être décrites par plusieurs commandes. Pour éviter qu'un calcul intermédiaire soit effectué, ces commandes peuvent être chaînées par le mot clé ET.

**Néanmoins, dans la plupart des cas, cette commande n est pas nécessaire, car elle est en générale implicite, voir interdite :** en particulier, on ne fait pas de chargement et on active des barres à la suite par exemple.

Il faut se rappeler que le calcul est fait au moment de la commande ETAT, à la fin du PHASAGE et au changement de date.

Il vaut mieux donc gérer les calculs en définissant la liste des états pertinents et omettre la commande ET.

#### EXEMPLE : DEPLACER UNE LISTE D'APPUI

<pre>PHASAGE 1 'Exemple phasage' ... MODIFIER APPUI 1 NOEUD 2 ET MODIFIER APPUI 2 NOEUD 3 ET MODIFIER APPUI 3 NOEUD 4 ET VERINER APPUI 1 a 3 FIN PHASAGE</pre>	ou	<pre>PHASAGE 1 'Exemple phasage' ... MODIFIER APPUI 1 a 3 NOEUD 2 a 4 ET VERINER APPUI 1 a 3 ... FIN PHASAGE</pre>
--	----	--

- Dans un phasage de construction, où la date ne varie pas, mais que de nouvelles charges fixes sont appliquées à une structure déjà précontrainte (par exemple une charge, une activation ou désactivation d'appuis ou de barres, une mise en tension de câbles) et que le mot clé ET est omis, les câbles déjà tendus subissent des pertes supplémentaires de tension par déformation élastique.

$$\Delta\sigma_p = K \frac{E_p}{E_{ij}} \Delta\sigma_b$$

avec  $K=0$  à la mise en tension et  $K=1$  en cours de chargement

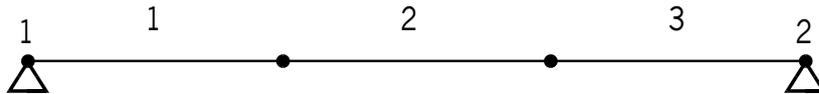
- Sous l'effet des nouvelles charges appliquées, on a une redistribution des effets de la précontrainte dans la structure. Un calcul est fait avec une seule itération. Par exemple, une poutre précontrainte déjà soumise à son poids propre, à laquelle on applique une nouvelle charge de superstructure, se déforme sous l'effet de cette nouvelle charge. Le câble de précontrainte subit une déformation supplémentaire liée à cette nouvelle charge et donc exerce une surtension additionnelle qui modifie à nouveau le diagramme de contrainte du béton.

- La description d'un phasage ne génère pas de résultats, elle se limite au stockage de la définition en base de données. C'est la commande EXEC PHASAGE qui génère les résultats.

- Un phasage doit contenir l'activation de tous les éléments qui composent la structure (pas d'activation par défaut) dans un ordre logique de construction. Par exemple, il faut activer les appuis avant les barres qui leur sont reliées.

- L'activation d'un groupe de barres simultanément dans un phasage doit respecter l'ordre de construction, c'est à dire commencer par les barres supportées avant d'activer les barres non supportées.

#### EXEMPLE : ACTIVER UN GROUPE DE BARRES



```
PHASAGE 1 'Activation correcte'
  ACTIVER APPUI 1,2
  ACTIVER BARRE 1,2
  ACTIVER BARRE 3
FIN PHASAGE
```

```
PHASAGE 1 'Activation incorrecte'
  ACTIVER APPUI 2
  ACTIVER BARRE 2,1 ### ERREUR ###
  ACTIVER BARRE 3
FIN PHASAGE
```

## 9.2 - SUITE DE PHASAGES

Un phasage peut être déclaré comme la suite d'un ou plusieurs phasages en utilisant la syntaxe suivante :

```
SUITE PHASAGE liste
```

avec :

```
liste      liste des phasages déjà exécutés
```

Un phasage peut contenir une suite non limitée d'instructions. Ceci permet en théorie de pouvoir décrire dans un seul phasage toutes les phases d'un chantier. Cependant, lorsqu'un chantier comporte plusieurs postes de travail simultanés, il est plus commode de décrire dans des phasages séparés les tâches de chaque poste.

### EXEMPLE

```
PHASAGE 1 'construction du fleau 1'  
...  
FIN PHASAGE  
PHASAGE 2 'construction du fleau 2'  
...  
FIN PHASAGE  
PHASAGE 3 'clavage des fleaux 1 et 2'  
  SUITE PHASAGE 1,2  
...  
FIN PHASAGE
```

— *Dans l'exemple ci-dessus un élément ne peut être activé à la fois dans le phasage 1 et dans le phasage 2 car cela conduirait à une ambiguïté sur l'état de l'élément lors du phasage 3.*

— *La définition d'une suite de phasage ne peut être utilisée que dans la description d'un phasage, c'est à dire entre les mots clés PHASAGE et FIN PHASAGE.*

### 9.3 - DEFINITION D'ENVELOPPES DANS UN PHASAGE

Il est possible de définir des enveloppes à l'intérieur d'un phasage de manière à prendre en compte les extrêmes des efforts, contraintes ou déplacements qui ont lieu au cours de l'exécution d'un phasage. La définition d'une enveloppe s'effectue selon la syntaxe suivante :

```
ENV i ('Titre de l''enveloppe')
( < EFFORT <N, TY, TZ, MX, MY, MZ>,
  DEPLA <DX, DY, DZ, RX, RY, RZ>,
  CONTR <VY, VZ, WY, WZ, VYVZ, VYWZ, WYVZ, WYWZ>,
  CONTRG c
  PRESS <PX, PY, PZ, MX> > )
(REAC <FX, FY, FZ, MX, MY, MZ>)
```

avec :

i                    numéro de l'enveloppe à créer

Les commandes EFFORT, DEPLA, CONTR ou REAC permettent de définir une composante privilégiée. L'enveloppe consiste à chercher les deux extrêmes de cette composante et les valeurs concomitantes des autres composantes.

Les mots clés utilisables sont :

	(EFFORT)	DEPLA	CONTR	PRESS	(REAC)
Option PLANE	n, ty, mz	dx, dy, rz	vy, wy	px, py	fx, fy, mz
Option GRILL	mx, tz, my	rx, dz, ry	vz, wz	pz, mx	fz, my
Option SPATIALE	n, ty, tz, mx, my, mz	dx, dy, dz, rx, ry, rz	vyvz, vywz, wyvz, wywz	px, py, pz	fx, fy, fz mx, my, mz

#### EXEMPLE

```
PHASAGE 1 'Exemple phasage'
ENV 1                    # enveloppe sans concomitance
ENV 2 EFFORT MZ        # enveloppe sur les efforts mz
...
FIN PHASAGE
```

— Une concomitance peut être demandée à la fois sur les réactions d'appui et sur les sections d'étude ENV i ('Titre').

— La définition d'une enveloppe de phasage ne peut être utilisée que dans la description d'un phasage, c'est à dire entre les mots clés PHASAGE et FIN PHASAGE.

La prise en compte des extrêmes au cours d'un phasage peut être interrompue pour une liste d'enveloppes par la commande :

```
DESACTIVER ENV liste
```

Des enveloppes désactivées peuvent être réactivées par la commande :

```
ACTIVER ENV liste
```

**EXEMPLE : DEFINITION D'UNE ENVELOPPE CONTENANT LES EXTREMES DE TOUTES DES PHASES DU PHASAGE 1 A L'EXCEPTION DES PHASES COMPRISES ENTRE LES DATES 180 ET 200 JOURS**

```
PHASAGE 1 'Exemple phasage'
ENV 1
...
DATE 180
DESACTIVER ENV 1
...
DATE 200
...
ACTIVER ENV 1
...
FIN
```

- *Les enveloppes prennent en compte les étapes essentielles du calcul (ETAT, DATE), elles ne prennent pas en compte les stades intermédiaires : par exemple, si on applique 2 chargements à la suite dans une même phase, sans ETAT intermédiaire, seul l'effet du cumul des 2 charges est pris en compte.*

**EXEMPLE : PHASAGE AVEC ENVELOPPE INTERMEDIAIRE**

<pre>PHASAGE 1 phasage sans intermédiaire' ENV 1 ... CHARG   BARRE 1 UNI FY 1   BARRE 1 UNI FY -1 FIN ETAT 10 ... FIN</pre>	<pre>PHASAGE 2 'phasage avec intermédiaire' ENV 2 ... CHARG BARRE 1 UNI FY 1 ETAT 5 CHARG BARRE 1 UNI FY -1 ETAT 10 ... FIN</pre>
---	---

Dans cet exemple, dans le phasage 1, l'effet de la charge est nul sur l'enveloppe 1 alors que dans le phasage 2, l'effet de la charge apparaît sur l'enveloppe 2.

## 9.4 - DEFINITION D'UNE DATE

Dans le cas où l'on désire prendre en compte l'effet du comportement à long terme des matériaux (fluage, relaxation) il est nécessaire de définir les dates des différentes phases de la construction.

La définition d'une date s'effectue selon la syntaxe :

DATE date

avec :

date nouvelle date courante du phasage exprimée en jours

### EXEMPLE : DEFINITION D'UN PHASAGE COMPORTANT UNE DEFINITION TEMPORELLE DES PHASES

```
PHASAGE 1 'construction du fleau 1'
  ACTIVER APPUI 1
  DATE 12 # nouvelle date courante
  ACTIVER BARRE 10,11 AGE 12 MODE ABS
  CHARG POIDS PROPRE 10,11
  TENDRE CABLE 101,201
  DATE 15 # nouvelle date courante
  ACTIVER BARRE 9,12 AGE 3 MODE ABS
  CHARG POIDS PROPRE 9,12
  TENDRE CABLE 102,202
  DATE 22 # nouvelle date courante
  ...
FIN
```

— *En début de phasage la date courante est 0 jour.*

— *Au cours d'un phasage la chronologie doit être croissante. Toute nouvelle date doit être supérieure à l'ancienne date courante.*

— *Dans le cas d'un chantier comportant plusieurs postes simultanés, il peut être utile de décrire chaque poste dans un phasage indépendant. Ces phasages sont ensuite rappelés dans un phasage final correspondant au clavage des tronçons déjà construits (cf. commande SUITE PHASAGE p180).*

— *La définition d'une date courante ne peut être utilisée que dans la description d'un phasage, c'est à dire entre les commandes PHASAGE et FIN PHASAGE (cf. p177).*

— *Par défaut, AGE vaut 0 (c'est à dire l'âge initial du béton) à l'activation de la barre.*

— *L'âge initial est donc indépendant de la date d'activation des barres.*

— *Pour les effets à long terme où l'on désire étudier l'évolution uniquement due aux lois de comportement du béton, il convient d'utiliser une séquence de dates progressives et non pas donner directement une date initiale et finale trop différente.*

*En effet, la loi de comportement étant non linéaire entre 2 dates, pour avoir une progression réaliste de la loi, on suggère un découpage du type :*

```
date 300
date 1000
date 3000
date 10000
date 30000
```

*plutôt que d'écrire :*

```
date 300
date 30000
```

## 9.5 - ACTIVATION ET VERINAGE D'APPUI

L'activation des appuis au cours d'un phasage s'effectue selon la syntaxe :

```
ACTIVER APPUI liste
```

Le vérinage des appuis s'effectue selon la syntaxe :

```
VERINER APPUI liste
```

avec :

```
liste      liste des appuis
```

D'une manière générale l'activation des éléments d'une structure doit se dérouler selon la logique qu'imposerait la construction réelle de cette structure. En particulier, les appuis doivent être activés avant les barres dont ils sont les supports.

Dans le cas où le nœud support de l'appui appartient déjà à la structure activée, l'appui est positionné sur la structure déformée par la commande `ACTIVER APPUI liste`.

Pour imposer un déplacement nul au nouvel appui il faut compléter l'activation par la commande `VERINER APPUI` (les déplacements des degrés de liberté actifs sont ramenés à 0).

### EXEMPLE

Soit une structure dont l'état de déformation est schématisé ci-dessous :



La commande `ACTIVER APPUI 3` place un appui sur le nœud 3 dans son état déformé.



La commande `VERINER APPUI 3` doit être ajoutée pour ramener le déplacement du nœud 3 à zéro.



*Dans un phasage, il n'y a pas d'activation par défaut. En début de phasage, la structure est vide.*

*L'activation ou la désactivation d'un élément à l'intérieur d'un phasage n'a d'effets que lors de l'exécution de ce phasage. L'état d'activation courant de la structure qui est pris en compte par la commande `EXEC CHARG` (cf. p123) n'est pas modifié.*

## 9.6 - ACTIVATION DE BARRES

L'activation des barres au cours d'un phasage s'effectue selon la syntaxe :

ACTIVER BARRE liste (AGE age) (MODE<REL,ABS>)

avec :

liste	liste des barres devant être activées
age	âge du matériau constituant la barre (cette commande ne sert que dans le cas d'un matériau vieillissant)

$\Sigma$  Par défaut, AGE vaut 0 (c'est à dire l'âge initial du béton) à l'activation de la barre.  
 S'il s'agit d'un phasage sans évolution de temps, si l'age n'est pas défini (ou si l'age vaut 0) le module d'Young du matériau sera celui d'un module instantané.  
 Dans un phasage avec évolution du temps, si la barre est affectée d'un matériau pour lequel le module E n'est pas défini directement, mais calculé par ST1, il faut définir un age strictement positif dans le cas général. Le module E calculé sera alors celui de l'age fixe.  
 Si l'on souhaite une participation réduite du béton d'une barre, il faut définir une valeur de l'age très faible de la barre, mais la valeur doit être strictement positive. Evidemment il ne faut pas charger ces barres immédiatement, sinon on risque d'avoir une instabilité numérique car la barre n'aura quasiment pas de rigidité, donc non inversible.

L'activation d'une barre peut s'effectuer suivant plusieurs modes en fonction de l'état de déformation des nœuds extrémités de la barre.

Le type d'activation est déterminé par les mots clés MODE REL (mode par défaut) et MODE ABS :

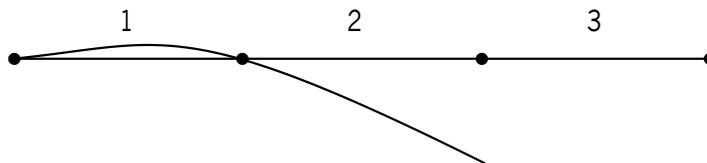
le mode relatif (MODE REL) correspond à une activation suivant le prolongement de la partie de structure déjà activée. Ce mode est généralement utilisé lors de l'activation des voussoirs prefabriqués d'un pont construit par encorbellements.

le mode absolu (MODE ABS) correspond à une activation qui rattrape la géométrie non déformée. Ce mode est généralement utilisé lors de l'activation des voussoirs coulés en place d'un pont construit par encorbellements (par exemple pour obtenir les contre flèches de construction).

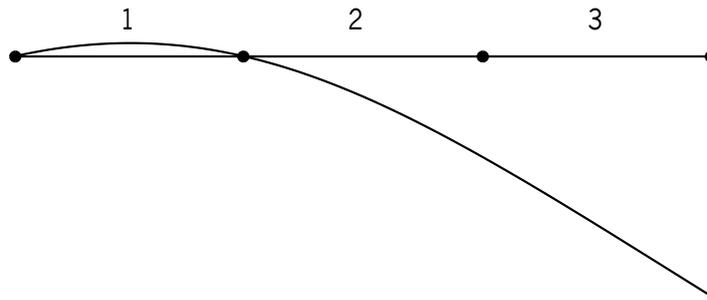
( La commande VERINER APPUI peut être aussi utile en complément de cette commande, selon le phasage de construction réel)

### EXEMPLE

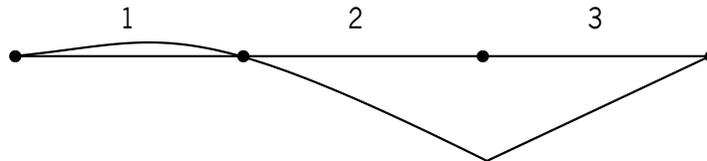
Soit la structure dans l'état de déformation suivant :



La commande ACTIVER BARRE 3 MODE REL a pour effet d'activer la barre 3 dans la configuration suivante :



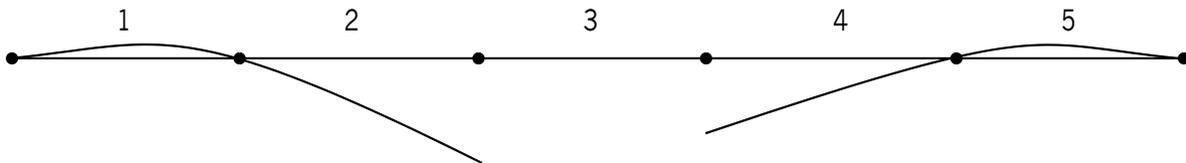
La commande `ACTIVER BARRE 3 MODE ABS` a pour effet d'activer la barre 3 dans la configuration suivante :



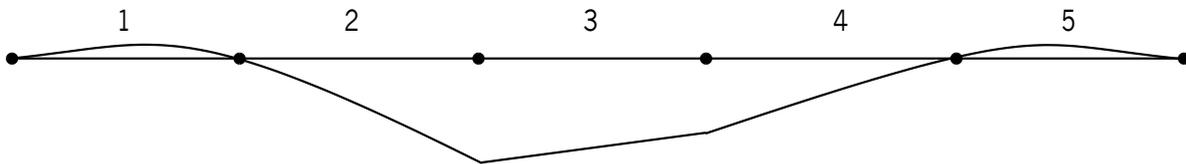
### EXEMPLE

Dans le cas où les deux extrémités de la barre sont déjà déformées, les modes relatifs et absolus sont équivalents.

Soit la structure dans l'état de déformation suivant :



Les commandes `ACTIVER BARRE 3 MODE REL` ou `ACTIVER BARRE 3 MODE ABS` ont pour effet d'activer la barre 3 dans la configuration suivante :



— Dans un phasage, il n'y a pas d'activation par défaut. En début de phasage la structure est vide.

— L'activation d'une barre ne génère pas automatiquement son poids propre. Celui-ci doit être généré par une commande de chargement (cf. commande `CHARG` p103).

### EXEMPLE : ACTIVATION DE LA BARRE 2 AVEC PRISE EN COMPTE DU POIDS PROPRE

```
PHASAGE 1
...
  ACTIVER BARRE 2
  CHARG POIDS PROPRE 2
...
FIN PHASAGE
```

— L'activation ou la désactivation d'un élément à l'intérieur d'un phasage n'a d'effets que lors de l'exécution de ce phasage. L'état d'activation courant de la structure qui est pris en compte par la commande `EXEC CHARG` (cf. p123) n'est pas modifié.

## 9.7 - DESACTIVATION DES APPUIS ET DES BARRES

La désactivation des appuis s'effectue selon la syntaxe :

```
DESACTIVER APPUI liste
```

avec :

liste liste des appuis devant être désactivées

La désactivation des barres s'effectue selon la syntaxe :

```
DESACTIVER BARRE liste
```

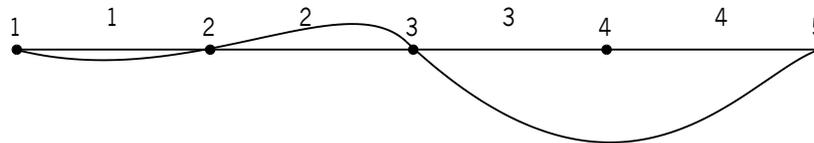
avec :

liste liste des barres devant être désactivées

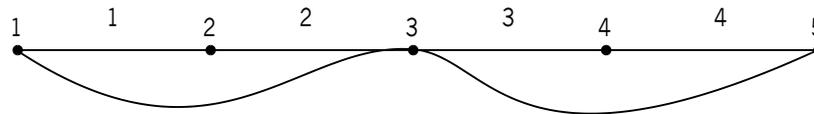
La désactivation d'un élément (appui ou barre) est équivalente à sa suppression sur la structure réelle.

### EXEMPLE

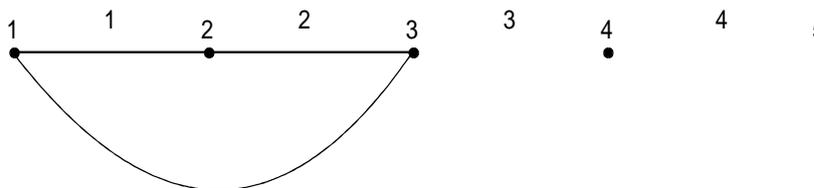
Soit une structure dont l'état de déformation est schématisé ci-dessous :



La commande `DESACTIVER APPUI 2` a pour effet de supprimer l'appui 2. La structure courante devient :



La commande `DESACTIVER BARRE 3, 4` a pour effet de supprimer la barre 3 et 4. La structure courante devient :



- *L'activation ou la désactivation d'un élément à l'intérieur d'un phasage n'a d'effet que lors de l'exécution de ce phasage. L'état d'activation courant de la structure qui est pris en compte par la commande `EXEC CHARG` (cf. p123) n'est pas modifié.*

## 9.8 - DEFINITION D'UNE SOLLICITATION DE LA STRUCTURE

La définition d'une sollicitation à l'intérieur d'un phasage s'effectue selon la syntaxe :

```
CHARG
  définition des sollicitations
FIN
ou
CHARG (définition d'une sollicitation)
```

Les instructions permettant de définir les sollicitations de la structure pendant un phasage sont identiques aux instructions de chargement. On se reportera au chapitre CHARGEMENT pour avoir le détail de ces instructions.

### EXEMPLE

```
PHASAGE 1
...
ACTIVER BARRE 2 AGE 12
CHARG POIDS PROPRE 2
...
CHARG
  BARRE 5 CON XL 0.2 REL FX 12.
  NOEUD 3 FY 0.2
...
FIN
...
FIN PHASAGE
```

## 9.9 - MISE EN TENSION DE CABLES

La mise en tension d'une liste de câbles à l'intérieur d'un phasage s'effectue selon la syntaxe :

```
TENDRE CABLE liste ((NON) INJECTE)
```

avec :

Liste            liste des câbles devant être tendus

— *Par défaut les câbles sont tendus injectés et en post tension.*

Une fois qu'un câble est tendu, la déformation d'une section dans une barre contenant le câble induit une modification de la tension du câble. Cette modification a lieu localement si le câble est injecté, et sur une longueur dépendant du coefficient de frottement du câble sur sa gaine si le câble n'est pas injecté.

### EXEMPLE

```
PHASAGE 1
```

```
...
```

```
ACTIVER BARRE 2 AGE 12
```

```
CHARG POIDS PROPRE 2
```

```
...
```

```
TENDRE CABLE 1
```

```
...
```

```
FIN PHASAGE
```

— *Le détail de la prise en compte de la précontrainte est donné dans les chapitres EFFETS INSTANTANES DE LA PRECONTRAINTES [p332](#) et EFFETS DIFFERES – CAS D'UN PHASAGE [p336](#).*

— *Dans le cas de la post-tension, le fait de tendre un câble sur une barre donne directement la situation après relâchement du câble sur la barre (la barre se contracte sous l'action du câble, mais la tension du câble est conservée (valeur de mise en tension contrôlée par l'action du vérin). Par contre les pertes instantanées (recul d'ancrage et frottement) sont appliquées immédiatement.*

L'injection des câbles après mise en tension d'une liste de câbles à l'intérieur d'un phasage s'effectue selon la syntaxe :

```
INJECTER CABLE liste
```

avec :

Liste            liste des câbles devant être injectés

— *En général, les câbles sont injectés après un changement de date après la mise en tension.*

### EXEMPLE

```
PHASAGE 2
```

```
...
```

```
DATE 1
```

```
ACTIVER BARRE 2 AGE 12
```

```
CHARG POIDS PROPRE 2
```

```
...
```

```
TENDRE CABLE 1 NON INJECTE
```

```
DATE 3
```

```
INJECTER CABLE 1
```

```
...
```

```
FIN PHASAGE
```

## 9.10 - DETENSION DE CABLES

La détension d'une liste de câbles à l'intérieur d'un phasage s'effectue par la commande :

DETENDRE CABLE liste

avec :

liste      liste des câbles devant être détendus

— *Pour pouvoir être détendu, un câble doit déjà être tendu (cf. commande TENDRE CABLE p189).*

— *Le détail de la prise en compte de la précontrainte est donné dans les chapitres EFFETS INSTANTANES DE LA PRECONTRAINTE p332 et EFFETS DIFFERES - CAS D'UN PHASAGE p336.*

## 9.11 - MISE EN TENSION SUR BANC DE CABLES DE PRETENSION

La mise sur banc d'une liste de câbles de prétension dans un phasage s'effectue selon la syntaxe :

TENDRE\_BANC CABLE liste

avec :

Liste      liste des câbles devant être tendus

— *La mise sur banc crée une tension dans le câble, mais aucun effort n'est appliqué à la liste de barres à laquelle est affectée le câble. Les pertes instantanées dues au dispositif d'ancrage au banc (pertes dues au peigne par exemple) est à calculer par l'utilisateur et à intégrer soit dans la contrainte de mise sur banc, soit dans les pertes instantanées du dispositif de précontrainte.*

## 9.12 – MISE EN PRETENSION DES BARRES PAR RELACHEMENT DU BANC

La mise en tension de poutres par prétension à partir d'une liste de câbles dans un phasage s'effectue par la commande :

```
RELACHER_BANC CABLE liste
```

avec :

liste            liste des câbles devant être relâcher du banc pour mise en prétension des poutres

— *Pour pouvoir être relâché, un câble doit déjà être tendu sur banc (cf. commande TENDRE\_BANC).*

— *Lorsque l'on relâche le banc, les câbles de précontrainte s'appliquent par prétension sur les barres concernées. Ces barres se déforment, ce qui induit une baisse de tension de la précontrainte. Idéalement, l'utilisateur devrait utiliser la section nette des barres pour avoir un résultat plus proche du résultat théorique de la déformation finale (l'écart est cependant généralement relativement faible avec le calcul habituel en section brute).*

### EXEMPLE

```
PHASAGE 1
...
DATE 1
  ACTIVER BARRE 2 AGE 0.01
  TENDRE_BANC CABLE 1,2,3
  DATE 11
  RELACHER_BANC CABLE 1,2,3
...
FIN PHASAGE
```

$\Sigma$  *Il est impératif d'activer la barre où s'applique le câble de prétension avant de tendre le câble sur banc*

$\Sigma$  *Il faut définir un age positif quasi nul à l'activation de la barre.*

$\Sigma$  *Dans le cas d'un traitement thermique, on suppose que la cure commence à l'âge 0 du béton. La valeur de résistance de fin de cure  $f_{cp}$  ne sera obtenue qu'à la date de fin de cure spécifiée dans la loi du matériau, la mise en tension ne doit se faire qu'au delà de cette date. Par ailleurs les pertes thermiques sur le câble de précontrainte sont prises en compte au relâchement du banc.*

## 9.13 - ETAT DE LA STRUCTURE

L'état des contraintes et déformations à l'intérieur d'un phasage peut être sauvegardé par :

ETAT i ('Titre de l'état')

avec :

i                    numéro de l'état

La sauvegarde de l'état des contraintes et déformations au cours d'un phasage permet d'utiliser les résultats sauvegardés pour une édition, une combinaison ou une enveloppe.

### EXEMPLE

```
PHASAGE 1 'Exemple phasage'
...
DATE 125
ACTIVER BARRE 2 AGE 3 MODE ABS
CHARG POIDS PROPRE 2
ETAT 1 'Etat 1'
DATE 130
ACTIVER BARRE 3 AGE 3 MODE ABS
CHARG POIDS PROPRE 3
ETAT 2 'Etat 2'
...
FIN PHASAGE
### EXECUTION DU PHASAGE ###
EXEC PHASAGE 1
### CREATION D'UNE ENVELOPPE CONTENANT LES ETATS 1 ET 2 ###
ENV 1 'enveloppe des états aux dates 125 et 130 jours'
    ETAT 1,2
FIN
### EDITION DES RESULTATS ###
RESU
    NOEUD BARRE APPUI ETAT 1,2
    ENV 1
FIN
```

— *D'une manière générale les résultats contenus dans un état sont homogènes aux résultats d'un chargement.*

## 9.14 - MODIFICATION D'APPUIS

La modification d'une liste d'appuis à l'intérieur d'un phasage s'effectue selon la syntaxe :

MODIFIER APPUI liste (nouvelle définition)

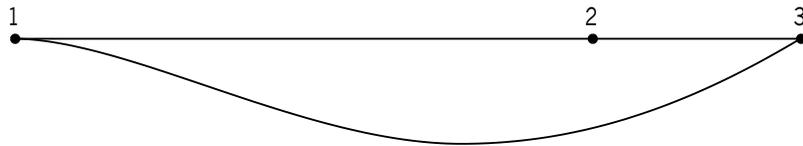
avec :

liste liste des appuis à modifier

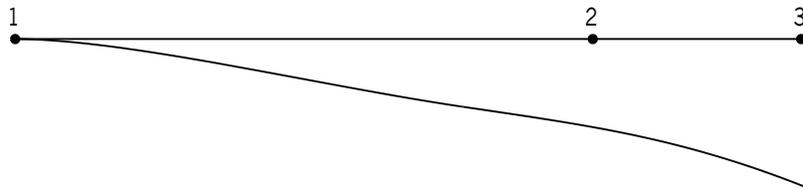
La nouvelle définition s'effectue selon la syntaxe utilisée pour la définition des appuis (cf. *commande APPUI p47*). La nouvelle définition d'appui s'applique sur la structure déformée. Pour revenir à une déformation initiale nulle, il faut compléter l'instruction par la commande VERINER APPUI.

### EXEMPLE

Soit la structure dont l'état de déformation est schématisé ci-dessous :



La commande MODIFIER APPUI 3 NOEUD 2 a pour effet de déplacer l'appui 3 sur le nœud 2 en conservant la déformation du nœud 2 :



La commande VERINER APPUI 3 a pour effet de ramener le déplacement de l'appui à 0 :



La commande MODIFIER APPUI 1 DX DY a pour effet de supprimer l'encastrement de l'appui 1 :



## 9.15 - EXECUTION DES PHASAGES

Les phasages précédemment définis sont exécutés par la commande suivante :

EXEC PHASAGE (liste)

avec :

liste      liste de numéros de phasage précédemment définis

- *Par défaut tous les phasages définis (cf. commande PHASAGE p177) seront exécutés.*
- *Un phasage défini comme la suite d'un autre phasage (cf. commande SUITE PHASAGE p180) doit être exécuté avant ce dernier.*
- *La commande EXEC PHASAGE déclenche l'appel du module exécutable contenant les procédures permettant la résolution du problème, et stocke les résultats en base de données.*
- *Dans l'instruction ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur tous les phasages définis (ceci est alors équivalent à ne pas mettre de liste).*

## 9.16 - EXECUTION DES PHASAGES AVEC POUTRES SUR RESSORT PLASTIQUE

Les phasages précédemment définis et qui comportent dans le modèle des poutres sur sols plastiques sont exécutés par la commande suivante :

EXEC PHASAGE PSE (liste)

avec :

liste      liste de numéros de phasages (par défaut tous les phasages définis (cf. commande PHASAGE) seront exécutés)

- *La commande EXEC PHASAGE PSE stocke les résultats en base de données.*
- *Dans l'instruction ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur tous les phasages définis (ceci est alors équivalent à ne pas mettre de liste).*

# 10

## DYNAMIQUE

### 10.1 - INTRODUCTION AU CALCUL DES MODES PROPRES

La définition des masses modales est définie §2.11 - masses propres (dynamique).

Les calculs de modes propres sont pris en compte uniquement à partir des nœuds de la structure, **il convient donc de discrétiser la structure avec suffisamment de nœuds pour être représentatif des modes de vibrations recherchés**. La commande *ETUDE* (cf. Domaine d'étude) n'a donc aucun effet sur les calculs de modes propres, mais uniquement sur la représentation en post traitement. Les masses modales peuvent être affectées directement aux nœuds, elles sont dans ce cas calculées par l'utilisateur. Elles peuvent aussi être générées automatiquement aux extrémités des barres, soit par une matrice diagonale (option par défaut), soit par une matrice consistante (termes croisés hors diagonale, voir formulation en annexe). A noter que l'excentrement rigide des barres est pris en compte pour l'excentrement des masses modales, les excentrement de torsion des barres ne le sont pas.

A titre d'exemple, une travée isostatique ne doit pas être modélisée en 2D par une seule barre, mais doit être découpée en une succession de barres (une dizaine par exemple) pour avoir une répartition de masse uniforme et non aux 2 extrémités du tablier, ce qui ne serait pas du tout représentatif du comportement en flexion de la travée. Il en va de même pour une pile de pont ou une culée, l'élévation de l'appui et de ses fondations doit être suffisamment discrétisée pour bien prendre en compte la répartition de masse sur la hauteur de l'appui.

Les masses doivent être exprimées en unité de masse, et donc un facteur "g\_dyn" est à introduire lors de la définition des matériaux pour convertir les poids volumiques des barres en unité de masse pour le calcul automatisé des masses propres aux nœuds.

Les modes sont normalisés vis à vis de la matrice de masse, de telle sorte que la masse généralisée d'un mode soit égale à 1.

## 10.2 - EXECUTION DES MODES PROPRES

Les calculs des modes propres sont exécutés par la commande suivante :

```
EXEC MODE (nb) (METHODE <1,2>)
```

ou

```
EXEC MODE (METHODE <1,2>) (<FREQUENCE fq, RATIO rt>) (AVANCE nm)
```

avec :

- nb Nombre de modes propres à calculer (par défaut au maximum 100 modes seront calculés)
- fq Fréquence propre de coupure (fréquence maximale à atteindre pour le dernier mode à calculer)
- rt Taux de participation modale à atteindre en pourcentage
- nm Nombre de modes propres pour l'incrément de calcul afin d'atteindre le ratio modal ou la fréquence de coupure (par défaut 10 modes)

— La commande `EXEC MODE` stocke les résultats en base de données.

— La méthode 1 est la méthode par itération inverse. Cette méthode calcule mode par mode.

— La méthode 2 est la méthode par itération du sous espace des vecteurs propres. Cette méthode est généralement plus rapide, car elle calcule les "nb" premiers modes en même temps. Elle est définie par défaut.

— Si on définit une fréquence de coupure ou un taux de participation modale, avec la méthode 2, la méthode calcule nm modes à la fois au lieu d'un seul à la fois pour la méthode d'itération inverse.

### EXEMPLE 1: CALCUL DES 5 PREMIERS MODES

```
MASSE PROPRE
  BARRE tout MASSE DI
FIN
EXEC MODE 5
```

### EXEMPLE 2: CALCUL DES MODES DE MANIERE A ATTEINDRE 70% DE LA MASSE MODALE TOTALE

```
EXEC MODE RATIO 70
```

### EXEMPLE 3: CALCUL DES MODES DE MANIERE A ATTEINDRE LA FREQUENCE DE 10HZ

```
EXEC MODE FREQUENCE 10
```

— Le nombre d'itérations pour la méthode 2 est fixé dans le fichier `st1.par` (50 par défaut).

∑ En général il est inutile d'étudier 100 modes, les 10 à 30 premiers modes sont souvent suffisants pour atteindre au moins 70-80% de la masse modale totale. Les autres modes sont très souvent des modes locaux (>20Hz).

∑ Pour améliorer la convergence (message d'avertissement dans le fichier d'erreur), on peut modifier le nombre d'itération dans le fichier `st1.par` (100 par exemple); évidemment cela a une incidence directe sur les temps de calcul. On peut ensuite modifier le nombre de modes à calculer ou l'incrément sur le nombre de modes dans le cas d'un calcul avec ratio modal.

$\Sigma$  Des problèmes de convergences numériques peuvent apparaître sur les modes supérieurs : en général, cela vient du fait que l'utilisateur a modélisé des éléments locaux trop rigides par rapport à l'ensemble de la structure. Par exemple, utiliser des éléments rigides avec des caractéristiques appropriées ( $K=E*I/L^3$ ), modifier un seul paramètre ( $E$ ,  $I$  ou  $L$ ) à la fois et pas tous les paramètres en même temps, sous peine d'avoir une rigidité en dehors des limites numériques acceptables. Autre exemple, il ne faut pas définir de sections d'efforts tranchants si l'on souhaite avoir aucune déformation au tranchant plutôt que de définir des sections avec des valeurs très élevées.

### EXEMPLE DE SORTIE DES MODES

```

--- RESULTATS DU MODE PROPRE :      1 ---
Periode                             1.0003      sec      Frequence   :   0.99972      Hz
Facteur Participation Mod             54.276
Masse Modale Generalisee             1.0000
Taux Participation Modale             84.168      %      Cumul       :   84.168      %

    ---> Direction                   1
    Taux Participation Modale         84.168      %      Cumul       :   84.168      %
    ---> Direction                   2
    Taux Participation Modale         0.0000      %      Cumul       :   0.0000      %

--- RESULTATS DU MODE PROPRE :      2 ---
Periode                             0.45755     sec      Frequence   :   2.1855      Hz
Facteur Participation Mod             18.708
Masse Modale Generalisee             1.0000
Taux Participation Modale             10.000     %      Cumul       :   94.168      %

    ---> Direction                   1
    Taux Participation Modale         10.000     %      Cumul       :   94.168      %
    ---> Direction                   2
    Taux Participation Modale         0.0000     %      Cumul       :   0.0000      %

```

$\Sigma$  Le facteur de participation modale est défini par:

$$\gamma_j = \frac{\{\Phi_j\}^t \cdot [M] \cdot \{R\}}{\{\Phi_j\}^t \cdot [M] \cdot \{\Phi_j\}} \text{ et } \{R\} \text{ vecteur unité}$$

La masse modale généralisée est normalisée à 1:

$$\tilde{M}_j = \{\Phi_j\}^t \cdot [M] \cdot \{\Phi_j\} = 1$$

La masse modale est définie par:

$$M_j = \gamma_j^2$$

La masse modale généralisée totale est:

$$M_{tot} = \{R\}^t \cdot [M] \cdot \{R\} = \sum_j M_j$$

Le taux de participation modale est :

$$\alpha_j = \frac{M_j}{M_{tot}}$$

Le cumul des taux de participation est:

$$T_n = \sum_{j=1}^n \alpha_j$$

### 10.3 - AMORTISSEMENT

La définition d'amortissement peut être **nécessaire à l'analyse spectrale ou obligatoire pour toute la structure pour l'analyse temporelle**, en particulier les charges forcées. Trois types d'amortissement sont définis: l'amortissement de Rayleigh (la matrice d'amortissement est définie proportionnellement à la masse et à la rigidité), l'amortissement modal (un coefficient d'amortissement est défini pour chaque mode), l'amortissement modal moyen calculé à partir des coefficients d'amortissement de chaque matériau et de l'énergie de déformation des éléments structuraux sous l'effet de chaque mode (EN 1998-2 §4.1.3).

L'amortissement est défini par la commande suivante :

```
AMORTISSEMENT i
<
AUTOMATIQUE MASSE alpha RIGIDITE beta,

MODE j KSI ksi j
... ,

ENERGIE KSI ksi j
>
(POND pond)
```

FIN

avec :

i	Numéro de l'amortissement
alpha, beta	Pondération de la matrice d'amortissement C selon la méthode rayleigh (alpha étant affecté à la matrice de masse M et bêta à la matrice de rigidité K)
j	Numero du mode propre
ksij	Fraction d'amortissement du mode j (Par défaut, ksij=0)
pond	Pondération appliquée sur les coefficients ksij ou alpha beta

— L'AMORTISSEMENT est affecté aux barres via la commande CONS et MAT (voir p72,p73 et p74).

— La commande AMORTISSEMENT doit être située avant la commande EXEC SPECTRE ou EXEC HISTORIQUE.

— Dans le cas de l'amortissement de Rayleigh, la matrice d'amortissement s'écrit sous la forme:

$$[C]=\text{pond}*(\text{alpha}*[M]+\text{beta}* [K])$$

La fraction d'amortissement du mode n de pulsation  $\omega_n=2\pi/T_n$  :

$$k_{sin}=\text{pond}*(\text{alpha}/(2*\omega_n)+\text{beta}*\omega_n/2)$$

— Dans le cas de l'amortissement par calcul de l'énergie de déformation, le coefficient d'amortissement modal moyen du mode j est obtenu sous la forme :

$$\tilde{\xi}_{eff,j} = \frac{\sum_k \xi_k \cdot E_{dj}^k}{\sum_k E_{dj}^k}, k \text{ représentant les sous-structures avec un amortissement } \xi_k$$

Soit  $E_{d,kj}$  l'énergie de déformation induite dans le mode j pour la sous structure "k"

Soit  $E_{dj}$  l'énergie de déformation induite dans le mode j pour toute la structure

Les résultats d'amortissement mode par mode ne sont obtenus que lorsque l'on réalise une analyse spectrale ou temporelle.

— Quelque soit le type d'amortissement sélectionné, ST1 se ramène dans tous les cas à un amortissement modal. Les valeurs de l'amortissement mode par mode peuvent être obtenus par la commande lister amortissement, mais après exécution du calcul de la réponse spectrale ou temporelle.

$\Sigma$  Pour l'analyse spectrale et temporelle, si aucun amortissement par calcul énergétique n'est précisé, un seul type d'amortissement doit être défini pour toutes les barres du modèle.

**EXEMPLE : AMORTISSEMENT DE RAYLEIGH**

```
AMORTISSEMENT 1
    AUTOMATIQUE MASSE 0.1 RIGIDITE 0.01
FIN
```

**EXEMPLE : AMORTISSEMENT PAR MODE**

```
AMORTISSEMENT 2
    MODE TOUT KSI 5
    MODE 2 a 3 KSI 3
    POND 0.01
FIN
```

**EXEMPLE : AMORTISSEMENT PAR CALCUL ENERGETIQUE DE DEFORMATION**

```
AMORTISSEMENT 3
    ENERGIE KSI 2
    POND 0.01
FIN
```

## 10.4 - SPECTRE D'ACCELERATION

Les spectres d'accélération sont définis par la commande suivante :

```
SPECTRE isp
  (POND pond)
  (BETA beta)
  <ACCELERATION
    PERIODE tj AX axj AY ayj (AZ azj)
    ...
  EUROCODE
    <HORIZONTAL(<X,Y>), VERTICAL> AX ax (S s) (ST st) (ALPHA alpha)...
    ... (ETA eta) PERIODE tb tc td te

  EUROCODE REDUIT
    <HORIZONTAL(<X,Y>),VERTICAL> AX ax (S s) (ST st) (ALPHA alpha)...
    ... (GAMMA gamma) (Q q) (BETA beta0) PERIODE tb tc td te
  ...
>
FIN
```

avec :

isp	Numéro du spectre
beta	Angle en radian dans le plan horizontal de l'axe local Ox par rapport à la direction Ox du repère global (uniquement en option spatiale). Par défaut beta = 0
tj	Période j en seconde
axj, ayj, azj	Accélérations associées à la période tj dans la direction des axes locaux
ax	Accélérations Ag dans la direction associée (par défaut, ax=0)
s	Parametre de sol S, (par default, s = 1 )
st	Coefficient d'amplification topographique (par défaut, st=1)
alpha	Coefficient réglementaire (par défaut alpha =2.5 en horizontal et 3 en vertical pour le spectre Eurocode SE et alpha =2.5 pour le spectre Eurocode SD réduit) EN1998-1
eta	Coefficient de correction de l'amortissement (par défaut eta=1.00)
tb,tc,td, te	Périodes du spectre reglementaire EN1998-2 (sec) ( $0 \leq tb \leq tc \leq td < te$ )
pond	Ponderation à appliquer aux accélérations ax, ay et az
beta0	Coefficient correspondant à la limite inférieure du spectre de calcul Eurocode SD. Par défaut beta0 = 0,2
gamma	Coefficient. Par défaut gamma = 2/3
q	Coefficient de comportement. Par défaut q = 1,0

— *Le spectre interpole les valeurs d'accélération pour les valeurs de période définie par l'utilisateur et prend la valeur limite en dehors*

**EXEMPLE : SPECTRE GENERIQUE**

```

SPECTRE 1
  BETA 0.1
  POND 9.81
  ACCELERATION
    PERIODE 0    AX 0.1 AY 0.1 AZ 0.01
    PERIODE 0.5  AX 0.5 AY 0.5 AZ 0.2
    PERIODE 1    AX 0.1 AY 0.1 AZ 0.01
    PERIOD 2     AX 0.0 AY 0.0 AZ 0.00
  FIN

```

**EXEMPLE : SPECTRE EUROCODE SE**

```

SPECTRE 2
  BETA 0.0
  POND 9.81
  EUROCODE
    HORIZONTAL X AX 0.5 S 1 ST 1.2 PERIODE 0.03 0.2 2.5 4
    HORIZONTAL Y AX 0.5 S 1 ST 1.2 PERIODE 0.03 0.2 2.5 4
    VERTICAL AX 0.25 ST 1.1 PERIODE 0.03 0.2 2.5 4
  FIN

```

Pour le spectre  $S_e$  Eurocode (EN 1998-1§3.2.2.2 et EN 1998-1§3.2.2.3), les accélérations "Se" aux sols en fonction de la période T sont fournies par les équations suivantes:

- Spectre horizontal (EN 1998-1§3.2.2.2):

$$0 \leq T \leq T_B: \quad S_e(T) = a_x \cdot S \cdot S_t \cdot \left[ 1 + \frac{T}{T_B} (\alpha \cdot \eta - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_c: \quad S_e(T) = a_x \cdot S \cdot S_t \cdot \alpha \cdot \eta$$

$$T_c \leq T \leq T_D: \quad S_e(T) = a_x \cdot S \cdot S_t \cdot \alpha \cdot \eta \cdot \frac{T_c}{T}$$

$$T_D \leq T \leq T_E: \quad S_e(T) = a_x \cdot S \cdot S_t \cdot \alpha \cdot \eta \cdot \frac{T_c \cdot T_D}{T^2}$$

- Spectre vertical (EN 1998-1§3.2.2.3):

$$0 \leq T \leq T_B: \quad S_e(T) = a_x \cdot S_t \cdot \left[ 1 + \frac{T}{T_B} (\alpha \cdot \eta - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_c: \quad S_e(T) = a_x \cdot S_t \cdot \alpha \cdot \eta$$

$$T_c \leq T \leq T_D: \quad S_e(T) = a_x \cdot S_t \cdot \alpha \cdot \eta \cdot \frac{T_c}{T}$$

$$T_D \leq T \leq T_E: \quad S_e(T) = a_x \cdot S_t \cdot \alpha \cdot \eta \cdot \frac{T_c \cdot T_D}{T^2}$$

Le spectre  $S_e$  est ensuite modifié en fonction de l'amortissement  $\xi$  de chaque mode:

$$\eta = \max \left[ 0.55; \sqrt{10/(5 + \xi)} \right]$$

Ceci suppose donc que le spectre  $S_e$  est un spectre défini avec 5% d'amortissement.

NB: La pondération (pond) est appliquée en plus sur  $S_e$ .

**EXEMPLE : SPECTRE EUROCODE REDUIT SD**

```

SPECTRE 2
  BETA 0.0
  POND 9.81
  EUROCODE REDUIT
    HORIZONTAL X AX 0.5 S 1 ST 1 Q 1.0 BETA 0.2 PERIODE 0.03 0.2 2.5 5
    HORIZONTAL Y AX 0.5 S 1 ST 1 Q 1.0 BETA 0.2 PERIODE 0.03 0.2 2.5 5
    VERTICAL AX 0.25 ST 1 Q 1.0 BETA 0.2 PERIODE 0.03 0.2 2.5 5
FIN

```

Pour le spectre de calcul Sd Eurocode (EN 1998-1§3.2.2.5), les accélérations "Sd" aux sols en fonction de la période T sont fournies par les équations suivantes:

- Spectre horizontal :

$$0 \leq T \leq T_B: S_d(T) = a_x \cdot S \cdot S_T \cdot \left[ \gamma + \frac{T}{T_B} \left( \frac{\alpha}{q} - \gamma \right) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_c: S_d(T) = a_x \cdot S \cdot S_T \cdot \frac{\alpha}{q}$$

$$T_c \leq T \leq T_D: S_d(T) = \max \left( a_x \cdot S \cdot S_T \cdot \frac{\alpha}{q} \cdot \frac{T_c}{T}; \beta \cdot a_x \right)$$

$$T_D \leq T \leq T_E: S_d(T) = \max \left( a_x \cdot S \cdot S_T \cdot \frac{\alpha}{q} \cdot \frac{T_c \cdot T_D}{T^2}; \beta \cdot a_x \right)$$

- Spectre vertical :

$$0 \leq T \leq T_B: S_d(T) = a_x \cdot S_T \cdot \left[ \gamma + \frac{T}{T_B} \left( \frac{\alpha}{q} - \gamma \right) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_c: S_d(T) = a_x \cdot S_T \cdot \frac{\alpha}{q}$$

$$T_c \leq T \leq T_D: S_d(T) = \max \left( a_x \cdot S_T \cdot \frac{\alpha}{q} \cdot \frac{T_c}{T}; \beta \cdot a_x \right)$$

$$T_D \leq T \leq T_E: S_d(T) = \max \left( a_x \cdot S_T \cdot \frac{\alpha}{q} \cdot \frac{T_c \cdot T_D}{T^2}; \beta \cdot a_x \right)$$

NB: La pondération (pond) est appliquée en plus sur Sd.

— Si l'on souhaite étendre le seuil Sd décrit entre Tb et Tc à une période nulle, il suffit d'imposer Tb=0

## 10.5 - REPONSE SPECTRALE

Les spectres d'accélération peuvent être combinés selon les modes soit par combinaisons quadratiques dite SRSS, soit par la méthode dite CQC, soit de manière linéaire (LIN). Ils sont définis par la commande suivante :

```
SPECTRE ic REPONSE
  SPECTRE isp
  <LIN, SRSS, CQC>
  (POND X pondx Y pondy (Z pondz))
FIN
```

avec :

ic	Numéro de la reponse spectrale
isp	Numéro du spectre
pondx, pondy,	Pondérations sur les composantes locales x et y du spectre en option plane et
pondz	x, y et z en option spatiale (Par défaut, les pondérations valent 0.0)

$\Sigma$  La commande CQC impose la définition préalable d'un amortissement dans les barres.

### EXEMPLE : REPONSE SPECTRALE CQC DANS CHAQUE DIRECTION

```
SPECTRE 10 REPONSE          SPECTRE 1          SPECTRE 1
  SPECTRE 1                  CQC                  CQC
  CQC                        POND Y 1                POND Z 1
  POND X 1                   FIN                      FIN
FIN
```

```
                                SPECTRE 30 REPONSE
SPECTRE 20 REPONSE
ENV 1 COMB
  SPECTRE 10 +1 -1
  SPECTRE 20 +1 -1
  SPECTRE 30 +1 -1
FIN
```

Dans ce dernier exemple, les 3 directions sont combinées de manière linéaire, mais chaque direction est combinée quadratiquement avec les modes:

$$E = E_x + E_y + E_z$$

### EXEMPLE : REPONSE SPECTRALE SRSS SUR LES DIFFERENTES COMPOSANTES

```
SPECTRE 100 REPONSE
  SPECTRE 1
  SRSS
  POND X 1 Y 1 Z 1
FIN
```

Dans ce dernier exemple, les 3 directions sont combinées de manière quadratique :

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

$\Sigma$  Les effets E et Ei sont définis comme des cas de charges, et pas comme des enveloppes. (voir exemple p303)

## 10.6 - EXECUTION DES REPONSES SPECTRALES

Les calculs des réponses spectrales sont exécutés par la commande suivante :

```
EXEC SPECTRE REPONSE list
```

avec :

`list` Liste des numéros de réponses spectrales pour analyse spectrale

- *La commande EXEC SPECTRE REPONSE stocke les résultats en base de données. Elle nécessite que la commande EXEC MODE soit déjà été exécutée et la définition préalable de réponse spectrale et éventuellement d'un amortissement.*

### EXEMPLE : CALCUL DES REPONSES SPECTRALES

```
EXEC SPECTRE REPONSE 10,20, 30
```

- *La réponse spectrale est un cas de charge dynamique, pas une enveloppe. Pour avoir un effet enveloppe de la réponse spectrale, il faut créer une enveloppe avec des pondérations +/-1.*

## 10.7 - ACCELEROGRAMME (ST1 V2 SEULEMENT)

Une analyse temporelle linéaire élastique est possible à condition de définir un historique d'accélération au sol.

Les accélérogrammes sont définis par la commande suivante :

```
ACCELEROGRAMME j
( < EFFORT <N, TY, TZ, MX, MY, MZ>,
  DEPLA <DX, DY, DZ, RX, RY, RZ>,
  CONTR <VY, VZ, WY, WZ, VYVZ, VYWZ, WYVZ, WYWZ>,
  CONTRG ic
  PRESS <PX, PY, PZ, MX> > )
(REAC <FX, FY, FZ, MX, MY, MZ>)
(METHODE < (1), 2, 3 (ALPHA alpha )>)
(PAS_TEMPS pas_temps)
(POND pond)
(BETA beta)
(ACCELERATION
  AX axj AY ayj (AZ azj)
  ...
)
```

FIN

avec :

j	Numéro de l'accélérogramme
alpha	Coefficient pour la méthode 3 dite HHT-alpha. sa valeur est comprise entre 0 et -0.3.(Par défaut elle vaut 0).
Pas_temps	Pas de temps de l'accélérogramme en seconde
pond	Pondération à appliquer aux accélérations ax, ay et az (Par défaut elle vaut 1).
beta	Angle en radian dans le plan horizontal de l'axe local Ox de l'accélération au sol par rapport à la direction Ox du repère global (uniquement en option spatiale) Par défaut beta = 0
axj, ayj, azj	Accélérations au sol dans la direction des axes locaux horizontaux Ox, Oy et vertical Oz

### EXEMPLE : ACCELEROGRAMME

```
ACCELEROGRAMME
  PAS_TEMPS 0.01
  POND 9.81
  ACCELERATION
    AX 0.1 AY 0.1 AZ 0.01
    AX 0.5 AY 0.5 AZ 0.2
    AX 0.1 AY 0.1 AZ 0.01
FIN
```

— *Trois méthodes d'analyse temporelle sont possibles par intégration temporelle des équations du mouvement:*

*La méthode 1 est la méthode d'intégration de Newmark avec accélération moyenne (c'est la méthode par défaut, généralement recommandée)*

*La méthode 2 est la méthode d'intégration de Newmark avec accélération linéaire*

*La méthode 3 est la méthode d'intégration dite HHT ALPHA décrite par P Paulre pour tenir compte d'un amortissement numérique si nécessaire. Elle nécessite l'introduction d'un coefficient alpha compris entre 0 et -0.3. Pour la valeur 0, cette méthode dégénère en méthode de Newmark avec accélération moyenne.*

$\Sigma$  Le pas de temps doit être suffisamment petit pour que l'analyse temporelle donne des résultats admissibles (en général, il faut un pas de temps dont la durée soit inférieure 40 fois la période propre la plus courte à prendre en compte du modèle étudiée.

— Une concomitance peut être définie pour un historique. Elle servira pour le calcul d'enveloppe.

## 10.8 - EXECUTION DE L'ANALYSE TEMPORELLE POUR UN ACCELEROGRAMME (ST1 V2 SEULEMENT)

Une analyse temporelle linéaire élastique est possible pour l'étude du déplacement des noeuds, à condition d'avoir défini au préalable des masses dynamiques aux noeuds et un historique d'accélération au sol. **Un amortissement dans les barres doit être défini.** Il n'y a pas d'analyse temporelle des sections d'études. Par contre **l'étude des efforts et déplacements pour toutes les barres en début et fin est nécessaire pour la visualition graphique.**

L'analyse temporelle est exécutée par la commande suivante :

EXEC HISTORIQUE (TEMPS <OUI, NON>) (lstj)

avec :

lstj Liste des numéros d'accélérogramme à prendre en compte pour l'analyse temporelle (par défaut tous les accélérogrammes déjà définis avant la commande seront calculés)

— La commande EXEC HISTORIQUE stocke les résultats en base de données.

$\Sigma$  L'option TEMPS permet de conserver en base de données tous les résultats intermédiaires à chaque pas de temps en base de données. Pour limiter le stockage, il est possible de supprimer ce stockage (TEMPS NON), seuls les résultats enveloppes sont conservés. Par défaut tous les résultats sont conservés (TEMPS OUI).

### EXEMPLE : ANALYSE TEMPORELLE

...

EXEC HISTORIQUE 10

## 10.9 – HISTORIQUE CONVOI (ST1 V2 SEULEMENT)

Une analyse temporelle linéaire élastique est possible si l'on définit les paramètres d'historique d'un convoi.

Les paramètres d'historique de convois sont définis par la commande suivante :

```
DYNAMIQUE CONVOI j
( < EFFORT <N, TY, TZ, MX, MY, MZ>,
  DEPLA <DX, DY, DZ, RX, RY, RZ>,
  CONTR <VY, VZ, WY, WZ, VYVZ, VYWZ, WYVZ, WYWZ>,
  CONTRG ic
  PRESS <PX, PY, PZ, MX> > )
(REAC <FX, FY, FZ, MX, MY, MZ>)
(METHODE < (1), 2, 3 (ALPHA alpha )>)
CONVOI      numc
PAS_TEMPS pas_temps
VITESSE vitesse
TEMPS temps
(POND pond)
```

FIN

avec :

j	Numéro d'analyse dynamique de convoi
numc	Numéro de convoi
alpha	Coefficient pour la méthode 3 dite HHT-alpha. Sa valeur est comprise entre 0 et -0.3.(Par défaut elle vaut 0).
Pas_temps	Pas de temps de l'analyse dynamique en secondes
temps	Temps d'analyse en secondes
vitesse	Vitesse de déplacement du convoi dans l'unité de longueur du projet /seconde
pond	Pondération à appliquer aux charges du convoi (Par défaut elle vaut 1).

### EXEMPLE :

```
DYNAMIQUE CONVOI 100
CONVOI 12
PAS_TEMPS 0.05
VITESSE 1
TEMPS 30
FIN
```

— *Trois méthodes d'analyse temporelle sont possibles par intégration temporelle des équations du mouvement:*

*La méthode 1 est la méthode d'intégration de Newmark avec accélération moyenne (c'est la méthode par défaut, généralement recommandée).*

*La méthode 2 est la méthode d'intégration de Newmark avec accélération linéaire.*

*La méthode 3 est la méthode d'intégration dite HHT ALPHA décrite par P Paultre pour tenir compte d'un amortissement numérique si nécessaire. Elle nécessite l'introduction d'un coefficient alpha compris entre 0 et -0.3. Pour la valeur 0, cette méthode dégénère en méthode de Newmark avec accélération moyenne.*

$\Sigma$  *Le convoi doit avoir été défini par ailleurs, mais avec les restrictions suivantes: seuls les paramètres suivants sont pris en compte: 1 seul camion centré sur les barres du tablier (les zones transversales du tablier et les positions transversales des roues ne sont pas prises en considération, par contre les dimensions des impacts longitudinaux et les coefficients directeurs du convoi le sont). Le camion doit être défini en unité de force (cas général) et non de masse.*

## 10.10 - EXECUTION DE L'ANALYSE TEMPORELLE POUR UN CONVOI (ST1 V2 SEULEMENT)

Une analyse temporelle linéaire élastique est possible pour l'étude du déplacement des noeuds, à condition d'avoir défini au préalable des masses dynamiques aux noeuds et les paramètres d'un historique de convoi. **Un amortissement dans les barres doit être défini.** Il n'y a pas d'analyse temporelle des sections d'études. Par contre **l'étude des efforts et déplacements pour toutes les barres en debut et fin est nécessaire pour la visualition garphique**

L'analyse temporelle est exécutée par la commande suivante :  
EXEC HISTORIQUE (TEMPS <OUI, NON>) CONVOI(lstj)

avec :

lstj Liste des numéros de convois à prendre en compte pour l'analyse temporelle (par défaut tous les convois déjà définis avant la commande seront calculés)

— *La commande EXEC HISTORIQUE CONVOI stocke les résultats en base de données.*

$\Sigma$  *L option TEMPS permet de conserver en base de données tous les résultats intermédiaires à chaque pas de temps en base de données. Pour limiter le stockage, il est possible de supprimer ce stockage (TEMPS NON), seuls les résultats enveloppes sont conservés. Par défaut tous les résultats sont conservés (TEMPS OUI).*

### EXEMPLE : ANALYSE TEMPORELLE POUR UN CONVOI

```

...
TABLIER
  barre 101 a 119
FIN

CONV 12 'convoi 12'
  DIR GLO FX 1 FZ -1
  essieu
    1 xl 0.00 yl 0 poids 100.00 impact 0.2 0.1
    2 xl 10.00 yl 0 poids 100.00 impact 2.0 0.1
FIN

DYNAMIQUE CONVOI 100
  convoi 12
  methode 1
  pas_temps 0.05
  vitesse 5
  temps 400
  pond 1
FIN

EXEC HISTORIQUE CONVOI 100

```

## 10.11 – HISTORIQUE DE CHARGE FORCEE (ST1 V2 SEULEMENT)

Une analyse temporelle linéaire élastique avec charge forcée est possible si l'on définit les paramètres de la commande décrite dans ce paragraphe. Elle s'applique par exemple pour la dynamique des passerelles: elle consiste à solliciter la structure par un chargement de poids linéique uniforme définie par l'utilisateur. Le poids est pondéré par le signe de la déformée du mode selectionné selon la composante choisie (direction de l'action).

La charge est aussi pondérée par une pulsation temporelle sinsusoidale de la forme  $\sin(w_0*t)$  dans le cas par défaut, et dans le cas général sous la forme :

$\text{coeff1}*\sin(w_0*t+\text{phi1})+\text{coeff2}*\sin(w_0*t+\text{phi2})+\dots$

- Si aucune fréquence  $f_0$  n'est spécifiée par l'utilisateur, la pulsation  $w_0$  temporelle est celle du mode selectionné  $nm$ .
- Si une fréquence  $f_0$  est spécifiée, la pulsation temporelle est  $w_0=2.\pi.f_0$

Les paramètres d'historique de charge forcée sont définis par la commande suivante :

```
DYNAMIQUE CHARGE j
( < EFFORT <N, TY, TZ, MX, MY, MZ>,
  DEPLA <DX, DY, DZ, RX, RY, RZ>,
  CONTR <VY, VZ, WY, WZ, VYVZ, VYWZ, WYVZ, WYWZ>,
  CONTRG ic
  PRESS <PX, PY, PZ, MX> > )
(REAC <FX, FY, FZ, MX, MY, MZ>)
(METHODE < (1), 2, 3 (ALPHA alpha)>)
PAS_TEMPS pas_temps
TEMPS temps
MODE nm
(FREQUENCE f0)
(PHI lstphi)
(COEF lstcoef)
BARRE lstb (FX fx) (FY fy) (FZ fz) (MX mx) (MY my) (MZ mz) (GLO, LOC)
...
FIN
```

avec :

j	Numéro de charge forcée
alpha	Coefficient pour la méthode 3 dite HHT-alpha. Sa valeur est comprise entre 0 et -0.3.(Par défaut alpha vaut 0).
Pas_temps	Pas de temps de l'analyse dynamique en secondes
temps	Temps d'analyse en secondes
f0	Fréquence de pulsation imposée (Hz), optionnel
lstphi	Liste de déphasage (rad), optionnel (Par défaut lstphi vaut phi1=0)
lstcoef	Liste de coefficient (-), optionnel (Par défaut lstcoef vaut coeff1=1)
nm	Numéro du mode propre imposé
lstb	Liste des barres où s'appliquent les actions
fx, fy, fz,	Densité linéique de charge (force ou couple) par direction appliquée sur la
mx, my, mz	liste de barres lstb dans le repère global par défaut

— La densité de charge massique doit être définie en unité de poids = masse \* g ramenée au ml. Le poids est redistribué aux nœuds de la barre pour le calcul dynamique.

— Trois méthodes d'analyse temporelle sont possibles par intégration temporelle des équations du mouvement :

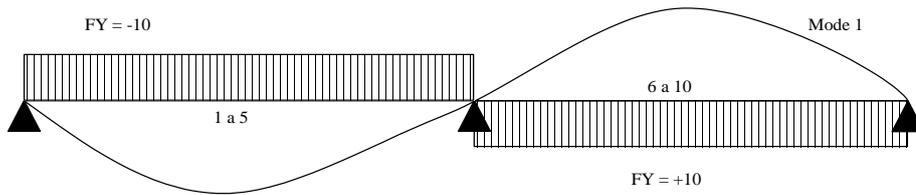
La méthode 1 est la méthode d'intégration de Newmark avec accélération moyenne (c'est la méthode par défaut, généralement recommandée)

La méthode 2 est la méthode d'intégration de Newmark avec accélération linéaire

La méthode 3 est la méthode d'intégration dite HHT ALPHA décrite par P Paulre pour tenir compte d'un amortissement numérique si nécessaire. Elle nécessite l'introduction d'un coefficient alpha compris entre 0 et -0.3. Pour la valeur 0, cette méthode dégénère en méthode de Newmark avec accélération moyenne.

#### EXEMPLE STRUCTURE 2 TRAVEES : CHARGE FORCEE POUR LE MODE 1

```
DYNAMIQUE CHARGE 100
PAS_TEMPS 0.05
TEMPS 500
MODE 1
BARRE 1 a 10 FY +10
FIN
```



Sur l'exemple précédent, la charge est repondérée par le signe de la déformée du mode 1.

## 10.12 - EXECUTION DE L'ANALYSE TEMPORELLE POUR UNE CHARGE FORCEE (ST1 V2 SEULEMENT)

Une analyse temporelle linéaire élastique pour une passerelle est possible pour l'étude du déplacement des noeuds, à condition d'avoir défini au préalable des masses dynamiques aux noeuds, d'avoir réalisé un **calcul de mode propre avec un nombre de modes propres suffisant** (c'est à dire jusqu'au numéro du mode demandé pour la charge forcée) et les paramètres dynamiques pour un historique de charge forcée. Un **amortissement de la structure pour toutes les barres doit être défini**, sinon sans amortissement numérique la structure risque d'entrer en résonance. Il n'y a pas d'analyse temporelle des sections d'études. Par contre **l'étude des efforts et déplacements pour toutes les barres en debut et fin est nécessaire pour la visualition graphique**.

L'analyse temporelle est exécutée par la commande suivante :  
EXEC HISTORIQUE (TEMPS <OUI, NON>) CHARGE (lstj)

avec :

lstj Liste des numéros de charges à prendre en compte pour l'analyse temporelle (par défaut tous les historiques de charges forcées déjà définis avant la commande seront calculés)

— *La commande EXEC HISTORIQUE CHARGE stocke les résultats en base de données.*

$\Sigma$  *L option TEMPS permet de conserver en base de données tous les résultats intermédiaires à chaque pas de temps en base de données. Pour limiter le stockage, il est possible de supprimer ce stockage (TEMPS NON), seuls les résultats enveloppes sont conservés. Par défaut tous les résultats sont conservés (TEMPS OUI).*

### EXEMPLE : ANALYSE TEMPORELLE POUR UNE CHARGE FORCEE

...  
EXEC HISTORIQUE CHARGE 100



# 11

## MODES CRITIQUES FLAMBEMENT LINEAIRE ELASTIQUE

### 11.1 - MODES CRITIQUES DE FLAMBEMENT LINEAIRE ELASTIQUE

Les calculs des modes critiques de flambement lineaire élastique (flambement d'Euler) sont obtenus à partir de la rigidité géométrique KG de la structure: la résolution des modes critiques de flambement linéaire élastique est basée sur la même méthode de résolution que celle des modes propres en substituant la matrice de masse par la matrice de rigidité géométrique, cette résolution est donc fournie en complément des modes propres de la dynamique (voir bibliographie dynamique en annexe: Paultre).

Les modes critiques sont obtenus par résolution itératives des modes propres critiques  $\Phi$  :

$$[K - KG(Nfix)] \Phi = Ac * [KG(Nvar)] \Phi$$

Aucune donnée supplémentaire n'est requise que celle déjà requise pour la matrice de rigidité classique. La commande *ETUDE* (cf. Domaine d'étude) n'a aucun effet sur les calculs de modes critiques. Comme pour la partie dynamique, la discrétisation de la structure a une grande importance sur la précision des résultats.

### 11.2 - EXECUTION DES CHARGES CRITIQUES DE FLAMBEMENT

Les calculs des modes de flambement élastique sont exécutés par la commande suivante :

```
EXEC FLAMBEMENT (nb) (METHODE <1,2>) (CTE <CHARG,COMB,ETAT,PHASAGE i>) (VAR <CHARG,COMB,ETAT,PHASAGE j>)
```

avec :

nb      Nombre de modes critiques de flambement linéaires à calculer (par défaut 2 modes seront calculés)

—      *La commande EXEC FLAMBEMENT calcule les modes et stocke les résultats en base de données.*

—      *La méthode 1 est la méthode par itération inverse. La méthode 2 est la méthode par itération du sous espace des vecteurs propres. Elle est définie par défaut.*

—      *La charge, combinaison, état ou phase "i" défini par l'utilisateur correspond à l'état de la structure pour lesquels on souhaite prendre en compte un effort normal (dite composante statique) dans les barres (Par exemple les charges permanentes).*

—      *La charge, combinaison, état ou phase "j" défini par l'utilisateur correspond à l'état de la structure pour lesquels on souhaite prendre en compte un effort normal (dite composante variable) à amplifier dans les barres (Par exemple, une charge d'exploitation modélisée par un cas de charge spécifique).*

∑      *Les cas de charges dit statique ou variable doivent avoir été calculé au préalable.*

$\Sigma$  Au lieu d'étudier  $[K] x = Nc * [KG(N=1)]x$ , on étudie  $[K - KG(Ni)]x = Ac * [KG(Nj)]x$   
 Si l'on ne souhaite pas présolliciter la structure, il suffit d'appliquer une charge 0 pour la composante fixe . Si on met une charge 0 sur la composante variable, ST1 considère un effort normal uniforme de compression des barres.

$\Sigma$  Il est possible de prendre en compte l'effet du raidissage par traction des cas de charges appliqués ( $Ni$ ,  $Nj$ ) (attention car il peut rigidifier excessivement la structure dans les parties tendues et induire des problèmes de convergence numérique). Il suffit de modifier le code correspondant dans le fichier paramètre st1.par. Par défaut l'effort de traction du aux charges appliquées n'est pas pris en compte.

#### EXEMPLE: CALCUL DU PREMIER MODE CRITIQUE DE FLAMBEMENT

```
EXEC FLAMBEMENT VAR CHARG 1
```

Dans cet exemple, la composante variable à amplifier pour atteindre la charge critique est la charge 1.

# 12

## CALCUL AU FEU (ST1 V2 SEULEMENT)

### 12.1 – CALCUL AU FEU

L'eurocode EN1992-1-2 (Calcul des structures béton-Calcul du comportement au feu) est introduit pour prendre en compte les charges d'incendie sur les structures en béton. On étudie l'effet d'un incendie sur les fibres d'un élément de poutre.

Ces éléments sont de section rectangulaire en 2D ou quelconque en 3D.

Une structure préchargée (par une charge combinée statique, généralement les charges permanentes) est soumise au feu et une résolution quasi statique et itérative est appliquée selon une méthode de Newtown Raphson (avec rigidité sécante et tangente).

La **sollicitation thermique au feu est un gradient thermique appliquée à la section**, elle engendre une flexion selon l'axe de flexion principal de l'élément étudié.

Le calcul est limité à l'option plane et spatiale (il n'est pas disponible en option grille).

L'effet thermique sur la précontrainte est également modélisé, sous réserve de partir des tensions finales du chargement à froid (c'est-à-dire après déformation élastique à froid). Il est tenu compte de surtension induite par les chargements et par les dilatations thermiques du béton. La détention induite par la dilatation thermique du câble est aussi prise en compte.

L'analyse au feu est **inélastique**, les caractéristiques des **barres non armées soumises au feu ne reprennent pas la traction** par défaut, elles peuvent donc devenir instables si elles ne sont pas entièrement comprimées.

La **structure doit être discrétisée** suffisamment finement, pour avoir une représentation correcte du phénomène de structure soumise au feu. En effet le calcul s'effectue en tenant compte de la déformation moyenne de toute la barre sans sous-discrétisation. Ainsi une travée doit être découpée en plusieurs barres et non une seule barre. (voir aussi annexe B5 – Calcul au feu). Des conseils pour la 1ère utilisation sont préconisés en annexe (§Conseils pour l'utilisation du calcul au feu).

## 12.2 – MATERIAU : COMPLEMENTS FEU

La commande décrite au paragraphe 3.3 - définition d'un matériau (p74) est complétée par les commandes suivantes :

La définition d'un matériau permet une description complète des constantes physiques des barres.

La définition d'un matériau pour le calcul au feu s'effectue selon la syntaxe suivante :

```
MAT i ('Titre du matériau')
  E FEU EC2 (<MPA, TM2, KNM2>) FCK fck (TRACTION <OUI, NON>)
  (UU uu)
  (CONDUCTIVITE <conduc, EC2 (<AN <NORMAL, BHP>, alpha>))
  (GRANULAT <SILICE, CALCAIRE>)
  (EMISSIVITE em)
  (RHO_FEU rho_feu (<EC2, CTE>))
  (CHALEUR_SPECIFIQUE_MASSIQUE chalm)
FIN
```

avec :

fck	Résistance caractéristique du béton en compression à 20°(en MPa)
uu	Teneur en eau, rapport entre le poids de l'eau et le poids du béton (0 par défaut, entre 0 et 1, en général entre 0 à 0.03)
conduc	Conductivité thermique constante du béton (en W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
alpha	Ratio (valeur entre 0 et 1) entre les conductivités limites de de l'EN1992-1-2 §3.3.3 (1 par défaut, c'est à dire la conductivité inférieure)
em	Emissivité de surface pour le calcul du transfert thermique par rayonnement (0,7 par défaut conformément à l'EN1992-1-2 §2.2)
rho_feu	Masse volumique pour le calcul au feu en kg/m <sup>3</sup> (2300 kg/m <sup>3</sup> par défaut). Ne se substitue pas au poids volumique ro
chalm	Chaleur spécifique massique constante du béton (en J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )

**∑** *L'unité de longueur de référence est le mètre : il est indispensable de travailler en mètre pour faire les calculs au feu.*

— *Lors du calcul au feu, la résistance caractéristique  $f_{ck}$  en compression est évaluée en fonction de la température avec  $f_{c\theta}$  interpolée à partir des valeurs du Tableau 3.1 de l'EN1992-1-2 § 3.2.2.1. La résistance caractéristique en compression intervient dans le calcul du module d'Young à chaud.*

*Normalement il n'y a pas lieu d'envisager une valeur de résistance en compression (et donc de module d'Young) indépendante de la température pour une section exposée au feu, y compris dans le cadre d'une analyse au feu simplifiée*

— *Lors du calcul au feu, le module d'Young du béton est évalué en fonction de la température à partir de la relation contrainte / déformation de l'EN1992-1-2 § 3.2.2.1 :*

$$\sigma(\theta, \varepsilon) = \frac{3 \varepsilon f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \left( 2 + \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)}$$

*Le module d'Young considéré à la température  $\theta$  est le module sécant  $E_{secant} = \frac{\sigma(\theta, \varepsilon)}{\varepsilon}$ .*

— Normalement, il n'y a pas lieu d'envisager une valeur de module d'Young indépendante de la température pour une section exposée au feu, y compris dans le cadre d'une analyse au feu simplifiée.

En revanche, il se peut que dans une structure donnée, certaines sections ne soient pas exposées au feu (à définir par exemple via la commande `EXPOSITION TEMP 20.`). Pour ces sections, l'utilisateur doit attribuer une valeur de module d'Young tangente à l'origine (déformation nulle) à 20 degrés, à savoir  $E(\theta = 20^\circ) = \frac{3f_{c,\theta}}{2\varepsilon_{c1,\theta}}$ .

Cette valeur est affectée automatiquement via « `E FEU EC2` », mais peut être défini directement par l'utilisateur via une commande « `E e` ».

— La loi de comportement du béton ne prend pas en compte la traction par défaut (`TRACTION NON`) conformément à l'EN1992-1-2. L'analyse est donc fissurée (si on est en flexion simple par exemple). Il est néanmoins loisible d'activer le module tangent à l'origine pour les déformations en traction pour vérifier son modèle dans une situation quasi élastique par exemple : il faut dans ce cas spécifier `TRACTION OUI`.

— La teneur en eau « `uu` » intervient dans le calcul de la chaleur spécifique massique (exprimé en  $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ) conformément à l'EN1992-1-2 § 3.3.2 qui prévoit des valeurs comprises entre 0.0 (0%) et 0.03 (3%) ».

— La chaleur spécifique massique est considérée par défaut comme variable en fonction de la température, conformément à l'EN1992-1-2 § 3.3.2. Il est possible de considérer la chaleur spécifique comme constante (analyse au feu simplifiée) en spécifiant une valeur : « `CHALEUR_SPECIFIQUE_MASSIQUE chalm` »

— La conductivité thermique peut être considérée comme indépendante de la température (cas d'une analyse au feu simplifiée), en spécifiant une valeur constante « `conduc` ». En réalité la conductivité thermique varie en fonction de la température, ce qui peut être pris en compte en utilisant au choix :

- `CONDUCTIVITE EC2 AN NORMAL` (loi EN1992-1-2 NA §3.3.3). Concerne les bétons traditionnels. (Option par défaut).
- `CONDUCTIVITE EC2 AN BHP` (loi EN1992-1-2 NA §6.3). Concerne les BHP
- `CONDUCTIVITE EC2 (alpha)` : Conductivité thermique de l'EN1992-1-2 §3.3.3

— La conductivité thermique de l'EN1992-1-2 §3.3.3 est défini comme suit :  
alpha.  $Cond[INF] + (1-alpha). Cond[SUP]$

où  $Cond[INF]$  et  $Cond[SUP]$  sont respectivement les limites inférieure et supérieure de la conductivité de l'EN1992-1-2 §3.3.3

— La masse volumique `rho_feu` intervient pour le calcul de la chaleur spécifique volumique (en  $J.m^{-3}.K^{-1}$ ) à partir de la chaleur spécifique massique (en  $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ). La masse volumique `rho_feu` est considérée par défaut comme variable en fonction de la température, conformément à l'EN1992-1-2 § 3.3.2 (3) en utilisant la commande `RHO_FEU EC2`. Il est possible de considérer la chaleur spécifique comme constante (analyse au feu simplifiée) en spécifiant la commande `RHO_FEU CTE`.

## 12.3 – TYPE D'EXPOSITION AU FEU

La définition d'une exposition au feu pour une paroi s'effectue selon la syntaxe suivante :

```
EXPOSITION FEU i
  <CN, HC, HCM, ADIABATIQUE, TEMP temp,
    <LOI_GAZ, LOI_PAROI>
    tj tempj
  ...
  >
  (PROTECTION res)
  (CONVECTION <EC1, alphac>)
FIN
```

avec :

temp	Valeur de la température dans le cas d'une température constante (20°C par défaut)
tj, tempj	Couple de valeurs (temps(minutes); température(°C)) définissant une loi quelconque soit du gaz, soit directement de la paroi
res	Résistance thermique surfacique équivalente de la protection passive (m <sup>2</sup> .K/W)
alphac	Coefficient de transfert thermique par convection (EN1991-1-2§3.2).

— Les courbes de températures peuvent suivre les comportements suivants :

— CN : Courbe de température normalisée

— HC : Courbe de température hydrocarbure

— HCM : Courbe de température hydrocarbure majorée

— ADIABATIQUE correspond à un comportement adiabatique de la paroi.

— La résistance thermique surfacique équivalente « res » de la protection passive doit être évaluée par l'utilisateur. Cette grandeur est pour l'instant considérée comme constante (par simplification), mais en réalité elle évolue en fonction de l'élévation de température dans la protection :  $res_{eq}(t) = \int \frac{1}{\lambda_c(\theta(x,t))} dx$ , avec  $\lambda_c(\theta(x,t))$  conductivité thermique du béton en  $W.m^{-1}.K^{-1}$ .

— La loi LOI\_GAZ correspond à une courbe température-temps des gaz définis par une loi quelconque.

— La loi LOI\_PAROI correspond à une courbe température-temps directement sur les parois de la section définis par une loi quelconque.

— Les lois LOI\_GAZ ou LOI\_PAROI définies par les couples de température sont prolongées au-delà des dates extrêmes avec une valeur de température constante et identique à celle définie en extrémité.

— Si la commande CONVECTION est absente ou si CONVECTION EC1 est activé, le coefficient de transfert thermique par convection pris en compte est défini automatiquement par le logiciel, en fonction de la nature de l'exposition :

— CN : 25W/m<sup>2</sup>/K (EN1991-1-2§3.2)

— HC : 25W/m<sup>2</sup>/K (EN1991-1-2§3.2)

— HCM : 50W/m<sup>2</sup>/K (guide CETU Comportement au feu des tunnels routiers p34).

*LOI\_GAZ ou LOI\_PAROI : 50W/m<sup>2</sup>/K (programmé par extension)*

*TEMP: si la température de la paroi reste faible (inférieure à 50°C fixé conventionnellement dans le programme) on considère que la surface est non exposée, ce qui se traduit par un coefficient valant 4W/m<sup>2</sup>/K (d'après EN1991-1-2§3.1). Sinon, lorsque la température est supérieure à 50°C, le coefficient est fixé à 25W/m<sup>2</sup>/K.*

*Les courbes CN, HC et HCM sont décrites dans l'annexe dans le guide Cerema p12 (voir annexe B5 – Calcul au feu). L'attention est attirée sur la durée des courbes de feu qui doit être choisie par l'utilisateur (voir 12.10 – feu : repartition de température).*

*Si CONVECTION alphac est activé, le coefficient de transfert thermique est fixé par l'utilisateur. A noter pour les faces non exposées la possibilité évoquée par l'EN1991-1-2§3.1 d'adopter un coefficient de transfert thermique par convection de 9W/m<sup>2</sup>/K si l'on suppose qu'il inclut les effets de transfert thermique par rayonnement : cette valeur n'est pas à utiliser puisque les transferts thermiques par rayonnement sont déjà calculés par le programme (il ne faut pas les compter deux fois).*

## 12.4 – TYPE DE SECTION

Pour qu'une barre puisse être soumise au feu, il est nécessaire de définir un type de section.

### OPTION PLANE : SECTION DALLE

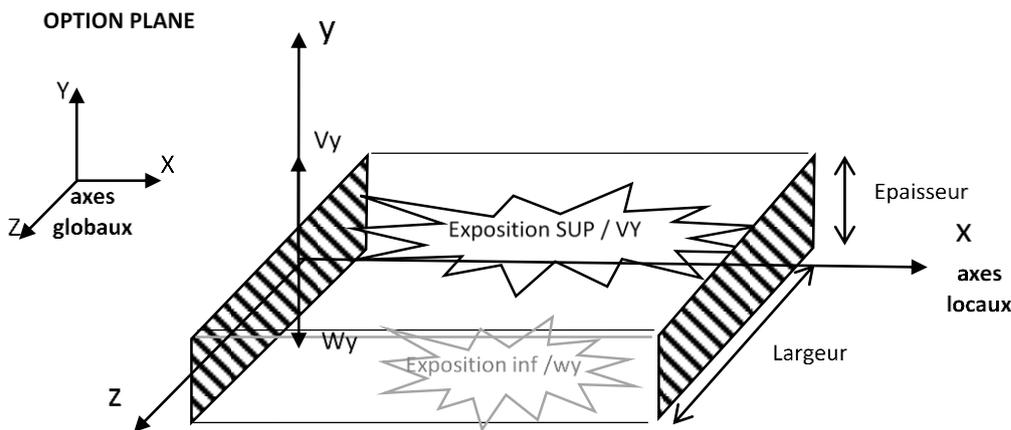
La définition d'une SECTION de type DALLE pour un calcul en OPTION PLANE s'effectue selon la syntaxe suivante :

```
SECTION is ('Titre de section')
  DALLE EPAISSEUR e
  (LARGEUR larg)
  EXPOSITION FEU (<SUP,VY> ej) (<INF,WY> ek)
  MAT m
```

FIN

avec :

is	Numéro de section
e	Epaisseur
larg	Largeur de la section (1 par défaut)
ej, ek	Numéro de type d'exposition au feu auquel est soumis la paroi supérieure VY ou inférieure WY de la section
m	Numéro du matériau



— L'origine du repère de la section de type DALLE est le centre de gravité de la section brute, là où passe l'axe neutre de la poutre, c'est-à-dire l'axe du repère local de la barre ST1.

— Les parois VY et WY (supérieure et inférieure) de la section sont orientées selon les plans normaux aux fibres d'axe principal de la barre (voir §2.10 - caractéristiques R.D.M. des barres).

— Aux parois inférieure et supérieure de la section sont associées des numéros désignant le type d'exposition au feu auquel la paroi est soumise.

— La géométrie de la section est utilisée pour le calcul des caractéristiques mécaniques (à partir d'une section rectangulaire d'épaisseur « e » et de largeur « Larg »), pour le calcul de la diffusion de la chaleur et pour l'évaluation de la résistance de la section (lois moment-courbure) lors du calcul au feu.

— L'épaisseur est également utilisée pour définir les fibres supérieure et inférieure des contraintes (pour des raisons de compatibilité avec les contraintes déjà calculés dans ST1).

*Avertissement : attention, pour le calcul au feu, les contraintes maximales ne sont plus obtenues pour les fibres extrêmes. Les contraintes internes sont données par la commande RESU*

- *Si la section soumise au feu présente un risque d'écaillage (perte de matériau sur la surface exposée au feu), ce phénomène peut être pris en compte : l'utilisateur doit soustraire l'épaisseur de béton écaillé à l'épaisseur initiale.*

### OPTION SPATIALE : SECTION RECTANGLE

La définition d'une **SECTION** de type **RECTANGLE** pour un calcul en **OPTION SPATIALE** s'effectue selon la syntaxe suivante :

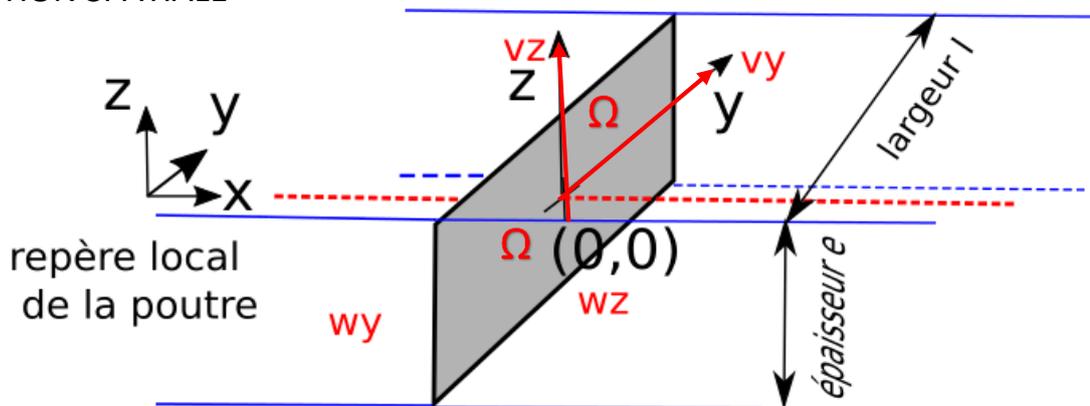
```
SECTION is ('Titre de section')
      RECTANGLE EPAISSEUR e LARGEUR larg
      EXPOSITION FEU (VY ej) (WY ek) (VZ el) (WZ eo)
      MAT m
```

FIN

avec :

is	Numéro de section
e	Epaisseur
larg	Largeur de la section
ej,ek,el,	Numéro de type d'exposition au feu auquel est soumis la paroi VY, WY ou VZ, WZ
eo	de la section
m	Numéro du matériau

### OPTION SPATIALE



Repère  $\Omega$  local de la SECTION RECTANGLE :  
Repère centré sur l'axe local de la poutre

- *Les remarques faites pour la section DALLE s'appliquent aussi à la section RECTANGLE.*

- *L'origine du repère local de la section est le centre de gravité de la section brute, là où passe l'axe neutre de la poutre définie par les commandes décrites dans ST1.*

- *On peut tourner la poutre rectangulaire sur elle-même en utilisant la commande BETA.*

## OPTION SPATIALE : SECTION PERIMETRE

Une section avec un contour polygonale quelconque peut être défini dans un modèle 3D.

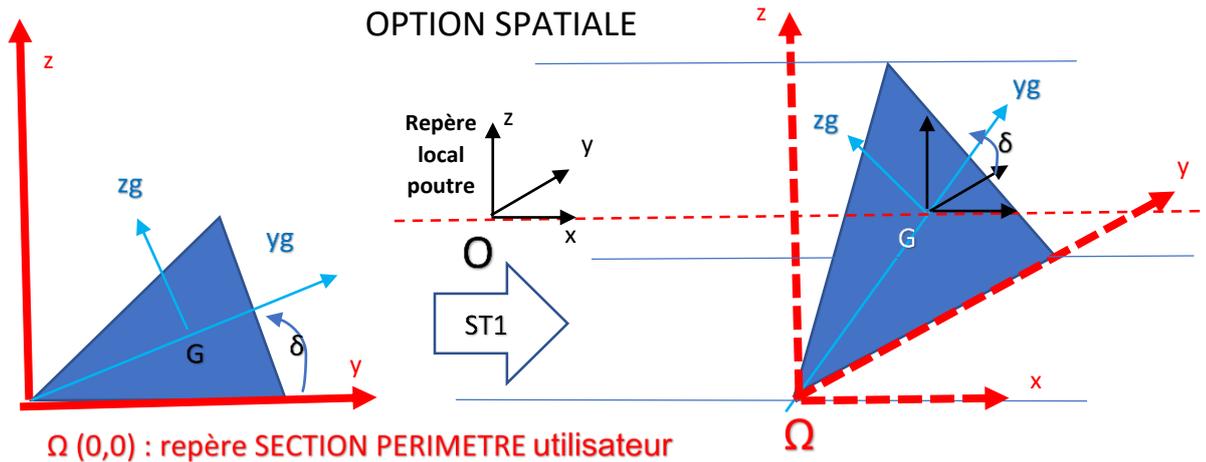
La définition d'une **SECTION** par son **PERIMETRE** en **OPTION SPATIALE** s'effectue selon la syntaxe suivante :

```
SECTION is ('Titre de section')
  PERIMETRE
  MAT m
  (MAILLE dx)
  Y y1 Z z1 EXPOSITION expo1
  ...
  Y yi1 Z zi1 EXPOSITION expo1
  Y yi2 Z zi2 EXPOSITION expo2
  ...
  Y yn Z zn EXPOSITION expon
FIN
```

avec :

is	Numéro de section
m	Numéro du matériau
dx	Taille de maille pour le maillage de la section. La valeur recommandée est une maille de 0,01m, valeur par défaut.
yi	Position y d'un point du périmètre de la section dans le repère local de la section.
zi	Position z d'un point du périmètre de la section dans le repère local de la section.
expo1	Numéro du type d'exposition au feu auquel est soumis la paroi de la section définie par le segment [i1,i2] ou [n,1] pour le dernier bouclant la section
m	Numéro du matériau

$\Sigma$  Contrairement à la SECTION de type DALLE ou RECTANGLE, le repère local de définition du PERIMETRE de la SECTION n'est pas forcément le repère local ST1 de la poutre. Seule la direction des axes locaux du repère local de la section brute à froid (définie par l'utilisateur) est la même que celle du repère local ST1 de la poutre. Par contre la géométrie de la section pouvant être quelconque, il n'est pas obligatoire de définir la géométrie de la section à partir de la position de son centre de gravité. ST1 se charge de replacer automatiquement la position du centre de gravité de la section brute locale définie dans l'axe local ST1 de la poutre.



Repère  $\Omega_{yz}$  de la SECTION PERIMETRE (utilisateur) de forme polygonale :

Placement automatique par ST1 du centre de gravité G de la SECTION PERIMETRE sur l'axe local Ox de la poutre et calcul automatique de l'angle  $\delta$  du repère des axes d'inerties principaux  $Gygzg$  de la section par rapport au repère local la poutre

- A partir des coordonnées du polygone de la section définie par l'utilisateur, le repère propre des inerties principales brutes est calculé par ST1 avec un angle éventuel de l'orientation des axes d'inerties principaux par rapport au repère local de la barre ST1.
- A froid, le repère local de la poutre calculé par ST1 a toujours pour origine le centre de gravité de la section brute. La position des nœuds de la poutre doit être définie (et/ou bien des excentremets peuvent être introduits) pour positionner la poutre à froid.
- La commande BETA permet de tourner la poutre sur elle-même autour de son centre de gravité.
- Si la section est symétrique par rapport à l'axe local  $y=0$  ou  $z=0$  du repère de la SECTION, le maillage de la section respectera cette ou ces symétrie(s).
- Les points du périmètre de la section peuvent être rentrés dans le sens direct ou dans le sens indirect.

#### EXEMPLE : SECTION PERIMETRE : TRIANGULAIRE

```
SECTION 1 ' triangle'
PERIMETRE
MATERIAU 1
MAILLE 0.01
Y 0      Z 0      EXPOSITION 1
Y 1.1    Z 0.5    EXPOSITION 2
Y 0.0    Z 1.0    EXPOSITION 3
FIN
```

#### EXEMPLE : SECTION PERIMETRE EN I

```
SECTION 2 'poutreI'
PERIMETRE
```

```

MATERIAU 2
MAILLE 0.01
Y -0.3      Z -0.5      EXPOSITION 1
Y 0.3       Z -0.5      EXPOSITION 1
Y 0.3       Z -0.3      EXPOSITION 1
Y 0.15      Z -0.2      EXPOSITION 1
Y 0.15      Z 0.1       EXPOSITION 1
Y 0.5       Z 0.2       EXPOSITION 5
Y 0.5       Z 0.5       EXPOSITION 5
Y -0.5      Z 0.5       EXPOSITION 5
Y -0.5      Z 0.2       EXPOSITION 1
Y -0.15     Z 0.1       EXPOSITION 1
Y -0.15     Z -0.2      EXPOSITION 1
Y -0.3      Z -0.3      EXPOSITION 1
FIN

```

### EXEMPLE : SECTION PERIMETRE : CYLINDRE

```

diam=1.0
pi=3.141592653
Expo = 1
Alpha0 = 2*pi/32.0

```

```

SECTION 1 'cylindre'
PERIMETRE
MATERIAU 1
Y 0.5*diam      Z 0.0      EXPOSITION Expo
Y 0.5*diam*cos(1.0*alpha0)  Z 0.5*diam*sin(1.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y 0.5*diam*cos(2.0*alpha0)  Z 0.5*diam*sin(2.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y 0.5*diam*cos(3.0*alpha0)  Z 0.5*diam*sin(3.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y 0.5*diam*cos(4.0*alpha0)  Z 0.5*diam*sin(4.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y 0.5*diam*cos(5.0*alpha0)  Z 0.5*diam*sin(5.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y 0.5*diam*cos(6.0*alpha0)  Z 0.5*diam*sin(6.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y 0.5*diam*cos(7.0*alpha0)  Z 0.5*diam*sin(7.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y 0.0           Z 0.5*diam      EXPOSITION Expo
Y -0.5*diam*cos(7.0*alpha0)  Z 0.5*diam*sin(7.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y -0.5*diam*cos(6.0*alpha0)  Z 0.5*diam*sin(6.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y -0.5*diam*cos(5.0*alpha0)  Z 0.5*diam*sin(5.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y -0.5*diam*cos(4.0*alpha0)  Z 0.5*diam*sin(4.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y -0.5*diam*cos(3.0*alpha0)  Z 0.5*diam*sin(3.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y -0.5*diam*cos(2.0*alpha0)  Z 0.5*diam*sin(2.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y -0.5*diam*cos(1.0*alpha0)  Z 0.5*diam*sin(1.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y -0.5*diam      Z 0.0      EXPOSITION Expo
Y -0.5*diam*cos(1.0*alpha0)  Z -0.5*diam*sin(1.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y -0.5*diam*cos(2.0*alpha0)  Z -0.5*diam*sin(2.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y -0.5*diam*cos(3.0*alpha0)  Z -0.5*diam*sin(3.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y -0.5*diam*cos(4.0*alpha0)  Z -0.5*diam*sin(4.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y -0.5*diam*cos(5.0*alpha0)  Z -0.5*diam*sin(5.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y -0.5*diam*cos(6.0*alpha0)  Z -0.5*diam*sin(6.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y -0.5*diam*cos(7.0*alpha0)  Z -0.5*diam*sin(7.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y 0.0           Z -0.5*diam      EXPOSITION Expo
Y 0.5*diam*cos(7.0*alpha0)  Z -0.5*diam*sin(7.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y 0.5*diam*cos(6.0*alpha0)  Z -0.5*diam*sin(6.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y 0.5*diam*cos(5.0*alpha0)  Z -0.5*diam*sin(5.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y 0.5*diam*cos(4.0*alpha0)  Z -0.5*diam*sin(4.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y 0.5*diam*cos(3.0*alpha0)  Z -0.5*diam*sin(3.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y 0.5*diam*cos(2.0*alpha0)  Z -0.5*diam*sin(2.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
Y 0.5*diam*cos(1.0*alpha0)  Z -0.5*diam*sin(1.0*alpha0)  EXPOSITION Expo
FIN

```

## 12.5 –TYPE DE BARRE D’ACIER PASSIF

Cette commande permet de définir les caractéristiques d’un type de barre d’acier passif utilisé pour les armatures de béton armé de la section.

La définition d'un type de barre d'acier passif s'effectue selon la syntaxe suivante :

```
ACIER ac ('Titre')
      DIAMETRE phi
      (SECTION as)
      (CLASSE <N, X>)
      (LAMINE <CHAUD, FROID>)
      E es
      FYK fy
FIN
```

avec :

ac	Numéro du type de barre d’acier passif
phi	Diamètre d’une barre d’acier passif (0 par défaut)
as	Aire de la section de barre d’acier
N, X	Classe d’acier (N par défaut), voir EN 1992-1-2 §3.2.3
es	Module élastique à froid des aciers
fy	Limite élastique de l’acier

— *Le diamètre « phi » permet le calcul de la section d’acier, la section vaut alors  $\pi * \phi^2 / 4$  sauf si la section « as » est renseignée.*

*Le diamètre « phi » intervient aussi pour déterminer la position de la maille de béton où se situe les fibres extrêmes de la section d’armature en acier et ainsi la température de l’armature.*

— *Les barres d’aciers sont des laminés à froid par défaut.*

## 12.6 – TYPE D’ARMATURE

Cette commande permet de définir le type d’armature utilisé dans une section.

La définition d'une armature d'acier passif s'effectue selon la syntaxe suivante :

```
ARMATURE ar ('Titre')
  <
    (ACIER ac1 NOMBRE nb1 ENROBAGE SUP enr1)
    (ACIER ac2 NOMBRE nb2 ENROBAGE INF enr2)
  ,
  (ACIER ac NOMBRE nb LOCAL Y y Z z)
  ...
  >
FIN
```

avec :

ar	Numéro du type d’armature
aci	Numéro du type d’acier
nbi	Nombre d’acier passif dans la section
enri	Enrobage du centre de gravité des armatures par rapport au parement SUP (VY) ou INF (WY) de la section de type DALLE ou RECTANGLE
y	Abscisse de l’armature dans le repère local de la SECTION de type PERIMETRE
z	Ordonnée de l’armature dans le repère local de la SECTION de type PERIMETRE

- Dans le calcul au feu, les enrobages ne tiennent pas compte des diamètres des aciers : la distance d'enrobage est donc directement la distance du parement au centre de gravité des armatures. NB : si l'épaisseur de la section (voir commande SECTION) tient compte du phénomène d'écaillage du béton, il faut en tenir compte dans la définition des enrobages des armatures.

## 12.7 – COMMANDE CARACTERISTIQUE : COMPLEMENTS

La commande caractéristique est complétée pour associer une barre à une section et un type d'armature. La commande s'effectue selon la syntaxe suivante :

```
CARA ib
      SECTION i (ARMATURE j)
```

FIN

avec :

ib	Numéro de barre
is	Numéro de section
j	Numéro d'armature

∑ On notera ici que l'affectation à un matériau est réalisée implicitement via la commande SECTION. Cette commande permet donc de générer les caractéristiques mécaniques géométriques et l'affectation à un matériau (commande CONS). Il n'y a donc pas à définir cette dernière commande pour la barre correspondante.

- La commande ARMATURE peut être optionnelle : cela peut permettre de traiter des cas de béton seul en pré-dimensionnement, mais aussi de faciliter le calcul d'une simple diffusion thermique. Attention néanmoins, la section de béton soumis au feu ne reprend plus aucune traction, donc l'équilibre de la section n'est plus forcément assuré sous certaines sollicitations courantes (par exemple en flexion simple sans effort axial de compression), la structure peut devenir instable dans ce cas. Si on active la résistance à la traction du béton (mot clé TRACTION OUI de la commande MATERIAU §12.2 – matériau : compléments feu) (pas réaliste en général), cela peut stabiliser la résolution et permettre d'accéder à des résultats et finalement aider à comprendre le mécanisme d'instabilité, afin de modifier le modèle initial.

∑ Attention, la redéfinition des caractéristiques sur une barre (déjà affectée par la commande SECTION via cette commande), avec la commande classique CARA invalide l'exposition au feu (l'incendie ne crée plus d'échauffement).

## 12.8 – EDITIONS DES DONNEES : COMPLEMENTS

La commande LISTER est complétée pour lister les caractéristiques des sections, des expositions, des aciers et des armatures.

La commande s'effectue selon la syntaxe suivante :

```
LISTER SECTION liste
LISTER MATERIAU liste
LISTER EXPOSITION liste
LISTER ACIER liste
LISTER ARMATURE liste
```

avec :

liste	Liste des numéros (de matériaux, de section, d'exposition, d'acier ou d'armature)
-------	---

## 12.9 – CHARGEMENT COMBINÉE POUR LE FEU

La commande CHARG existante a été complétée, par la possibilité d'appliquer directement une combinaison de charge.

La commande s'effectue selon la syntaxe suivante :

```
CHARG i COMB ('Titre')
      CHARG liste coef
...
FIN
```

avec :

liste      Numéro de charge  
coef      Coefficient de pondération du chargement (1 par défaut)

*La commande est décrite §7.14 – chargements combinés*

— *Les 2 approches « charge combinée » et « combinaison de charge » définie avec la commande COMB conduisent aux mêmes résultats dans le cas d'un calcul linéaire classique.*

*Dans le cas de l'analyse au feu, le calcul est non linéaire et dépend du chargement appliqué. Il n'est pas équivalent d'étudier la somme des effets de différents chargements au feu et l'effet d'une combinaison de chargement. Comme l'analyse au feu s'effectue sous un seul chargement donné, un chargement combiné permet de prendre en compte un bon nombre de charges simultanées et réaliser une analyse au feu à partir de ce chargement combiné.*

## 12.10 – FEU : REPARTITION DE TEMPERATURE

Cette commande définit la répartition de température de toutes sections définies et une durée d'incendie.

La commande s'effectue selon la syntaxe suivante :

```
FEU i ('Titre')
      DUREE t
      (TEMP temp)
FIN
```

avec :

i            Numéro de feu d'incendie  
t            Durée d'exposition au feu (minutes)  
temp        Température initiale de la structure (20°C par défaut)

## 12.11 – DEFINITION D’UN INCENDIE

Un incendie est associé à un feu d’incendie sous une charge donnée.

La commande s’effectue selon la syntaxe suivante :

```
INCENDIE i ('Titre')
          FEU j (LOCAL) CHARG k
FIN
```

avec :

i	Numéro de la charge incendie
j	Numéro du feu
k	Numéro de la charge simultanée avec l’incendie

- L’incendie est prévu pour une seule charge simultanée, on a recours à une charge combinée en général.

$\Sigma$  *L’analyse au feu est non linéaire : par conséquent, la charge appliquée doit être représentative des charges permanentes et des charges d’exploitation éventuelles. Il convient donc à l’utilisateur de simuler d’une part les cas de charges permanentes et d’autre part éventuellement les cas de charges d’exploitation par des charges statiques équivalentes, puis de combiner ces charges via la commande CHARG COMB (voir §12.9 – chargement combinée). En effet il n’est pas équivalent, ni correct de cumuler l’effet d’un chargement d’incendie calculé d’un côté et l’effet des charges d’exploitation calculé avec la commande SURCH (celui-ci étant réalisé sous calcul élastique).*

- Avec le mot clef LOCAL, les effets hyperstatiques des déformations thermiques dans la structure ne sont pas pris en compte. Cette fonctionnalité permet de vérifier la résistance de la structure sous l’effet d’un feu localisé, qui affaiblit localement une section, sans tenir compte de l’effet hyperstatique qui peut se révéler bénéfique dans certaines sections. Le mot-clef LOCAL peut aussi être utilisé pour effectuer le re-calcul à froid de la structure : les matériaux conservent leurs caractéristiques dégradées après l’incendie, mais la structure ayant refroidi, les effets hyperstatiques de l’échauffement ont disparu. .

## 12.12 – PARAMETRE DE L’ANALYSE AU FEU

Pour l’analyse au feu, la méthode newton raphson est utilisée. Certains paramètres sont modifiables. Cette commande est optionnelle.

La commande s’effectue selon la syntaxe suivante :

```
ANALYSE FEU
          NEWTON_RAPHSON MAX_ITER n (PERIODE i)
          (Y <CTE, VAR>)
          (CARA <ZERO, GARDER>)
FIN
```

avec :

n	Nombre maximal d’itération de la boucle de convergence Newton-Raphson (500 par défaut)
i	Période d’itérations du calcul en rigidité sécante (les autres itérations se faisant avec des rigidités tangentes) (5 par défaut)

- Par la commande Y, la position du centre de gravité peut être conserver constante ou variable (par défaut) selon les efforts à chaud.

- Par la commande `CARA GARDER`, les caractéristiques de la section à chaud après un calcul incendie seront sauvegardées. Elles peuvent ensuite être réutilisées pour un calcul sur la structure refroidie, ou un calcul de charge critique. Les caractéristiques sont ré-initialisées à leur valeur de départ, correspondant à la structure indemne, par `CARA ZERO`. Par défaut, la structure est réinitialisée par ces valeurs à froid (`CARA ZERO`).

## 12.13 – EXECUTION D’UN INCENDIE

Le calcul de l’effet d’un incendie sous une charge donnée peut être calculé.

La commande s’effectue selon la syntaxe suivante :

```
EXEC INCENDIE lst
```

avec :

lst            Liste des numéros de charge incendie

$\Sigma$  Avertissement : par défaut le béton suit une loi non linéaire fissurée (pas de résistance en traction) : dans le cas de la flexion simple par exemple, des lits d’acier en zone tendue des sections soumises au feu sont à prévoir pour l’analyse. En effet la convergence n’est donc plus forcément assurée dans le cas général, car l’équilibre interne de chaque section sous la charge d’incendie peut ne plus être vérifiée et conduit alors à une instabilité. Pour pouvoir ainsi analyser un modèle instable, il est possible malgré tout de stabiliser les calculs par la reprise en compte la traction du béton pour « debugage (il faut dans ce cas modifier la loi du beton (voir 12.2 – materiau : complements feu)). Il ne s’agit pas ici d’obtenir un calcul réaliste, mais juste un moyen de rendre l’analyse stable afin d’obtenir des résultats, ce qui peut faciliter l’analyse du modèle, il faudra évidemment remodifier ce paramètre pour l’analyse finale réelle.

## 12.14 – EDITION DES RESULTATS : COMPLEMENTS POUR LE CALCUL AU FEU

La commande RESU est complétée :

La commande suivante affiche les températures de feu pour des sections type (pour cte commande, la commande EXEC INCENDIE peut ne pas avoir été exécuté):

```
RESU
      FEU (liste) SECTION (lists) (DUREE lstd)
FIN
```

avec :

Liste	Liste de numéros du feu
Lists	Liste de numéros de section type
Listd	Liste des instants de calcul au feu (par défaut durée du feu)

Cette commande crée également un sous répertoire « nomfichierst1 » à l'emplacement du fichier ST1 de calcul et dans ce sous répertoire des fichiers :

« feu (numfeu) section (numsection) duree (dureee) .vtp ».

Chaque fichier « .vtp » affiche le profil de température sur la section.

Les fichiers « .vtp » sont éditables par un éditeur de texte, mais ils sont prévus pour être exploités avec l'application Paraview.

**L'application Paraview** est une application d'analyse et de visualisation de données multiplateforme open source. Les utilisateurs de ParaView peuvent créer rapidement des visualisations pour analyser leurs données. L'exploration des données peut être effectuée de manière interactive en 3D ou par programmation. Elle est disponible sur le site internet [paraview.org](http://paraview.org).

Il suffit d'importer les fichiers vtp dans paraview pour visualiser les résultats dans les sections.

Une fois les fichiers importés, il faut activer l'affichage du ou des fichiers importés (pipeline browser) et sélectionner l'entité à visualiser (coloring), (par exemple la température, les efforts, les contraintes,...)

La commande suivante affiche les sollicitations dans les barres selon la syntaxe suivante :

```
RESU
      INCENDIE (liste) BARRE (listb) (CARA CHAUD) (TEMP (MAX) (MIN) (tmin))
FIN
RESU
      INCENDIE (liste) BARRE (listb) (EFFORT) (DEPLA)
FIN
```

avec :

Liste	Liste de numéros de charge incendie
Listb	Liste de numéros de barres
tmin	Température minimale du béton à afficher

Avec le mot clef CARA CHAUD, les caractéristiques à froid et à chaud des barres sont affichées.

— Dans le répertoire « nomfichierst1 » est créé un fichier « barre\_chargeincendie (numincendie) .vtp » exploitable avec l'application Paraview.

Pour chaque barre soumise au feu, la raideur axiale et les inerties principales, l'effort normal et les moments peuvent être affichés pour la charge incendie « numincendie ». NB : les excentrement à chaud des barres sont pris en compte.

- Avec le mot clef TEMP, les températures et les contraintes dans chaque maille de section de barres sont affichées. Dans le répertoire « nomdufichierst1 » sont créés des fichiers exploitables avec l'application Paraview. Ces fichiers rapportent des résultats sur la section au milieu de la poutre.

Pour une charge incendie « numincendie » et une barre « numbarre »

- « Beton\_barre(numbarre)chargeincendie(numincendie).vtp » contient la température et la contrainte axiale sur l'ensemble de la section en béton.
- « Armature\_barre(numbarre)chargeincendie(numincendie).vtp » contient les températures et les contraintes dans les armatures.
- « Precontrainte\_barre(numbarre)chargeincendie(numincendie).vtp » contient la température et les contraintes dans la précontrainte.

Il est conseillé d'afficher dans paraview pour la même barre, à la fois la section de béton, les armatures et la précontrainte, ce qui permet de visualiser les armatures et la précontrainte dans la section de la barre. Comme les câbles de précontraintes et les armatures sont modélisés par des points sur la section dans paraview, il peut être nécessaire d'augmenter la taille des points dans paraview pour mieux les afficher.

La commande suivante affiche les sollicitations sur les appuis selon la syntaxe suivante :

```
RESU
      INCENDIE (liste) APPUI (lista)
FIN
```

avec :

Lista     Liste de numéros d'appuis

## 13

# ENVELOPPES ET COMBINAISONS

## 13.1 - COMBINAISON DE RESULTATS DE CHARGEMENTS UNITAIRES OU DE COMBINAISONS

Les combinaisons de chargements sont définies selon la syntaxe suivante :

```
COMB i ('Titre de la combinaison')
```

```
...
CHARG liste1 (coef1)
...
COMB liste2 (coef2)
...
ETAT liste3 (coef3)
...
PHASAGE liste4 (coef4)
...
SPECTRE liste5 (coef5)
...
INCENDIE liste6 (coef6)
...
```

```
FIN
```

avec :

i            numéro de la combinaison à créer  
 liste1...    liste des chargements dont les résultats sont en base de données  
 liste5  
 coef1...    coefficients multiplicateurs (par défaut coef=1.)  
 coef5

— *L'utilisation de la commande COMB crée une combinaison qui est immédiatement calculée et stockée en base de donnée.*

— *On ne peut pas combiner directement des enveloppes ou des surcharges. Il faut utiliser la commande ENV COMB.*

$\Sigma$  *Avertissement : les combinaisons décrites ici sont linéaires, aucun calcul non linéaire n'est actualisé. Par exemple les décollements d'appuis, les calculs au feu ou les effets des barres sur ressort non linéaire ne sont pas modifiés. Il convient donc à l'utilisateur de prendre les précautions nécessaires et adapté à son étude.*

## 13.2 - ENVELOPPE RESULTATS DE CHARGEMENTS UNITAIRES, SURCHARGES, COMBINAISONS OU ENVELOPPES

Les enveloppes de chargements sont définies selon la syntaxe suivante :

```
ENV i ('Titre de l'enveloppe')
  ( < EFFORT <N, TY, TZ, MX, MY, MZ>,
    DEPLA <DX, DY, DZ, RX, RY, RZ>,
    CONTR <VY, VZ, WY, WZ, VYVZ, VYWZ, WYVZ, WYWZ>,
    CONTRG ic
    PRESS <PX, PY, PZ, MX> > )
  (REAC <FX, FY, FZ, MX, MY, MZ>)
  ...
  CHARG liste1 (coef1)
  ...
  SURCH liste2 (coef2)
  ...
  COMB liste3 (coef3)
  ...
  ETAT liste4 (coef4)
  ...
  PHASAGE liste5 (coef5)
  ...
  SPECTRE liste6 (coef6)
  ...
  HISTORIQUE liste7 (coef7)
  ...
  ENV liste8 (coef8)
  ...
FIN
```

avec :

i            numéro de l'enveloppe à créer  
 ic            numéro de la contrainte généralisée  
 liste1...    listes des chargements, ..., enveloppes dont les résultats sont en base de données  
 coef1...    coefficients multiplicateurs (par défaut coef=1.)

— Les commandes *EFFORT*, *DEPLA*, *CONTR* ou *REAC* permettent de définir une composante privilégiée. L'enveloppe consiste à chercher les deux extrêmes de cette composante et les valeurs concomitantes des autres composantes. Une enveloppe contient donc deux fois plus de résultats qu'un cas de charge.

— L'enveloppe d'un historique est l'enveloppe des effets obtenus sur l'ensemble des pas de temps d'un l'accélérogramme.

Les mots clés utilisables sont :

	(EFFORT)	DEPLA	CONTR	PRESS	(REAC)
Option PLANE	n, ty, mz	dx, dy, rz	vy, wy	px, py	fx, fy, mz
Option GRILL	mx, tz, my	rx, dz, ry	vz, wz	pz, mx	fz, my
Option SPATIALE	n, ty, tz, mx, my, mz	dx, dy, dz, rx, ry, rz	vyvz, vywz, wyvz, wywz	px, py, pz	fx, fy, fz mx, my, mz

— Une concomitance peut être demandée à la fois sur les réactions d'appui et sur les sections d'étude.

## 13.3 - GESTION DES CONCOMITANCES

### 13.3.1 - CAS OU UNE COMPOSANTE DE CONCOMITANCE EST DECLAREE

Pour chaque appui et chaque section d'étude de barre, l'enveloppe s'effectue sur la composante désignée. Les autres résultats sont alors concomitants.

#### EXEMPLES : ENVELOPPES DE CHARGEMENTS AVEC CONCOMITANCE

```

ENV 1 'concomitance des extremes de mz'
  EFFORT MZ
  CHARG 10 1.35
  ENV 2 2.5
  CHARG 9
  COMB 3 2.77
...
FIN
ENV 3 'concomitance des extremes de mz et réactions fy'
  EFFORT MZ
  REAC FY
  CHARG 10 1.35
  ENV 2 2.5
  CHARG 9
  SURCH 2 1.2
  COMB 3 2.77
...
FIN

```

### 13.3.2 - CAS OU AUCUNE COMPOSANTE N'EST DECLAREE

Le type de concomitance de l'enveloppe sera le même que celui des enveloppes et surcharges qu'elle contient. Si l'enveloppe ne contient ni surcharge ni enveloppe, ou bien une enveloppe sans concomitance, l'étude se fera sans concomitance.

#### EXEMPLE : ENVELOPPE NE CONTENANT NI ENVELOPPE NI SURCHARGE

```

ENV 4 'enveloppe sans concomitance'
  CHARG 2
  COMB 3 1.2
...
FIN

```

**EXEMPLE : ENVELOPPE CONTENANT UNE AUTRE ENVELOPPE**

Supposons que l'enveloppe 10 étudie les extrêmes des déplacements DY. Les commandes ci-dessous sont alors équivalentes :

ENV 11	ou	ENV 11
		DEPLA DY
CHARG 12 2.		CHARG 12 2.
ENV 10 1.2		ENV 10 1.2
FIN		FIN

L'enveloppe 11 s'effectue sur les déplacements DY car elle contient l'enveloppe 10 qui était déjà sur les déplacements DY.

$\Sigma$  *Les enveloppes ou surcharges contenues dans une même enveloppe doivent avoir toutes le même type de concomitance.*

— *L'utilisation de la commande ENV (cf. p181) crée une enveloppe qui est stockée en base de données.*

*Le type d'enveloppe calculé est signalé par un message lors de l'écriture des résultats :*

— **EXEMPLE**

*L'enveloppe sur les moments fléchissants Mz est signalée par le message :*

*==> Résultats concomitants des extrêmes de l'effort Mz*

*Un test est effectué sur la cohérence des calculs demandés :*

**EXEMPLE**

*Une enveloppe contenant :*

*une enveloppe sur les moments mz*

*une enveloppe sur les contraintes vy*

*est signalée par un message lors de l'exécution du calcul et lors de l'écriture des résultats :*

*==> ATTENTION : Résultats comportant des incohérences sur les concomitances*

## 13.4 - COMBINAISONS ENVELOPPES

Les combinaisons enveloppes sont les résultats de chargements unitaires, surcharges, spectre, combinaisons ou enveloppes.

Elles sont définies selon la syntaxe suivante :

```
ENV i COMB ('Titre de la combinaison d''enveloppe')
  ( < EFFORT <N, TY, TZ, MX, MY, MZ>,
    DEPLA <DX, DY, DZ, RX, RY, RZ>,
    CONTR <VY, VZ, WY, WZ, VYVZ, VYWZ, WYVZ, WYWZ>,
    CONTRG ic
    PRESS <PX, PY, PZ, MX> > )
  (REAC <FX, FY, FZ, RX, RY, RZ>)
...
CHARG liste1 (cfmin1) (cfmax1)
...
SURCH liste2 (cfmin2) (cfmax2)
...
COMB liste3 (cfmin3) (cfmax3)
...
ETAT liste4 (cfmin4) (cfmax4)
...
PHASAGE liste5 (cfmin5) (cfmax5)
...
SPECTRE liste6 (cfmin6) (cfmax6)
...
HISTORIQUE liste7 (cfmin7) (cfmax7)
...
ENV liste8 (cfmin8) (cfmax8)
...
FIN
```

avec :

i            numéro de l'enveloppe à créer  
ic            numéro de la contrainte généralisée  
liste1...    liste des numéros des chargements, surcharges, ..., enveloppes dont les résultats  
              sont en base de données  
cfmin1...    coefficients multiplicateurs minimum (par défaut cfmin=1.)  
cfmax1...    coefficients multiplicateurs maximum (par défaut cfmax=cfmin)

Les mots clés utilisables sont :

	(EFFORT)	DEPLA	CONTR	PRESS	(REAC)
Option PLANE	n, ty, mz	dx, dy, rz	vy, wy	px, py	fx, fy, mz
Option GRILL	mx, tz, my	rx, dz, ry	vz, wz	pz, mx	fz, my
Option SPATIALE	n, ty, tz, mx, my, mz	dx, dy, dz, rx, ry, rz	vyvz, vywz, wyvz, wywz	px, py, pz	fx, fy, fz mx, my, mz

— La notion de concomitance est la même que précédemment (cf. commande ENV p181).

### EXEMPLE : ENVELOPPE DE CHARGEMENTS SANS CONCOMITANCE

```
ENV 1 COMB 'pas de concomitance'
  CHARG 10 1.35
  CHARG 9
  COMB 3 2.77
...
FIN
```

**EXEMPLE : ENVELOPPE COMBINEE SUR LES MOMENTS, AVEC CONCOMITANCE DES AUTRES EFFORTS ET, EVENTUELLEMENT DES DEPLACEMENTS ET DES CONTRAINTES ; ENVELOPPE SUR LES REACTIONS D'APPUI SANS CONCOMITANCE**

```
ENV 2 COMB 'enveloppe sur les moments'
  EFFORT MZ
  CHARG 1 1.35 1.0
  COMB 2 2.55
...
FIN
```

**EXEMPLE : COMBINAISON D'ENVELOPPES**

```
ENV 10 COMB 'enveloppe sur les flèches oy'
  CHARG 3
  ENV 2 2.55
...
FIN
```

L'enveloppe 10 qui est une combinaison du chargement 3 et de l'enveloppe 2 aura le même type de concomitance que l'enveloppe 2 (voir gestion des concomitances pages précédentes).

— *L'utilisation de la commande ENV (cf. p181) crée une enveloppe qui est stockée en base de données.*

*Le type d'enveloppe calculé est signalé par un message lors de l'écriture des résultats :*

— **EXEMPLE**

*L'enveloppe sur les moments fléchissant MZ est signalée par le message :*

*Résultats concomitants des extrêmes de l'effort MZ*

*Un test est effectué sur la cohérence des calculs demandés :*

**EXEMPLE**

*Une enveloppe contenant :*

*une enveloppe sur les moments mz*

*une enveloppe sur les contraintes vy*

*est signalée par un message lors de l'exécution du calcul et lors de l'écriture des résultats :*

*==> ATTENTION : Résultats comportant des incohérences sur les concomitances*

# 14

## RAPPEL DES DONNEES

### 14.1 - RAPPEL DE LA GEOMETRIE

Les caractéristiques géométriques déjà lues peuvent être listées par les commandes suivantes :

#### EDITION DE TOUTE LA GEOMETRIE

LISTER GEOM

L'édition de la géométrie est définie ci-dessous :

numéros et coordonnées des nœuds

numéros et caractéristiques des appuis

numéros des barres, nœuds de liaison, longueurs, excentremets, articulations

numéros et caractéristiques R.D.M. des barres

liste des appuis activés

liste des barres activées

#### EDITION DES COORDONNEES DES NŒUDS

LISTER NOEUD (liste)

#### EDITION DES CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES BARRES

LISTER BARRE (liste)

#### EDITION DES CARACTERISTIQUES R.D.M. DES BARRES

LISTER CARA (liste)

#### EDITION DES PROPRIETES DES MATERIAUX

LISTER MAT (liste)

#### EDITION DES CARACTERISTIQUES DES APPUIS

LISTER APPUI (liste)

#### EDITION DES CONTRAINTES GENERALISEES

LISTER CONTRG (liste)

#### EDITION DE TOUS LES APPUIS ET DE TOUTES LES BARRES ACTIVEES

LISTER ACTIVATION

#### EDITION DES APPUIS ACTIVES

LISTER ACTIVATION APPUI

#### EDITION DES BARRES ACTIVEES

LISTER ACTIVATION BARRE

avec pour les commandes ci-dessus :

liste      Liste de numéros de nœuds ou de barres, de matériaux, d appuis, de contrainte généralisée selon la commande lister  
(par défaut l'édition s'effectuera sur tous les éléments définis)

**EXEMPLE**

LISTER NOEUD 1 a 10 BARRE 2

- *Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur tous les éléments définis (ceci est alors équivalent à ne pas mettre de liste).*

**14.2 - RAPPEL DE LA DEFINITION DE LA PRECONTRAINTE**

Les éléments de description de la précontrainte précédemment définis peuvent être listés par les commandes suivantes :

Rappel des dispositifs de précontrainte :

LISTER PREC (liste)

Rappel de la géométrie et des paramètres principaux des câbles (longueur, coefficients de transmission, déviations angulaires cumulées) :

LISTER CABLE (liste)

LISTER CARA CABLE (liste)

avec :

liste            liste de numéros d'éléments précédemment définis  
(par défaut tous les éléments définis seront édités)

- *Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur tous les éléments définis (ceci est alors équivalent à ne pas mettre de liste).*

**14.3 - RAPPEL DES CHARGEMENTS**

Les chargements précédemment définis peuvent être listés par la commande suivante :

LISTER CHARG (liste)

avec :

liste            liste de numéros de chargements précédemment définis  
(par défaut tous les chargements définis (cf. commande CHARG p103) seront édités)

- *Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur tous les chargements définis (ceci est alors équivalent à ne pas mettre de liste).*

## 14.4 - RAPPEL DES CHARGES D'EXPLOITATION

Les données nécessaires à la définition des charges d'exploitation peuvent être listées par les commandes suivantes :

### EDITION DU TABLIER :

LISTER TABLIER

### EDITION DES CHARGES DE TYPE A(L) GENERALISE :

LISTER ALG (liste)

### EDITION DES CHARGES ROULANTES GENERALISEES :

LISTER CONV (liste)

### EDITION DES SURCHARGES :

LISTER SURCH (liste)

avec :

liste      liste de numéros de chargement précédemment définis  
par défaut tous les chargements définis (cf. commande *CHARG p103*) seront édités

— *Dans les instructions ci-dessus, les listes peuvent être remplacées par le mot TOUT. L'instruction agira sur tous les chargements définis (ceci est alors équivalent à ne pas mettre de liste).*

Les phasages précédemment définis peuvent être listés par la commande suivante :

LISTER PHASAGE (liste)

avec :

liste      liste de numéros de phasages précédemment définis  
par défaut tous les phasages définis (cf. commande *PHASAGE p177*) seront édités

Le rappel du phasage ne contient pas tout le détail de chaque instruction. Il se contente de donner un résumé de chaque action.

— *Dans les instructions ci-dessus, la liste peut être remplacée par le mot TOUT. L'instruction agira sur tous les phasages définis (ceci est alors équivalent à ne pas mettre de liste).*

## 14.5 - RAPPEL DES DONNEES DYNAMIQUES

Les données nécessaires à la définition des masses dynamiques peuvent être listées par les commandes suivantes :

### **EDITION DES MASSES DYNAMIQUES:**

LISTER MASSE

- *Dans les instructions ci-dessus, les masses sont présentées sous forme matricielle soit aux noeuds où ils sont définis, soit aux noeuds des extrémités des barres pour lesquels ils sont définis.*

Les données nécessaires à la définition des amortissements peuvent être listées par les commandes suivantes :

### **EDITION DES AMORTISSEMENTS:**

LISTER AMORTISSEMENT

Les données nécessaires à la définition des spectres d'accélérations peuvent être listées par les commandes suivantes :

### **EDITION DES SPECTRES:**

LISTER SPECTRE

Les données nécessaires à la définition des accélogrammes peuvent être listées par les commandes suivantes :

### **EDITION DES ACCELEROGRAMMES:**

LISTER HISTORIQUE

## 15

## EDITION DES RESULTATS

L'édition des résultats s'effectue selon la syntaxe suivante :

```
RESU
(CHARG (liste)) (COMB (liste)) (ENV (liste)) (SURCH (liste))
(ETAT (liste)) (PHASAGE (liste))
(CABLE (liste) (XS (<REL,ABS>) listexs))
(NOEUD (liste))
(APPUI (LOC)(liste))
(BARRE (liste) (EFFORT) (DEPLA) (CONTR) (CONTRG (liste)) (PRESS))
(MODE (listem) (FREQUENCE) (DEPLA))
(SPECTRE (liste) (MODE (listem)) (APPUI (LOC)) ...
... (BARRE (listeb) (EFFORT) (DEPLA) (VITESSE) (ACCELERATION) ...
... (CONTR) (PRESS) (CONTRG (lst)))
(HISTORIQUE (listeh) (NOEUD (listen)) ...
... (< DEPLA, VITESSE , ACCELERATION>) (APPUI (LOC))...
... (BARRE (listeb) (EFFORT) (CONTR) (PRESS) (CONTRG (lst)))
(FLAMBEMENT (listem) (MODE) (DEPLA) )
...
FIN
```

avec :

liste	liste de numéros des résultats ou éléments chargements dont les résultats sont stockés en base de données (par défaut tous les résultats en base de données)
effort	mot clé permettant d'obtenir l'édition des efforts, aux sections d'étude d'efforts ( <i>cf. commande ETUDE p98</i> )
depla	mot clé permettant d'obtenir l'édition des déformées aux sections d'étude des déformées ( <i>cf. commande ETUDE p98</i> )
contr	mot clé permettant d'obtenir l'édition des contraintes normales, aux sections d'étude d'efforts ( <i>cf. commande ETUDE p98</i> ), pour des barres dont on a défini les fibres VY, ..., WZ ( <i>cf. commande CARA p59</i> ). (par défaut les efforts sur barres seront édités)
listexs	liste des abscisses curvilignes le long du câble (attention, la longueur du câble est généralement plus longue que la longueur de la poutre)
listem	liste de numéros des modes dont les résultats sont stockés en base de données
listeh	liste de numéros des historiques dont les résultats sont stockés en base de données si elle n'est pas accompagnée de la commande noeud l'historique des déplacements est fourni pour toute la structure à chaque pas de temps)
listen	liste de numéros des noeuds (l'historique est présenté par noeud)
listeb	liste de numéros de barres pour le calcul spectral

**EXEMPLE : EDITION DES EFFORTS DES BARRES 1 A 10 POUR TOUS LES CHARGEMENTS DONT LE RESULTAT EST STOCKE EN BASE DE DONNEES**

```
RESU
  CHARG
  BARRE 1 a 10
FIN
```

— Toutes les commandes ci-dessus peuvent être écrites sur une seule ligne.

— La description de l'édition des résultats s'effectue entre les mots clés *RESU* et *FIN*.

— La commande *NEUD* s'utilise uniquement avec *CHARGE* et non pas avec *SURCHARGE*.

— Elle fournit alors les déplacements.

— La commande *APPUI* fournit les efforts aux appuis. La commande *LOC* permet d'avoir les efforts dans le repère local de l'appui pour des charges combinées. (Attention, les valeurs pour les *ENVELOPPES* ne sont pertinentes que dans le cas des concomittances activées, car les valeurs sont obtenues à partir des valeurs maximales dans les directions globales et ensuite transformées par rotation dans les directions locales et non les valeurs maximales dans les directions orientées)

— La commande *BARRE* fournit les déplacements de toutes les sections d'étude aussi bien pour *CHARGE* que pour *SURCHARGE*.

— La commande *CABLE* fournit les contraintes de tension et perte dans les sections d'étude pour les *ETATS*, *PHASAGE* et *CHARGE* aux sections de calculs par défaut ou à des abscisses curvilignes spécifiées par l'utilisateur en absolu ou en relatif par rapport à la longueur du câble.

— La commande *MODE FREQUENCE* fournit les fréquences propres des modes calculés, leur facteur de participation modale et leur masse modale.

— La commande *MODE DEPLA* fournit les déplacements des barres pour les modes propres spécifiés et déjà calculés.

— La commande *SPECTRE* fournit les combinaisons quadratiques complètes des barres pour tous les modes propres déjà calculés. Elle nécessite au préalable la commande *SPECTRE*. On rappelle que si l'amortissement est nul (commande amortissement non définie par exemple), la combinaison *CQC* dégénère en combinaison dite *SRSS* (racine carré de la somme des carrés). On peut spécifier si nécessaire les modes à prendre en compte avec la commande *MODE*.

— La commande *FLAMBEMENT MODE* fournit les facteurs d'amplification critiques des modes de flambement élastiques calculés

— La commande *FLAMBEMENT DEPLA* fournit les déplacements des barres pour les modes critiques de flambement élastique spécifiés et déjà calculés.

#### **EXEMPLE : EDITION DES MODES DONT LE RESULTAT EST STOCKE EN BASE DE DONNEES**

```
RESU
  MODE FREQUENCE
FIN
```

#### **EXEMPLE : EDITION DES DEPLACEMENTS DU MODE 1 POUR TOUTES LES BARRES**

```
RESU
  MODE 1 DEPLA
FIN
```

#### **EXEMPLE : EDITION DES COMBINAISONS CQC**

```
RESU
  SPECTRE BARRE TOUT EFFORT DEPLA
FIN
```

#### **EXEMPLE : EDITION DES CHARGES CRITIQUES DE FLAMBEMENT STOCKEES EN BASE DE DONNEES**

```
RESU
  FLAMBEMENT MODE
FIN
```

#### **EXEMPLE : EDITION DES HISTORIQUES**

RESU  
HISTORIQUE 1 NOEUD 2 DEPLA  
HISTORIQUE 1 APPUI  
HISTORIQUE 1 BARRE EFFORT CONTR PRESS  
FIN

# 16

## COMMANDES GRAPHIQUES

### 16.1 - INITIALISATION DU MODE GRAPHIQUE

Lorsque l'utilisateur est sous le prompt > du mode console, le passage en mode dessin interactif s'effectue selon la syntaxe suivante :

```
DESS
```

L'utilisateur se retrouve en mode de saisie graphique et peut donc utiliser toutes les commandes du module graphique ainsi que les commandes TITRE et LIRE du mode console.

— *La commande LIRE (cf. p37) permet de lancer un fichier contenant des instructions de dessin déjà préparées.*

La saisie d'une ou plusieurs commandes peut s'effectuer dans la ligne de texte située en bas de la fenêtre graphique. En fin de saisie, l'exécution est obtenue par la frappe de la touche <ENTREE> du clavier.

Pour saisir sur cette ligne plusieurs commandes, il convient de les séparer par un point-virgule.

A droite de la ligne de saisie se trouve un bouton qui permet d'afficher la liste des commandes précédemment écrites. La sélection de l'une d'entre elles recopie la commande sur la ligne. Elle peut être à nouveau exécutée en pressant la touche <ENTREE> du clavier.

La sélection de l'un des boutons situé en haut à gauche de l'écran graphique (Print, Sauve, Cls, ...) donne le même résultat que la saisie de la commande correspondante, suivie de la frappe de la touche <ENTREE>.

### 16.2 - SORTIE DU MODE GRAPHIQUE

La sortie du mode graphique s'effectue par la commande suivante :

```
RETOUR
```

ou par le choix de l'option "Retour mode calcul" du menu "Fichier".

La sélection du bouton de fermeture situé à gauche du menu "Fichier" équivaut à la saisie de la commande QUITTER (cf. p41) dans la ligne de texte, **ST1** demande alors un nom de projet dans la ligne de texte pour une sauvegarde éventuelle.

— *La frappe de la touche <ENTREE> sans saisie d'un nom provoque la sortie de **ST1** sans sauvegarde.*

## 16.3 - CHANGEMENT DE LA TAILLE DE L ECRAN GRAPHIQUE

Le pilote de l'écran graphique peut être modifié par la commande :

ECRAN nom

avec :

nom            nom de l écran graphique

Les noms utilisables sont :

w800\_600

w1024\_768

w1280\_1024

- *Le type d'écran graphique est initialisé dans le fichier paramètres (cf. p329) ce qui permet d'avoir une initialisation par défaut. Il peut cependant être redéfini dans le fichier de données.*

## 16.4 - CHANGEMENT DE TRACEUR GRAPHIQUE

Le traceur graphique courant peut être modifié par la commande suivante :

TRA nom (COULEUR, MONOCHROME)

avec :

nom            nom du pilote de traceur graphique

Les pilotes utilisables sont :

post            Postscript format A4 landscape

postp          Postscript format A4 portrait

post3          Postscript format A3 landscape

post3p        Postscript format A3 portrait

dxf            échange de données suivant la norme DXF

calc           traceur électrostatique Calcomp

- *Les pilotes ci-dessus sont monochromes par défaut.*

### EXEMPLE : TRACEUR POSTSCRIPT A3 COULEUR

TRA post3 COULEUR

- *Le dessin sur papier s'obtient à partir de la sauvegarde d'un dessin sur écran (cf. commande SAUV p247).*

- *Le type de traceur graphique est initialisé dans le fichier paramètres (cf. p329) ce qui permet d'avoir une initialisation par défaut. Il peut cependant être redéfini dans le fichier de données.*

## 16.5 - SORTIE DU DESSIN AFFICHE A L'ECRAN SUR IMPRIMANTE

Le dessin affiché à l'écran peut être envoyé sur toute imprimante figurant dans la liste des imprimantes Windows installées en lançant menu `Fichier`, commande `Impression...`. La commande ainsi générée dans la zone de saisie graphique est :

```
PRINT 'boite'
```

## 16.6 - PREVISUALISATION DU RENDU SUR TRACEUR

La visualisation du dessin obtenu sur le traceur courant peut être obtenue par la commande :

```
TRA
```

Le retour à la visualisation plein écran s'effectue par la commande :

```
ECRAN
```

## 16.7 - SAUVEGARDE DU DESSIN AFFICHE A L'ECRAN

Le dessin affiché à l'écran peut être sauvegardé sur fichier en vue d'une utilisation extérieure à **ST1**. Un fichier tampon est alors généré par la commande :

```
SAUV
```

Le contenu et le nom du fichier généré dépendent du type de traceur courant (*cf. commande TRA p246*).

Fichier générés :

```
pos.stl    imprimante utilisant le standard POSTSCRIPT
dxf.stl    échange de données suivant le standard DXF
```

- *Au cours d'une même session l'utilisation de plusieurs pilotes graphiques entraîne la génération d'un fichier tampon par type de traceur.*

*EXEMPLES :*

*L'utilisation d'un pilote `postscript A4` et d'un pilote `postscript A3` ne génère qu'un seul fichier `pos.stl`*

*L'utilisation d'un pilote `postscript` et d'un pilote `dxf` génère deux fichiers `pos.stl` et `dxf.stl`*

### SUITE DE COMMANDES A EFFECTUER POUR LA SAUVEGARDE D'UN DESSIN ECRAN SUR FICHIER

choisir un format de fichier (menu `Fichier`, commande `Langage pour sauvegarde dessin sur fichier`)

choisir le type de dessin à effectuer à l'écran (`Geom`, `Effort`, ...)

saisir le nom du fichier de sauvegarde, **ST1** n'ajoutant pas d'extension par défaut, il est impératif de mettre l'extension correspondant au choix de format de fichier défini préalablement (`.DXF` ou `.PS`) dans le nom du fichier (menu `Fichier`, commande `Nom du fichier de sauvegarde des ecrans :...`, la commande `TRA 'nomfichier.ext'` est générée dans la zone de saisie graphique du bas de l'écran)

taper `SAUV` dans la zone de saisie et valider

taper `RET` dans la zone de saisie pour quitter le mode graphique

*Il est possible d'enchaîner plusieurs sauvegardes à la suite.*

- *Tant que le format de fichier n'est pas redéfini, **ST1** prend en compte celui en cours.*

## 16.8 - EFFACEMENT DE L'ECRAN

L'effacement de l'écran en mode graphique s'obtient par la commande :

CLS

## 16.9 - ANGLE DE VUE (OPTIONS GRILL ET SPATIALE)

La modification de l'angle de vue du dessin affiché à l'écran s'effectue selon les syntaxes suivantes :

VUE (X ux) (Y uy) (Z uz)

ou

VUE ux uy uz

avec :

ux, uy, uz coefficients directeurs suivant les axes X, Y, Z de la direction de vue  
(par défaut ux=uy=uz=1)

### EXEMPLE : VUE SUIVANT LA DIRECTION Z

```
...          ou          ...
VUE 0 0 1    VUE Z 1
...          ...
```

— Cette commande n'est pas active pour l'option *PLANE* (cf commande *OPTION p43*).

Les coefficients *ux*, *uy*, *uz* doivent représenter un vecteur non nul. Si on donne *ux=uy=uz=0*,

— **ST1** prendra automatiquement *ux=uy=uz=1*.

## 16.10 - ZOOM

L'agrandissement d'un dessin se fait selon la syntaxe suivante :

ZOOM cf (xc yc)

avec :

cf coefficients directeurs suivant les axes X, Y, Z de la direction de vue  
(par défaut ux=uy=uz=1)

xc, yc coefficients directeurs suivant les axes X, Y, Z de la direction de vue  
(par défaut ux=uy=uz=1)

### EXEMPLE : AGRANDISSEMENT

```
ZOOM 2
```

Signifie que le dessin affiché à l'écran est agrandi deux fois par rapport au centre de l'écran.

### EXEMPLE : REDUCTION

```
ZOOM .5 .2 .3
```

Signifie que le dessin est réduit d'un facteur 0.5 par rapport au point de coordonnées 0.2, 0.3 de l'écran.

## 16.11 - SELECTION D'UNE PARTIE DE LA STRUCTURE DEFINIE

La sélection d'une partie de la structure pour l'exécution des commandes graphiques s'effectue selon l'une des syntaxes suivantes :

### 16.11.1 - SELECTION SUR LES NUMEROS DE BARRE

SELEC BARRE liste

### 16.11.2 - SELECTION SUR LES NUMEROS DE NŒUD

SELEC NOEUD liste

### 16.11.3 - SELECTION DE TOUTE LA STRUCTURE

SELEC TOUT

#### EXEMPLES

SELEC BARRE 1 a 10                      ou                      SELEC 1 a 10

Signifie qu'après cette commande, les commandes graphiques ne prendront en compte que les barres 1 à 10.

SELEC TOUT

Signifie que les commandes graphiques agiront sur toute la structure. Cette commande n'a d'intérêt que si l'on veut revenir à toute la structure après en avoir étudié une partie.

       *Par défaut toute la structure est sélectionnée.*

## 16.12 - CENTRAGE DU DESSIN AFFICHE A L' ECRAN

Le centrage du dessin affiché à l'écran s'effectue selon les syntaxes suivantes :

### 16.12.1 - CENTRAGE DU DESSIN TOTAL

CENTR

### 16.12.2 - CENTRAGE DE LA STRUCTURE SELECTIONNEE LORS DE LA DERNIERE UTILISATION DE LA COMMANDE SELEC

CENTR GEOM

Ce centrage permet de dessiner la structure sélectionnée de manière à ce qu'elle remplisse tout l'écran.

### 16.12.3 - CENTRAGE DES EFFORTS, DES DEPLACEMENTS OU DES CONTRAINTES

```
CENTR < EFFORT <N, TY ... MZ>,
        DEPLA (DX, DY, DZ, RX, RY, RZ) ,
        CONTR <VY ... WZ>,
        CONTRG
        PRESS <PX, PY, PZ, MX>  >
(MAX xmax)
```

Ce centrage permet de redessiner les efforts, les déplacements ou les contraintes de manière que la dimension maximale de ce qui est dessiné ne dépasse pas `xmax` centimètres à l'écran. L'échelle des efforts, déplacements ou contraintes sera réinitialisée à la valeur ainsi définie. Par défaut, le maximum reste égal à ce qu'il était précédemment.

*Lors de la première utilisation la valeur est définie dans le fichier paramètres (cf. p329).*

#### EXEMPLE : RECENTRAGE D'UN DESSIN

```
...
ZOOM 2
...
CENTR
...
```

Le dessin affiché subit un agrandissement puis est recentré sur l'écran.

#### EXEMPLE : CENTRAGE SUR UNE PARTIE DE LA STRUCTURE DESSINEE

```
...
### dessin de la structure, efforts, etc... ###
...
SELEC BARRE 20
CENTR GEOM
```

La structure a été dessinée sur l'écran, la barre 20 a été sélectionnée, le dessin a été centré sur la géométrie sélectionnée (ceci revient à faire un zoom sur la barre 20 du dessin affiché à l'écran.)

*Lors d'un premier dessin, le centrage s'effectue par défaut sur la géométrie de la structure.*

## 16.13 - DESSIN DE LA STRUCTURE

Le dessin de la structure s'obtient par la commande suivante :

```
GEOM
```

### EXEMPLE : DESSIN DE TOUTE LA STRUCTURE

```
GEOM
```

### EXEMPLE : DESSIN D'UNE PARTIE DE LA STRUCTURE

```
...
SELEC BARRE 1 a 10
GEOM
...
```

La commande GEOM exécute le dessin des barres 1 à 10.

## 16.14 - NUMEROTATION DES NŒUDS ET DES BARRES

La numérotation des nœuds et des barres de la structure s'obtient par la commande suivante :

### 16.14.1 - NUMEROTATION DES NŒUDS ET DES BARRES

```
NUM
```

### 16.14.2 - NUMEROTATION DES NŒUDS ET/OU DES BARRES

```
NUM (NOEUD) (BARRE)
```

### EXEMPLE : NUMEROTATION DES NŒUDS ET DES BARRES

```
NUM      ou      NUM NOEUD BARRE
```

### EXEMPLE : NUMEROTATION DES NŒUDS

```
NUM NOEUD
```

### EXEMPLE : NUMEROTATION DES BARRES

```
NUM BARRE
```

## 16.15 - CHANGEMENT DES COULEURS PAR DEFAUT

Changement des couleurs par défaut des efforts, déplacements, contraintes et pressions :

```
COUL <EFFORT, DEPLA, CONTR, CONTRG, PRESS> (couleur)
```

avec :

```
couleur    mot clé de la couleur choisie : <NOIR, INDIGO, VERT, CYAN, ROUGE, MAGENTA,
MARRON, NEUTRE, GRIS, BLEU, PISTACHE, CIEL, CORAIL, MAUVE, JAUNE,
BLANC>
```

### EXEMPLE : CHANGEMENT DE LA COULEUR DES DEFORMEES

```
COUL DEPLA JAUNE
```

Les déformées seront dessinées en jaune.

— *A chaque couleur écran définie ci-dessus correspond une épaisseur et un type de trait pour le dessin en noir et blanc sur imprimante laser. La correspondance couleur/épaisseur de trait est définie dans le fichier paramètres (cf. p329).*

## 16.16 - DESSIN DES DEPLACEMENTS DE LA STRUCTURE

Le dessin de la déformée d'une structure s'obtient par la commande suivante :

```
DEPLA <CHARG,COMB,ENV,SURCH> liste (couleur)
```

Le dessin des déplacements de la structure suivant une direction du repère global s'obtient par la commande suivante :

```
DEPLA <(DX ... RZ)> <CHARG,COMB,ENV,SURCH> liste (couleur)
```

avec :

liste        liste des chargements, combinaisons, enveloppes ou surcharges à dessiner dont les résultats sont déjà en base de données

couleur     mot clé de la couleur choisie : <NOIR, INDIGO, VERT, CYAN, ROUGE, MAGENTA, MARRON, NEUTRE, GRIS, BLEU, PISTACHE, CIEL, CORAIL, MAUVE, JAUNE, BLANC>

Les mots clés utilisables sont :

Option PLANE        dx, dy, rz  
 Option GRILL        rx, dz, ry  
 Option SPATIALE    dx, dy, dz, rx, ry, rz

### EXEMPLE : DESSIN DE LA DEFORMEE DU CHARGEMENT 2

```
DEPLA CHARG 2
```

### EXEMPLE : SUPERPOSITION DE LA GEOMETRIE DE TOUTE LA STRUCTURE ET DE LA DEFORMEE DES BARRES 1 A 10 POUR LE CHARGEMENT 11

```
...  

  GEOM  

  ...  

  SELEC BARRE 1 a 10  

  DEPLA CHARG 11  

  ...
```

— *Le dessin de la déformée de la structure ne peut être demandé que si les résultats à dessiner sont déjà en base de données (cf. commandes EXEC CHARG p123, COMB p232, ENV p181 et EXEC SURCH p176).*

— *Le dessin de la déformée consiste à visualiser les déplacements des nœuds et des sections d'étude définies sur les barres (cf. commande ETUDE p98). Ainsi, la déformée d'une barre ne peut être visualisée que si l'on a défini un nombre suffisant de sections sur cette barre.*

— *Le dessin d'une enveloppe comprend deux courbes :*  
     *une courbe des effets maximum*  
     *une courbe des effets minimum*

## 16.17 - DESSIN DES EFFORTS R.D.M.

Le dessin des efforts d'une structure s'obtient par la commande suivante :

```
EFFORT <N, TY, TZ, MX, MY, MZ>
      <CHARG, COMB, ENV, SURCH> liste (couleur)
```

avec :

liste            liste des chargements, combinaisons, enveloppes ou surcharges à dessiner dont les résultats sont déjà en base de données

couleur        mot clé de la couleur choisie : <NOIR, INDIGO, VERT, CYAN, ROUGE, MAGENTA, MARRON, NEUTRE, GRIS, BLEU, PISTACHE, CIEL, CORAIL, MAUVE, JAUNE, BLANC>

Les mots clés utilisables sont :

Option PLANE        n, ty, mz  
 Option GRILL        mx, tz, my  
 Option SPATIALE    n, ty, tz, mx, my, mz

### EXEMPLE : DESSIN DE L'EFFORT NORMAL POUR LA COMBINAISON 3

```
EFFORT N COMB 3
```

### EXEMPLE : DESSIN DE L'EFFORT TRANCHANT TY ET DU MOMENT FLECHISSANT MZ POUR L'ENVELOPPE 5

```
EFFORT TY ENV 5 ROUGE
EFFORT MZ ENV 5 VERT
```

— *Le dessin des efforts R.D.M. de la structure ne peut être demandé que si les résultats à dessiner sont déjà en base de données (cf. commandes EXEC CHARG p123, COMB p232, ENV p181 et EXEC SURCH p176).*

— *Le dessin des efforts consiste à visualiser les résultats obtenus aux sections d'étude définies sur les barres (cf. commande ETUDE p98). Ainsi, la courbe des efforts R.D.M. d'une barre ne peut être visualisée que si l'on a défini un nombre suffisant de sections sur cette barre.*

— *Le dessin d'une enveloppe comprend deux courbes : une courbe des effets maximum et une courbe des effets minimum.*

— *A chaque couleur écran définie ci-dessus correspond une épaisseur et un type de trait pour le dessin en noir et blanc sur imprimante laser. La correspondance couleur/épaisseur de trait est définie dans le fichier paramètres (cf. p329).*

## 16.18 - DESSIN DES CONTRAINTES NORMALES

Le dessin des contraintes normales d'une structure s'obtient par la commande suivante :

```
CONTR <VY,WY,VZ,WZ,VYVZ,VYWZ,WYVZ,WYWZ>
      <CHARG,COMB,ENV,SURCH> liste (couleur)
```

avec :

liste	liste des chargements, combinaisons, enveloppes ou surcharges à dessiner dont les résultats sont déjà en base de données
couleur	mot clé de la couleur choisie : <NOIR, INDIGO, VERT, CYAN, ROUGE, MAGENTA, MARRON, NEUTRE, GRIS, BLEU, PISTACHE, CIEL, CORAIL, MAUVE, JAUNE, BLANC>

Les mots clés utilisables sont :

Option PLANE	vY, wY
Option GRILL	vZ, wZ
Option SPATIALE	vYVZ, vYWZ, wYVZ, wYWZ

### EXEMPLE : STRUCTURES PLANES

Dessin de la contrainte en fibre supérieure pour la combinaison numéro 3 :

```
CONTR VY COMB 3
```

### EXEMPLE : STRUCTURES SPATIALES

Dessin de la contrainte en VY VZ pour l'enveloppe 5 :

```
CONTR VYVZ ENV 5
```

- *Le dessin des contraintes de la structure ne peut être demandé que si les résultats à dessiner sont déjà en base de données (cf. commandes EXEC CHARG p123, COMB p232, ENV p181 et EXEC SURCH p176).*
- *Le dessin des contraintes consiste à visualiser les résultats obtenus aux sections d'étude définies sur les barres (cf. commande ETUDE p98). Ainsi, la courbe des contraintes sur une barre ne peut être visualisée que si l'on a défini un nombre suffisant de sections sur cette barre.*
- *Le dessin d'une enveloppe comprend deux courbes : une courbe des effets maximum et une courbe des effets minimum.*
- *A chaque couleur écran définie ci-dessus correspond une épaisseur et un type de trait pour le dessin en noir et blanc sur imprimante laser. La correspondance couleur/épaisseur de trait est définie dans le fichier paramètres (cf. p329).*

## 16.19 - DESSIN DES CONTRAINTES GENERALISEES

Le dessin des contraintes généralisées d'une structure s'obtient par la commande suivante :

CONTRG i <CHARG, COMB, ENV, SURCH> liste (couleur)

avec :

i                    numéro de la contrainte généralisée à dessiner  
liste                liste des chargements, combinaisons, enveloppes ou surcharges à dessiner dont les résultats sont déjà en base de données  
couleur            mot clé de la couleur choisie : <NOIR, INDIGO, VERT, CYAN, ROUGE, MAGENTA, MARRON, NEUTRE, GRIS, BLEU, PISTACHE, CIEL, CORAIL, MAUVE, JAUNE, BLANC>

### EXEMPLE : DESSIN DE LA CONTRAINTE GENERALISEE 2 POUR LA COMBINAISON NUMERO 3

CONTRG 2 COMB 3

— *Le dessin des contraintes de la structure ne peut être demandé que si les résultats à dessiner sont déjà en base de données (cf. commandes EXEC CHARG p123, COMB p232, ENV p181 et EXEC SURCH p176).*

— *Le dessin des contraintes consiste à visualiser les résultats obtenus aux sections d'étude définies sur les barres (cf. commande ETUDE p98). Ainsi, la courbe des contraintes sur une barre ne peut être visualisée que si l'on a défini un nombre suffisant de sections sur cette barre.*

— *Le dessin d'une enveloppe comprend deux courbes : une courbe des effets maximum et une courbe des effets minimum.*

— *A chaque couleur écran définie ci-dessus correspond une épaisseur et un type de trait pour le dessin en noir et blanc sur imprimante laser. La correspondance couleur/épaisseur de trait est définie dans le fichier paramètres (cf. p329).*

## 16.20 - DESSIN DES PRESSIONS

Le dessin des pressions des barres sur sol élastique (cf. commande CARA p59) s'obtient par la commande suivante :

```
PRESS <PX, PY, PZ, MX> <CHARG, COMB, ENV, SURCH> liste (couleur)
```

avec :

liste	liste des chargements, combinaisons, enveloppes ou surcharges à dessiner dont les résultats sont déjà en base de données
couleur	mot clé de la couleur choisie : <NOIR, INDIGO, VERT, CYAN, ROUGE, MAGENTA, MARRON, NEUTRE, GRIS, BLEU, PISTACHE, CIEL, CORAIL, MAUVE, JAUNE, BLANC>

Les mots clés utilisables sont :

Option PLANE	px, py
Option GRILL	mx, pz
Option SPATIALE	px, py, pz, mx

### EXEMPLE : DESSIN DE LA PRESSION TRANSVERSALE POUR LA COMBINAISON NUMERO 3

```
PRESS PY COMB 3
```

### EXEMPLE : DESSIN DE LA PRESSION TANGENTE POUR L'ENVELOPPE 5

```
PRESS PX ENV 5 ROUGE
```

— *Le dessin des pressions des poutres sur sol élastique ne peut être demandé que si les résultats à dessiner sont déjà en base de données (cf. commandes EXEC CHARG p123, COMB p232, ENV p181 et EXEC SURCH p176).*

— *Le dessin des pressions consiste à visualiser les résultats obtenus aux sections d'étude des déplacements définies sur les barres (cf. commande ETUDE p98). Ainsi, la courbe des contraintes sur une barre ne peut être visualisée que si l'on a défini un nombre suffisant de sections sur cette barre.*

— *Le dessin d'une enveloppe comprend deux courbes : une courbe des effets maximum et une courbe des effets minimum.*

— *A chaque couleur écran définie ci-dessus correspond une épaisseur et un type de trait pour le dessin en noir et blanc sur imprimante laser. La correspondance couleur/épaisseur de trait est définie dans le fichier paramètres (cf. p329).*

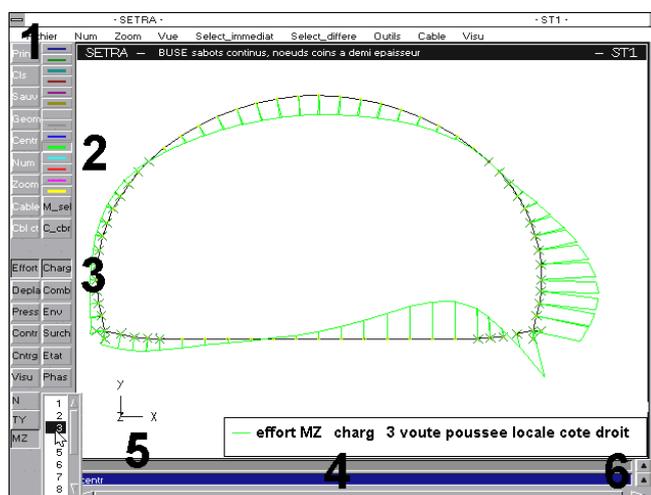
## 17

## ECRANS GRAPHIQUES

- Le fichier paramètres (cf. p329) contient notamment la résolution écran pour le mode graphique (ligne ECRAN w1024\_768 par défaut). Cette résolution peut être personnalisée en choisissant parmi les 3 configurations disponibles ( w800\_600, w1024\_768, w1280\_1024).

## 17.1 - ZONE D'ECRAN UTILISABLE A LA SOURIS HORMIS LA ZONE DESSIN

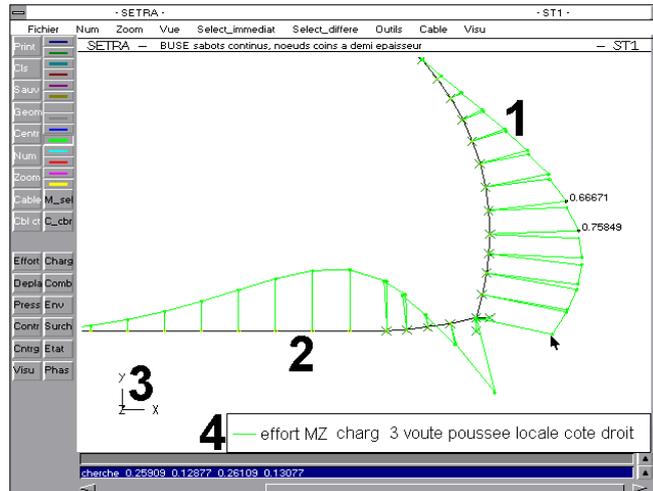
Zones utilisable par le bouton gauche de la souris :



- 1 Bouton système permettant de sortir du logiciel. Si des calculs ont été effectués, **ST1** proposera une sauvegarde avant de quitter le module graphique.
- 2 Choix d'une couleur avant de dessiner une courbe.
- 3 Pour dessiner une courbe d'effort, cliquer sur le bouton `Effort` puis sur le type d'effort (N, TY, MZ, ...), choisir un chargement et le numéro du chargement.
- 4 Zone permettant un défilement latéral avec comme pas de déplacement une dimension écran.
- 5 Zone de saisie clavier, activable à la souris.
- 6 Bouton donnant accès à la liste des dernières commandes tapées.

## 17.2 - ZONE DE DESSIN ACTIVE AVEC LE BOUTON GAUCHE

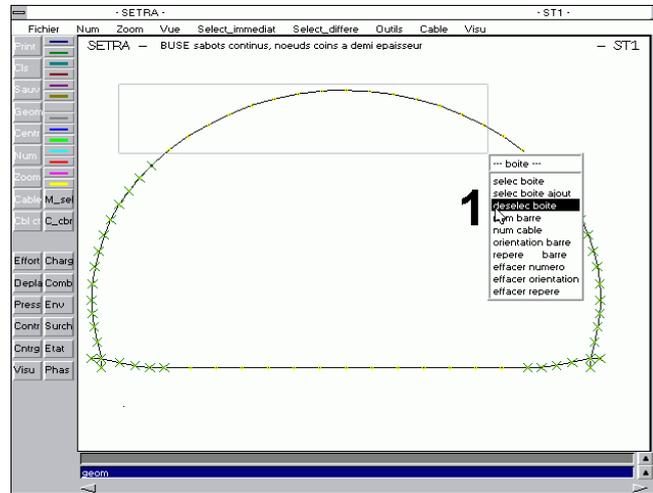
Pour déplacer le repère ou le contour de la légende, il faut tenir le bouton gauche de la souris appuyé.



- 1** Une courbe peut être activée en cliquant dessus avec la souris, les sections d'étude apparaissent représentées par des points qui peuvent être sélectionnés à la souris pour afficher la valeur correspondante.
- 2** Trait du contour de la légende activable à la souris pour modifier ses dimensions.
- 3** Repère du dessin pouvant être déplacé à la souris.
- 4** Légende des courbes dessinées.

## 17.3 - ZONE DE DESSIN ACTIVE AVEC LE BOUTON GAUCHE APPUYE + DEPLACEMENT

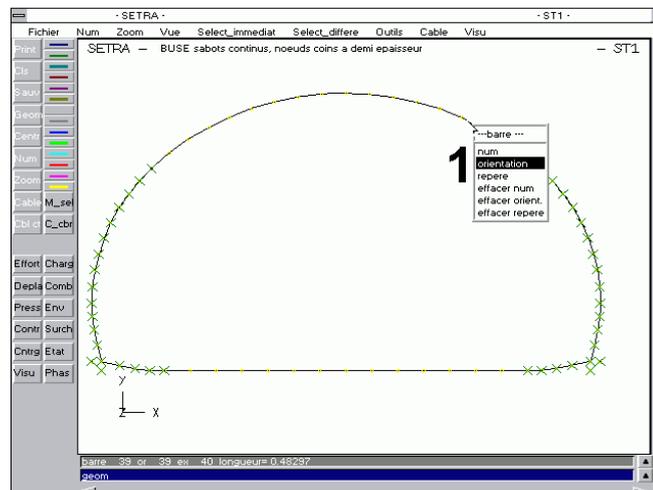
Une zone définie peut permettre l'affichage des numéros de barre dans la zone, de désélectionner les barres de cette zone ou toute autre action disponible dans le menu.



- 1 En saisie normale à la souris, on peut définir une zone en gardant le bouton gauche de la souris appuyé, lors du relâchement du bouton, un menu s'affiche proposant une liste d'actions à effectuer sur les objets contenus dans la zone.

## 17.4 - ZONE DE DESSIN ACTIVE AVEC LE BOUTON DROIT

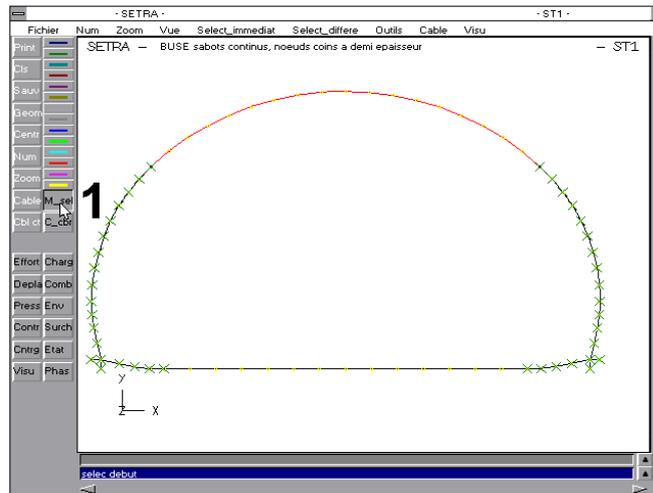
Le bouton droit est utilisable sur les barres, les nœuds, les câbles.



- 1 Le bouton droit de la souris permet d'afficher un menu associé à l'objet désigné.

## 17.5 - SELECTION DESELECTION DES BARRES

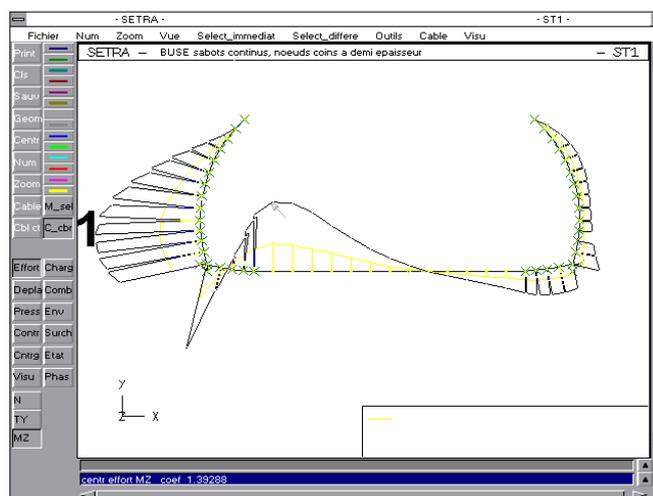
Toutes les opérations sont possibles une fois que les barres sont visibles. Pour inverser l'état de sélection d'une barre, il faut cliquer dessus ou créer une zone et cliquer sur `selec boite ajout`.



- 1 Lorsque le bouton `M_sel` est enfoncé, les barres désélectionnées apparaissent en rouge. Lorsque le bouton `M_sel` est relevé, les barres en rouge disparaissent. Les courbes ne s'affichent que sur les barres visibles.

## 17.6 - RECENTRER DES COURBES SUR ECRAN A LA SOURIS

Le bouton `C_cbr` permet de repositionner les courbes de façon interactive. Une fois le bouton appuyé, une flèche permet d'accrocher la courbe et de la déplacer en maintenant le bouton gauche de la souris appuyé.



- 1 Pour recentrer une courbe dans l'écran, appuyer sur le bouton `C_cbr`.

# 18

## PSEUDO-PROGRAMMATION

### 18.1 - PRESENTATION

Les instructions de base du calculateur de structures peuvent être complétées par des instructions de PSEUDO-PROGRAMMATION dans le but de générer d'une manière automatique certains groupes d'instructions, ou d'obtenir un fichier paramétré éventuellement réutilisable.

Les valeurs numériques du fichier de données peuvent alors être remplacées par des variables ou des expressions arithmétiques dont le résultat sera utilisé comme valeur numérique.

#### EXEMPLE

NOEUD 1 -0.416147 1.909297 est équivalent à NOEUD 1 cos(2) 1+sin(2)

Les instructions peuvent être répétées de manière automatique à l'aide d'une boucle de répétition.

#### EXEMPLE

ACTIVER APPUI 1 a 10 est équivalent à POUR i=1 a 10 << ACTIVER APPUI i >>

## 18.2 - TYPES LEXICAUX SPECIFIQUES A LA PSEUDO-PROGRAMMATION

### 18.2.1 - VARIABLES

Les valeurs numériques peuvent être stockées en mémoire sous la forme de variables. L'affectation d'une valeur numérique à une variable s'effectue à l'aide du signe =.

#### EXEMPLE

```
x1=12. ; i=11 ; ...
```

La variable x1 a pour valeur 12. et la variable i a pour valeur 11.

Une fois initialisées, les variables peuvent être utilisées à la place des valeurs numériques.

#### EXEMPLE

```
NOEUD 1 12 3      est équivalent à      x1=12 ; NOEUD 1 x1 3
```

— *L'initialisation d'une variable fixe son type. Ce type ne pourra plus être changé par la suite (en particulier, la variable x1 de l'exemple ci-dessus ne pourra plus être utilisée pour un nom de liste).*

— *Le nom d'une variable ne doit pas correspondre à un mot clé ou à une liste précédemment définie.*

## 18.2.2 - LISTES NOMMEES

Les listes numériques peuvent être stockées en mémoire sous la forme de listes nommées. L'affectation d'une liste à un nom s'effectue à l'aide du signe =.

### EXEMPLE

`ls1=1,2,5 a 8 ; ls2=1 a 3,x1,4,i`

Une fois initialisées, les listes nommées peuvent être utilisées à la place des listes explicites.

### EXEMPLE

`NOEUD 1 a 3 12 3` est équivalent à `ls1=1 a 3 ; NOEUD ls1 12 3`

Les listes peuvent contenir dans leur définition d'autres listes nommées. La liste ainsi définie contiendra les valeurs de la liste insérée, au moment de l'affectation.

### EXEMPLES

`ls1=1 a 3 ; ls2=ls1,4,6` est équivalent à `ls1=1 a 3 ; ls2=1 a 3,4,6`

`ls1=1 a 3 ; ls1=ls1,4,6` est équivalent à `ls1=1 a 3,4,6`

`ls1=1 a 3 ; ls2=ls1,4,6 ; ls1=2` est équivalent à `ls1=2 ; ls2=1 a 3,4,6`

L'initialisation d'une liste vide s'effectue par l'affectation de la liste `vide` à cette liste (`vide` est une liste particulière initialisée par **ST1**).

### EXEMPLE

`ls1=vide ; pour j=1 a 5 << ls1=ls1,j >>` est équivalent à `ls1=1 a 5`

— *L'initialisation d'une liste nommée fixe son type. Ce type ne pourra plus être changé par la suite (en particulier, la liste `ls1` de l'exemple ci-dessus ne pourra plus être utilisée pour une variable).*

### EXEMPLE

`ls1=1 a 5` impossible d'écrire ensuite `ls1=10`

— *Le nom d'une liste ne doit pas correspondre à un mot clé ou à une variable précédemment définie.*

### 18.2.3 - TABLEAUX INDICES DE VARIABLES

Les valeurs numériques peuvent être stockées en mémoire sous la forme de tableaux indicés de variables. La création d'un tableau indicé s'effectue par la commande :

DIM nom(n)

avec :

nom	nom du tableau indicé
n	dimension du tableau

#### EXEMPLE

L'instruction :

```
DIM tx1(100)
```

créé un tableau indicé de variables tx1 contenant 100 variables.

L'initialisation et l'utilisation des variables indicées s'effectuent de la même manière que pour les variables non indicées (voir ci-dessus).

#### EXEMPLE

```
DIM tx1(10)
```

```
NOEUD 1 12 3
```

est équivalent à

```
tx1(1)=12 ; NOEUD 1 tx1(1) 3
```

— *Le nom d'un tableau de variable ne doit pas correspondre à un nom de fonction mathématique.*

— *L'écriture d'une variable indicée ne doit pas contenir de caractères blancs.*

## 18.3 - EXPRESSIONS MATHÉMATIQUES

Dans tout le fichier de données, les valeurs numériques peuvent être remplacées par des expressions mathématiques.

### 18.3.1 - OPERATEURS ARITHMÉTIQUES

Les opérations arithmétiques usuelles suivantes sont utilisables dans le fichier de données :

addition	+
soustraction	-
multiplication	*
division	/
puissance	**

#### EXEMPLE

NOEUD 1 2+4\*1 10                    est équivalent à                    NOEUD 1 6 10

### 18.3.2 - FONCTIONS MATHÉMATIQUES

Les fonctions mathématiques usuelles suivantes sont utilisables dans le fichier de données :

valeur absolue	abs(x1)
partie entière	int(x1)
racine carrée	sqrt(x1)
fonction sinus	sin(x1)
fonction cosinus	cos(x1)
fonction tangente	tan(x1)
fonction arcsinus	asin(x1)
fonction arccosinus	acos(x1)
fonction arctangente	atan(x1)
fonction exponentielle	exp(x1)
fonction logarithme népérien	log(x1)
fonction sinus hyperbolique	sinh(x1)
fonction cosinus hyperbolique	cosh(x1)
fonction tangente hyperbolique	tanh(x1)

### 18.3.3 - SYNTAXE

Les expressions mathématiques sont écrites suivant la syntaxe habituelle des langages de programmation.

#### EXEMPLE

Toutes les expressions suivantes sont équivalentes :

```
1+2+3
1+2*(2-1)+3
1+(2*(2-1))+3
1+2*3**2-13
1+2*(3**2)-13
cos(0)+2+3
```

$\Sigma$  Une formule mathématique ne doit pas contenir de caractères blancs.

#### EXEMPLE

L'expression :

```
1+2 +3
```

représente deux valeurs numériques.

## 18.4 - COMMANDE DE REPETITION D'INSTRUCTIONS

Une ou plusieurs instructions du fichier de données peuvent être automatiquement répétées à l'aide de la commande suivante :

```
POUR i=liste << ... instructions ... >>
```

ou

```
POUR i=liste
  <<
  ...
  instructions
  ...
  >>
```

Les commandes de répétition peuvent être imbriquées les unes dans les autres.

— *Le nombre maximum d'imbrications est donné dans le fichier paramètres (cf. p329).*

### EXEMPLE

```
k=0
POUR i=1 a 10
  <<
  POUR j=1 a 5
    <<
    k=k+1 ; NOEUD k i j
    >>
  >>
```

— *En sortie de boucle, l'indice de boucle est égal à la dernière valeur de la liste de contrôle de boucle.*

— *Si la valeur d'un indice de boucle est changée à l'intérieur de la boucle, celle-ci sera réinitialisée à l'itération suivante, et le déroulement de la boucle n'en sera pas affecté.*

— *L'exécution d'une boucle POUR peut être modifiée par l'instruction PASSER ou par l'instruction BRISER (ces deux instructions sont décrites plus loin).*

## 18.5 - DEBRANCHEMENTS CONDITIONNELS

Une ou plusieurs instructions du fichier de données peuvent être prises en compte ou ignorées suivant le résultat d'une expression logique :

```
SI(expression logique)  instruction simple
SINON                   instruction simple
```

ou

```
SI(expression logique)
  <<
```

```
  ...
  instructions
```

```
  ...
  >>
```

```
SINON
```

```
  <<
```

```
  ...
  instructions
```

```
  ...
  >>
```

Les débranchements conditionnels peuvent être imbriqués les uns dans les autres.

*Le nombre maximum d'imbrications est donné dans le fichier paramètres (cf. p329).*

### EXEMPLE

```
SI (i<=12)
  <<
  SI (j==2) NOEUD 12 5 6
  SINON
    <<
    k=k+1
    NOEUD k i j
    >>
  >>
```

### 18.5.1 - EXPRESSIONS LOGIQUES

Les expressions logiques comprennent des opérateurs de comparaison entre valeurs numériques et éventuellement des opérateurs logiques.

#### OPERATEURS DE COMPARAISON ENTRE VALEURS NUMERIQUES

Les opérateurs suivants sont utilisables dans le fichier de données :

égal	==	ou	=
différent	/=		
strictement supérieur	>		
strictement inférieur	<		
supérieur ou égal	>=		
inférieur ou égal	<=		

#### EXEMPLE

SI (i==1) est équivalent à SI (i=1)

#### OPERATEURS LOGIQUES

Les opérateurs suivants sont utilisables dans le fichier de données :

NON  
ET  
OU

Les expressions logiques sont écrites suivant la syntaxe du langage de programmation GENFOR.

#### EXEMPLES

Les expressions logiques suivantes sont équivalentes :

SI (a1==2 ET a1>2 OU a2<3)  
SI ((a1==2 ET a1>2) OU a2<3)  
SI (a1>=2OU a2<3)  
SI (NON a1<2 OU a2<3)  
SI (NON (a1<2 ET a2>=3))

*Les expressions logiques ne sont utilisables que dans l'instruction SI (...).*

### 18.5.2 - DEBRANCHEMENT SUR UNE INSTRUCTION SIMPLE

Dans le cas où le débranchement conditionnel concerne seulement une instruction, l'utilisateur a la possibilité de mettre des guillemets << >> ou de ne pas en mettre.

#### EXEMPLE

Les instructions suivantes sont équivalentes :

```
SI(i==j)    NOEUD i 12. 11.
SI(i==j) << NOEUD i 12. 11. >>
```

— *Sont considérées comme des instructions simples les instructions qui ne comportent pas de fin de ligne (ou de séparateur ;).*

#### EXEMPLE

Les instructions suivantes sont équivalentes :

```
SI(i==j)    SI(k==11) NOEUD i 12 11    ; SINON LIRE 'fichier1'
SI(i==j) << SI(k==11) NOEUD i 12 11 >> ; SINON LIRE 'fichier1'
```

— *L'instruction POUR est considérée comme une instruction simple si elle est écrite sur une seule ligne.*

#### EXEMPLE

Les instructions suivantes sont équivalentes :

```
SI(i==j)    POUR k=1 a 10 << jj=jj+1 ; NOEUD jj k+1 k*4 >>
SI(i==j) << POUR k=1 a 10 << jj=jj+1 ; NOEUD jj k+1 k*4 >> >>
```

### 18.5.3 - DEBRANCHEMENT SUR UN BLOC D'INSTRUCTIONS

Dans le cas où le débranchement conditionnel concerne plusieurs instructions il est obligatoire de mettre des guillemets << >>.

#### EXEMPLE

Les instructions suivantes :

```
SI(i==j) << LIRE 'fichier1' ; POUR i=1 a 10 << NOEUD i xx(i) yy(i) >> >>
SINON << jj = jj+1 ; POUR i=1 a 3 << NOEUD jj xx(i)**2 yy(i)**2 >> >>
```

sont équivalentes à :

```
SI(i==j)
<<
  LIRE 'fichier1'
  POUR i=1 a 10
  <<
    NOEUD i xx(i) yy(i)
  >>
>>
SINON
<<
  jj = jj+1
  POUR i=1 a 3
  <<
    NOEUD jj xx(i)**2 yy(i)**2
  >>
>>
```

## 18.6 - MODIFICATIONS DE L'EXECUTION DES BOUCLES POUR

### 18.6.1 - INSTRUCTION PASSER

Les instructions finales contenues dans une boucle POUR peuvent être ignorées à l'aide de l'instruction :  
PASSER

#### EXEMPLE

<p>Les instructions</p> <pre>POUR i=1 a 10   &lt;&lt;   ...   instructions   ...   SI (i==7) PASSER   ...   instructions   ...   &gt;&gt;</pre>	<p>sont équivalentes à</p> <pre>POUR i=1 a 10   &lt;&lt;   ...   instructions   ...   SI (i/=7)   &lt;&lt;   ...   instructions   ...   &gt;&gt;   &gt;&gt;</pre>
---	---

### 18.6.2 - INSTRUCTION BRISER

L'exécution d'une boucle POUR peut être interrompue par l'instruction :  
BRISER

#### EXEMPLE

<p>Les instructions</p> <pre>POUR i=1 a 10   &lt;&lt;   ...   instructions   ...   SI (i==5) BRISER   ...   instructions   ...   &gt;&gt;</pre>	<p>sont équivalentes à</p> <pre>POUR i=1 a 5   &lt;&lt;   ...   instructions   ...   SI (i&lt;5)   &lt;&lt;   ...   instructions   ...   &gt;&gt;   &gt;&gt;</pre>
---	--

— L'indice de boucle conserve sa valeur au moment du BRISER.

## 18.7 - RECUPERATION DES RESULTATS D'UN CALCUL DANS UNE VARIABLE

Les résultats d'un calcul peuvent être récupérés dans des variables de manière à pouvoir être directement exploités dans la suite du fichier de données.

Cette récupération s'effectue à l'aide de l'instruction `GET` (voir détails ci-dessous) dans des variables tampon d'un type particulier préfixées par le caractère `$`.

### EXEMPLE : DESACTIVATION DE L'APPUI 2 SI LA REACTION FY DE LA COMBINAISON 10 EST NEGATIVE (OPTION PLANE)

```
...
GET REAC APPUI 2 COMB 10
SI($fy<0) DESACTIVER APPUI 2
...
```

L'instruction `GET` ci-dessus affecte les valeurs de la réaction de l'appui 2 dans les variables `$FX`, `$FY`, `$MZ`.

### EXEMPLE : PONDERATION DANS LA COMBINAISON 122 DES RESULTATS DU CHARGEMENT 12, DE MANIERE A CE QUE LA CONTRAINTE VYVZ DANS LA SECTION 1 DE LA BARRE 13, SOIT EGALE 35 MPA (OPTION SPATIALE)

```
...
GET CONTR BARRE 13 SEC 1 CHARG 12
COMB 122 ' efforts ponderes du chargement 12'
CHARG 12 35/$vyvz
FIN
```

L'instruction `GET` ci-dessus affecte les valeurs des contraintes de la section 1 de la barre 13 dans les variables `$VYVZ`, `$WYVZ`, `$VYWZ`, `$WYWZ`.

— *Une erreur survenue lors de l'utilisation de l'instruction `GET` déclenche l'affichage d'un message d'erreur et la modification de la variable `$ERR` (en cas d'erreur `$ERR=1` sinon `$ERR=0`).*

— *L'utilisation de l'instruction `GET` écrase le contenu des variables tampon utilisées. Dans le cas où l'utilisateur désire conserver certaines valeurs, il devra les stocker dans d'autres variables.*

#### EXEMPLE

```
GET DEPLA NOEUD 1 CHARG 2
toto=$dx
GET DEPLA NOEUD 2 CHARG 2
```

### 18.7.1 - RECUPERATION DES DEPLACEMENTS D'UN NŒUD

La récupération des déplacements de nœuds provenant d'un chargement, d'une combinaison, d'un état, d'un phasage, d'un flambement ou d'un incendie s'effectue selon la syntaxe :

```
GET DEPLA NOEUD i <CHARG, COMB, ETAT, PHASAGE, FLAMBEMENT, INCENDIE> j
```

La récupération des déplacements de nœuds provenant d'une enveloppe s'effectue selon la syntaxe :

```
GET DEPLA <MAX, MIN> NOEUD i ENV j
```

avec :

i	numéro du nœud
j	numéro du chargement, combinaison, enveloppe

Les commandes ci-dessus affectent les déplacements du nœud i dans les variables suivantes :

Option PLANE	\$dx, \$dy, \$rz
Option GRILL	\$rx, \$dz, \$rz
Option SPATIALE	\$dx, \$dy, \$dz, \$rx, \$ry, \$rz

#### EXEMPLE : RECUPERATION DES DEPLACEMENTS MAXIMUM DU NŒUD 3 DE L'ENVELOPPE 10

```
GET DEPLA MAX NOEUD 3 ENV 10  
v1 = $dx ; v2 = $dy ; v3 = $rz
```

— Une erreur survenue lors de l'utilisation de l'instruction *GET* déclenche l'affichage d'un message d'erreur et la modification de la variable *\$ERR* (en cas d'erreur *\$ERR=1* sinon *\$ERR=0*).

— L'utilisation de l'instruction *GET* écrase le contenu des variables tampon utilisées. Dans le cas où l'utilisateur désire conserver certaines valeurs, il devra les stocker dans d'autres variables.

### 18.7.2 - RECUPERATION DES REACTIONS D'UN APPUI

La récupération des réactions d'un appui provenant d'un chargement, d'une combinaison, d'un état, d'un phasage ou d'un incendie s'effectue selon la syntaxe :

```
GET REAC APPUI i <CHARG, COMB, ETAT, PHASAGE, INCENDIE > j
```

La récupération des réactions d'un appui provenant d'une enveloppe ou d'une surcharge s'effectue selon la syntaxe :

```
GET REAC <MAX, MIN> APPUI i <ENV, SURCH> j
```

avec :

i	numéro de l'appui
j	numéro du chargement, combinaison, enveloppe ou surcharge

Les commandes ci-dessus affectent les réactions de l'appui i dans les variables suivantes :

Option PLANE	\$fx, \$fy, \$mz
Option GRILL	\$fz, \$mx, \$my
Option SPATIALE	\$fx, \$fy, \$fz, \$mx, \$my, \$mz

#### EXEMPLE : RECUPERATION DES REACTIONS MINIMUM DE L'APPUI 4 DE L'ENVELOPPE 11. UTILISATION D'UN TEST SUR LA COMPOSANTE FY POUR REDEFINIR CET APPUI

```
GET REAC MIN APPUI 4 ENV 11
SI($fy<0) APPUI 4 dx
```

- *Une erreur survenue lors de l'utilisation de l'instruction GET déclenche l'affichage d'un message d'erreur et la modification de la variable \$ERR (en cas d'erreur \$ERR=1 sinon \$ERR=0).*
- *L'utilisation de l'instruction GET écrase le contenu des variables tampon utilisées. Dans le cas où l'utilisateur désire conserver certaines valeurs, il devra les stocker dans d'autres variables.*

### 18.7.3 - RECUPERATION DES RESULTATS SUR UNE BARRE

La récupération des résultats d'une section d'étude d'une barre provenant d'un chargement, d'une combinaison, d'un état, d'un phasage ou d'un incendie s'effectue selon la syntaxe :

```
GET <EFFORT, DEPLA, CONTR, PRESS, CONTRG k>
  BARRE i SEC n <CHARG, COMB, ETAT, PHASAGE, INCENDIE > j
```

La récupération des résultats d'une section d'étude d'une barre provenant d'une enveloppe ou d'une surcharge s'effectue selon la syntaxe :

```
GET <EFFORT, DEPLA, CONTR, PRESS, CONTRG k> <MAX, MIN> BARRE i SEC n
  <ENV, SURCH>j
```

avec :

i	numéro de la barre
n	numéro de la section d'étude (cf. commande <i>ETUDE p98</i> )
j	numéro du chargement, combinaison, enveloppe ou surcharge
k	numéro de la CONTRG (cf. commande <i>CONTRG p100</i> )

Les commandes ci-dessus affectent les résultats de la section d'étude n de la barre i dans les variables suivantes :

**Récupération des efforts** : GET EFFORT BARRE ... (cas d'une section d'étude des efforts)

```
Option PLANE      $n, $ty, $mz
Option GRILL      $mx, $tz, $mz
Option SPATIALE  $n, $ty, $tz, $mx, $my, $mz
```

**Récupération des déplacements** : GET DEPLA BARRE ... (cas d'une section d'étude des déplacements)

```
Option PLANE      $dx, $dy, $rz
Option GRILL      $rx, $dz, $rz
Option SPATIALE  $dx, $dy, $dz, $rx, $ry, $rz
```

**Récupération des contraintes** : GET CONTR BARRE ... (cas d'une section d'étude des efforts et d'une barre dont les fibres ont été définies)

```
Option PLANE      $vy, $wy
Option GRILL      $vz, $wz
Option SPATIALE  $vyvz, $wyvz, $vywz, $wywz
```

**Récupération des pressions :** GET PRESS BARRE ... (cas d'une section d'étude des déplacements et d'une barre sur sol élastique)

```
Option PLANE      $px, $py
Option GRILL      $mx, $pz
Option SPATIALE  $px, $py, $pz, $mx
```

**Récupération d'une contrainte généralisée :** GET CONTRG k BARRE ... (cas d'une section d'étude des efforts et d'une barre pour laquelle la contrainte généralisée k a été définie)

```
Option PLANE      $contrg
Option GRILL      $contrg
Option SPATIALE  $contrg
```

Tous les types de demande de résultat pour une section d'étude de barre mettent à jour 2 variables tampon supplémentaires :

```
$XL      abscisse de la section d'étude sur la barre
$NSEC    nombre de sections d'étude de la barre
```

**EXEMPLE : RECUPERATION DE L'EFFORT NORMAL DANS LA SECTION 1 DE LA BARRE 2 POUR LE CHARGEMENT 3**

```
GET EFFORT BARRE 2 SEC 1 CHARG 3
```

**EXEMPLE : RECUPERATION DANS LA VARIABLE V1, DU MOMENT DE FLEXION MZ MAXIMUM DE LA BARRE 4 POUR L'ENVELOPPE 11 ET DANS LA VARIABLE V2 L'ABSCISSE LOCALE DE CE MAXIMUM**

```
GET EFFORT MAX BARRE 4 SEC 1 ENV 11
v1 = $mz ; v2 = $xl
pour i=2 a $nsec
  <<
    GET EFFORT MAX BARRE 4 SEC i ENV 11
    SI (v1<$mz) << v1=$mz ; v2=$xl >>
  >>
```

— Une erreur survenue lors de l'utilisation de l'instruction GET déclenche l'affichage d'un message d'erreur et la modification de la variable \$ERR (en cas d'erreur \$ERR=1 sinon \$ERR=0).

— L'utilisation de l'instruction GET écrase le contenu des variables tampon utilisées. Dans le cas où l'utilisateur désire conserver certaines valeurs, il devra les stocker dans d'autres variables.

### 18.7.4 - RECUPERATION DE RESULTATS D'HISTORIQUE SUR UNE BARRE

La récupération des résultats enveloppe d'une section d'étude d'une barre provenant spécifiquement d'un historique s'effectue selon la syntaxe :

```
GET <ACCELERATION, VITESSE> <MAX,MIN> BARRE i SEC n HISTORIQUE j
```

avec :

i            numéro de la barre  
n            numéro de la section d'étude (cf. commande *ETUDE* p98)  
j            numéro de l'historique

Les commandes ci-dessus affectent les résultats de la section d'étude n de la barre i dans les variables suivantes :

**Récupération des accélérations enveloppes :** GET ACCELERATION... BARRE ...

Option PLANE        \$dx, \$dy, \$rz  
Option GRILL        \$rx, \$dz, \$rz  
Option SPATIALE    \$dx, \$dy, \$dz, \$rx, \$ry, \$rz

**Récupération des vitesses enveloppes :** GET VITESSE... BARRE ...

Option PLANE        \$dx, \$dy, \$rz  
Option GRILL        \$rx, \$dz, \$rz  
Option SPATIALE    \$dx, \$dy, \$dz, \$rx, \$ry, \$rz

Tous les types de demande de résultat pour une section d'étude de barre mettent à jour 2 variables tampon supplémentaires :

\$XL            abscisse de la section d'étude sur la barre  
\$NSEC        nombre de sections d'étude de la barre

### 18.7.5 - RECUPERATION DES RESULTATS SUR UN CABLE

La récupération des résultats d'une section du câble d'une barre provenant d'un chargement, d'une combinaison, d'un état ou d'un phasage s'effectue selon la syntaxe :

```
GET TENSION CABLE i SEC n <CHARG, ETAT, PHASAGE > j
```

avec :

i	numéro du câble
n	numéro de la section du câble
j	numéro de l'état, du phasage ou du chargement

Tous les types de demande de résultat pour une section de câble mettent à jour les variables tampon :

\$nsec	nombre de sections du câble
\$xl	abscisse curviligne à la section étudiée du câble
\$sigp	contrainte totale à la section étudiée du câble
\$dsigp	contrainte de perte à la section étudiée du câble
\$x	abscisse X de la section du câble étudié dans le repère global
\$y	ordonnée Y de la section du câble étudié dans le repère global
\$z	cote Z de la section du câble étudié dans le repère global

#### EXEMPLE : RECUPERATION DE LA TENSION DU CABLE DANS LA SECTION 2 DU CABLE 101 POUR LE PHASAGE 31

```
GET TENSION CABLE 101 SEC 2 PHASAGE 31
  ecrire 'nb section'      $nsec
  ecrire 'abs curviligne'  $xl
  ecrire 'Contrainte'     $sigp
  ecrire 'Perte'          $dsigp
  ecrire 'X :'            $x
  ecrire 'Y :'            $y
  ecrire 'Z :'            $z
```

### 18.7.6 - RECUPERATION DES RESULTATS SUR UN FLAMBEMENT

La récupération des résultats de l'effet critique (valeur propre) d'un mode de flambement s'effectue selon la syntaxe :

```
GET ALPHA FLAMBEMENT i
```

avec :

i	numéro du mode de flambement critique
---	---------------------------------------

Tous les types de demande de résultat mettent à jour les variables tampon supplémentaires :

\$alpha	Valeur propre critique (effet critique)
---------	---

## 18.8 - COMMANDE ECRIRE

Pour écrire un commentaire ou une valeur, on utilise la commande `ECRIRE`. Par défaut, l'écriture s'affiche à la console, sauf si la commande `SORTIE` a été utilisée préalablement, le résultat s'affiche alors dans la sortie spécifiée par cette dernière commande.

### EXEMPLE :

```
icas = 1
ECRIRE 'ICAS : ' icas
```

## 18.9 - COMMANDE PAUSE

Cette commande permet d'arrêter momentanément l'interprétation d'un fichier de commandes pendant son exécution en vue de faciliter son débogage pour l'utilisateur. Attention, elle ne doit cependant pas être placée à l'intérieur d'une commande (par exemple elle ne doit pas être dans la description d'une charge, mais après la fin de sa description).

Pour continuer l'exécution des commandes, il suffit de valider à l'aide de la touche `<ENTER>`.

### EXEMPLE :

```
EXEC charg 1
PAUSE
EXEC charg 2
```

*Dans l'exemple, l'exécution de la charge 1 est réalisée le prompt s'affiche à l'écran.*

- *L'exécution de la charge 2 ne s'effectuera qu'après validation de la touche `<ENTER>` par l'utilisateur.*

## 18.10 - EXEMPLE DE PSEUDO-PROGRAMMATION: POUSSAGE D'UN PONT

### 18.10.1 - FICHIER DE DONNEES

```

#===== PSEUDO.ST1 =====
#
#      Exemple de fichier de données pour le poussage d'un pont
#
#      Les longueurs des travées et de la longueur EA doivent être un multiple
#      du pas de poussage
#
#      avb tr1 tr2 tr3 tr4  ea  aire
#      ===x---x---x---x---x      xxxxxx
#           1   2   3   4   5
#
#=====
titre 'Poussage d'un pont'
#----- définition du pas de poussage -----
pasp = 3.39
#----- aire de préfabrication -----
npea = 6          # longueur entre l'aire de préfabrication et l'appui de rive
#----- définition du tablier -----
ntrav = 4        # nombre de travées
dim nptr(ntrav)  # longueurs des travées (nombre de pas de poussage)
      nptr(1) = 15
      nptr(2) = 15
      nptr(3) = 15
      nptr(4) = 14

# caractéristiques du tablier
sxtbl =      10.851  # section
sytbl =       2.843  # section réduite d'effort tranchant
iztbl =      16.850  # inertie
vytbl =       1.345  # fibre supérieure
wytbl =       1.855  # fibre inférieure
etbl = 3912000.    # module de Young
nutbl =       .2    # coefficient de Poisson
rotbl =       2.50  # poids volumique

dim petr(ntrav+1) # poids des entretoises sur appui
      petr(1) = 90
      petr(2) = 65
      petr(3) = 90
      petr(4) = 65
      petr(5) = 90

```

```

#----- définition de l'avant bec -----
npbec = 10          # longueur de l'avant bec (nombre de pas de poussage)

cara              # caractéristiques des barres de l'avant bec
  1 sx 0.160 sy 0.048 iz 0.0461 vy 0.55 wy 0.55
  2 sx 0.168 sy 0.056 iz 0.0640 vy 0.65 wy 0.65
  3 sx 0.176 sy 0.064 iz 0.0853 vy 0.75 wy 0.75
  4 sx 0.184 sy 0.072 iz 0.1102 vy 0.85 wy 0.85
  5 sx 0.192 sy 0.080 iz 0.1387 vy 0.95 wy 0.95
  6 sx 0.248 sy 0.088 iz 0.2291 vy 1.05 wy 1.05
  7 sx 0.256 sy 0.096 iz 0.2765 vy 1.15 wy 1.15
  8 sx 0.264 sy 0.104 iz 0.3290 vy 1.25 wy 1.25
  9 sx 0.272 sy 0.112 iz 0.3868 vy 1.35 wy 1.35
 10 sx 0.280 sy 0.120 iz 0.4500 vy 1.45 wy 1.45

# caractéristiques des matériaux de l'avant bec
ehec = 20000000.    # module de Young
nubec = .3          # coefficient de Poisson
robec = 10.         # poids volumique (équivalent)

#-----
#                               lancement des calculs
#-----

#----- définition du chargement -----
charg 1 'poids propre : avant bec + tablier + entretoises'
  poids propre tout
  j = npbec+1 ; noeud j fy -petr(1)
  pour i=1 a ntrav << j=j+nptr(i) ; noeud j fy -petr(i+1) >>
fin

#----- calcul du nombre de barres du tablier -----
nbtbl = 0
pour i=1 a ntrav << nbtbl = nbtbl+nptr(i) >>

#----- calcul du nombre de barres total (avant bec+tablier) ---
nttx = nbtbl+npbec

#----- génération des noeuds-barres de l'avant bec et du tablier
gener nttx+1 noeud id 1 x 0. pasp y 0. 0.
gener nttx barre id 1 de 1 1 a 2 1

#----- définition des listes des barres -----
bec = 1 a npbec; tbl = npbec+1 a nttx

#----- définition des appuis -----
appui
  1 a nttx+1 dx dy

#----- définition des caractéristiques du tablier -----
cara
  tbl sx sxtbl sy sytbl iz iztbl vy vytbl wy wytbl

cons
  tbl e etbl ro rotbl nu nutbl

```

```

#----- définition des caractéristiques de l'avant bec -----
cons
    bec e ebec ro robec nu nubec
activer barre tout
#----- définition d'un tableau de calcul contenant les travées
#----- et la distance aire de préfabrication - appui -----
dim nptrc(ntrav+1)
pour i=1 a ntrav << nptrc(ntrav-i+1) = nptr(i) >>
nptrc(ntrav+1) = npbec
#----- la phase 1 correspond à l'avant bec sur le premier appui
pour i=1 a ntrav+1 # boucle sur les travées
<< # numéro de la première phase : début de l'avant bec sur appui i
# définition d'un tableau de calcul contenant les travées
# et la distance aire de préfabrication - appui (suite)

    pour j=1 a nptrc(i)+1 # boucle sur les phases correspondant à l'avant bec
    << # sur la travée i (appui i et i+1) sur l'appui
    desactiver appui tout
    idec = j
    pour jj=i-1 a 1 pas -1
    << # activation des appuis
    activer appui idec
    idec = idec+nptrc(jj)
    >>
    activer appui idec
    pour jj=idec+npea a nttx+1 << activer appui jj >>
    lister activation
    exec charg 1
        env 1 'enveloppe des phases de poussage'
        env 1
        charg 1
    fin
    >>
>>

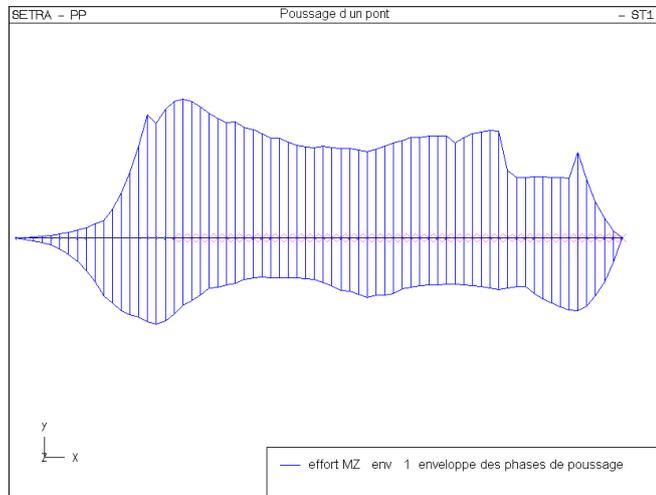
#----- démontage de l'avant bec -----
desactiver barre bec
lister activation
exec charg 1
    env 1 'enveloppe des phases de poussage'
    env 1
    charg 1
fin
#----- sortie des résultats -----
sortie 'pseudo.txt'
resu
    barre effort contr env 1
fin

```

### 18.10.2 - VISUALISATION DES RESULTATS DU CALCUL

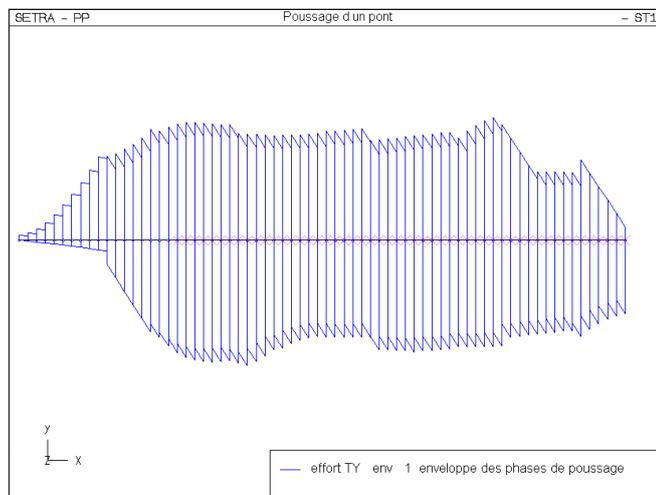
Le dessin de l'enveloppe des moments fléchissant de l'ensemble des phases de poussage s'obtient par les commandes suivantes :

```
geom
effort mz env 1
```



Le dessin de l'enveloppe des efforts tranchants de l'ensemble des phases de poussage s'obtient par les commandes suivantes :

```
cls
geom
effort ty env 1
```



La sortie de **ST1** s'effectue par la commande *QUIT* ou *QUITTER* (cf. p41).

### 18.10.3 - FICHER RESULTAT

Le fichier résultat correspondant à cet exemple se trouve dans le répertoire `exemples` de **ST1** (`pseudo.txt`).

## 19

## EXEMPLES DE FICHIERS DE DONNEES

Tous les exemples fournis avec ST1 ne sont pas détaillés dans la documentation.

— Le répertoire Exemple de ST1 contient

### 19.1 - STRUCTURE PLANE - CALCUL D'UN CADRE FERME SUR SOL ELASTIQUE

On étudie dans cet exemple l'ouvrage sous charges permanentes. L'étude du même ouvrage sous charges d'exploitation est présentée dans l'exemple suivant.

#### 19.1.1 - FICHIER DE DONNEES

```
#=====
#
#      Exemple de fichier de données pour le calcul d'un cadre fermé
#
#      Charges permanentes
#
#-----
#
#              description des données
#-----
#----- définition des noeuds -----
noeud
  1 0. 0.
  2 0. 5.
  3 6. 5.
  4 6. 0.
#----- définition des liaisons des barres -----
barre
  1 1 2
  2 2 3
  3 3 4
  4 4 1
#----- définition des caractéristiques des barres -----
cara
  1,2,3 sx .35 iz 3.57e-3
cara pse
  4      sx .37 iz 4.22e-3 zone 1 kfx 10. kfy 2000.
```

```

#----- définition des constantes des matériaux -----
cons
  tout e 1.e6 ro 2.5
#----- définition des chargements -----
charg 1 'poids propre du cadre et effet d''une charge répartie'
  poids propre tout
  barre
    2 uni fy -.300
fin
charg 2 'poussée des terres unitaire k=1'
  barre
    1 lin xl 0. 1. rel fx 10. 0.
    3 lin xl 0. 1. rel fx 0. -10.
fin
#----- définition des sections d'étude intérieures aux barres -
etude effort
  tout se 0. a 1 pas 0.1
fin
exec charg
env 1 'enveloppe de la poussée des terres : coef. : 0.25 et 0.50'
  charg
    2 .25
    2 .50
fin
env 2 comb 'combinaison ELS des charges permanentes'
  charg 1
  env 1
fin
env 3 comb 'combinaison ELU des charges permanentes'
  charg 1 1.00 1.35
  env 1 1.00 1.35
fin
#----- définition du fichier de sortie -----
sortie 'exemple1.txt'
#----- rappel de la géométrie -----
lister geom
#----- effort R.D.M. pour toutes les barres -----
resu
  charg 1 env 1,2,3
  barre
fin

```

### 19.1.2 - FICHIER RESULTAT

Le fichier résultat correspondant à cet exemple se trouve dans le répertoire `exemples` de **ST1** (`exemple1.txt`).

### 19.1.3 - VISUALISATION DES RESULTATS DU CALCUL

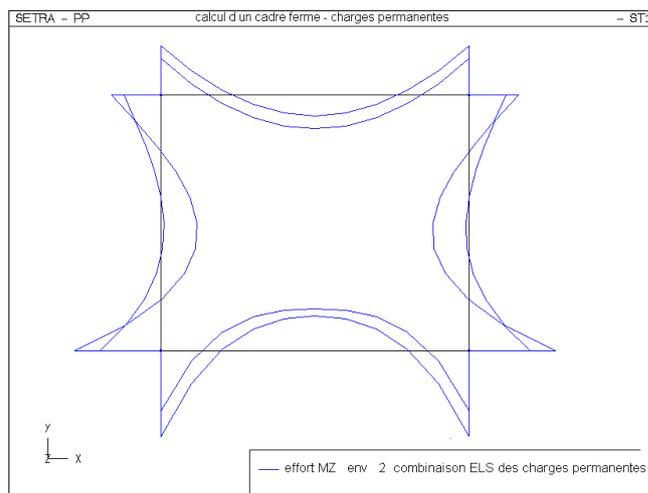
Les calculs ayant été effectués, il est possible d'en visualiser les résultats.

A la fin de la lecture du fichier de données, **ST1** rend la main à l'utilisateur, ceci se traduit par l'écriture du prompt > à l'écran.

Le passage en mode graphique s'effectue par la commande `DESS` (cf. p257). L'écran passe alors en mode graphique.

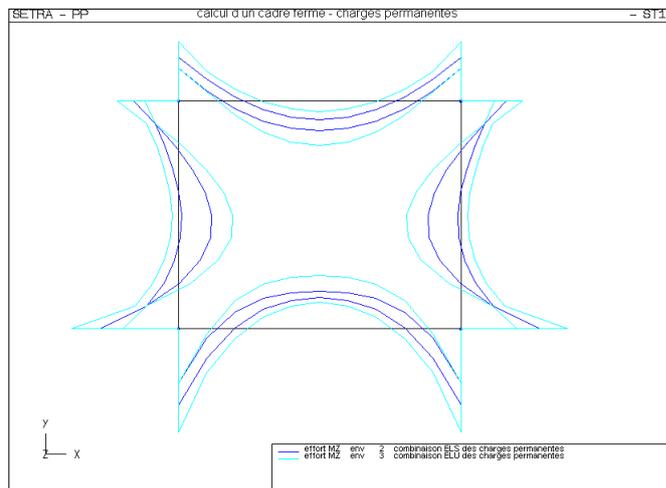
Le dessin des moments fléchissants de l'enveloppe ELS est obtenu par la succession des commandes suivantes :

```
geom
effort mz env 2
centr
```



La superposition de l'enveloppe ELU sur le dessin précédent s'obtient par les commandes suivantes :

```
geom
effort mz env 2
centr
```



La sortie de **ST1** s'effectue par la commande `QUIT` ou `QUITTER` (cf. p41).

## 19.2 - STRUCTURE PLANE - CALCUL D'UN CADRE FERME SOUS CHARGES D'EXPLOITATION

On étudie dans cet exemple un cadre fermé sollicité par les charges d'exploitation routières A(l), Bc et Bt.

- L'ouvrage est modélisé sur une largeur de 1.00 m. Les charges d'exploitation sont pondérées par des coefficients permettant le passage de l'ouvrage réel au modèle de calcul (le calcul de ces coefficients n'est pas fait par **ST1** - voir théorie de M. Guyon).
- L'étude des charges d'exploitation implique le calcul d'une ligne d'influence pour chaque section, et pour chaque effort étudié. Ceci peut conduire à des temps de calcul relativement importants.

### 19.2.1 - FICHER DE DONNEES

```
#===== EXEMPLE2.ST1 =====
#
#   Exemple de fichier de données pour le calcul d'un cadre fermé
#
#   charges permanentes + charges d'exploitation
#
#-----
titre 'Calcul d'un cadre fermé - Charges permanentes + charges d'exploitation'
#----- définition des noeuds -----
noeud
  1 0. 0.
  2 0. 5.
  3 6. 5.
  4 6. 0.

#----- définition des liaisons des barres -----
barre
  1 1 2
  2 2 3
  3 3 4
  4 4 1

#----- définition des caractéristiques des barres -----
cara
  1,2,3 sx .35 iz 3.57e-3
cara pse
  4 sx .37 iz 4.22e-3 zone 1 kfx 10. kfy 2000.

#----- définition des constantes des matériaux -----
cons
  tout e 1.e6 ro 2.5
```

```

#----- définition des chargements -----
charg 1 'poids propre du cadre et effet d'une charge répartie'
  poids propre tout
  barre
    2 uni fy -.300
fin
charg 2 'poussée des terres unitaire k=1'
  barre
    1 lin xl 0. 1. rel fx 10. 0.
    3 lin xl 0. 1. rel fx 0. -10.
fin
#----- définition des sections d'étude intérieures aux barres -
etude effort
  tout se 0. a 1 pas 0.1
fin
exec charg
env 1 'enveloppe de la poussée des terres : coef. : 0.25 et 0.50'
  charg
    2 .25
    2 .50
fin
env 2 comb 'combinaison ELS des charges permanentes'
  charg 1
  env 1
fin
env 3 comb 'combinaison ELU des charges permanentes'
  charg 1 1.00 1.35
  env 1 1.00 1.35
fin
#----- définition du tablier -----
tablier
  barre 2
fin
surch 1 'étude de A(l)'
  al
  pond .720 # pondération (a1*a2*larg_voie*coef_gyon)/larg_ouvrage
fin
surch 2 'étude de BC'
  bc
  pond .250 # pondération del_bc*(bc*n_voie*coef_gyon)/larg_ouvrage
fin
surch 3 'étude de BC'
  bt
  pond .220 # pondération del_bt*(bt*n_voie*coef_gyon)/larg_ouvrage
fin

```

```
#----- exécution des charges d'exploitation -----  
exec surch  
env 4 'enveloppe des charges d''exploitation'  
surch 1 a 3  
fin  
env 5 comb 'combinaison ELS charges permanentes + charges d''exploitation'  
env 2  
env 4 1.2  
fin  
env 6 comb 'combinaison ELU charges permanentes + charges d''exploitation'  
env 3  
env 4 1.6  
fin  
#----- définition du fichier de sortie -----  
sortie 'exemple2.txt'  
#----- effort R.D.M. dans la traverse supérieure -----  
resu  
surch 1 env 5,6  
barre 2  
fin
```

### 19.2.2 - FICHER RESULTAT

Le fichier résultat correspondant à cet exemple se trouve dans le répertoire `exemples` de **ST1** (`exemple2.txt`).

## 19.3 - STRUCTURE SPATIALE - CALCUL D'UN PONT A HAUBANS

On étudie dans cet exemple un pont à haubans sollicité par des charges de trottoir et les charges routières A(1) et Bc (dans cet exemple les haubans n'ont pas été réglés).

— *L'étude des charges d'exploitation implique le calcul d'une ligne d'influence pour chaque section, et pour chaque effort étudié ceci peut conduire à des temps de calcul relativement importants.*

### 19.3.1 - FICHER DE DONNEES

```

===== EXEMPLE3.ST1 =====
#
#   Exemple de fichier de données pour le calcul d'un pont à haubans
#
=====

option spatiale
titre 'Pont à haubans'
#----- définition des pylônes -----
noeud
  1 -18.359 -12.405 -6.74
  3 -18.359  12.405 -6.74
  2  19.095 -12.593 -6.1
  4  19.095  12.593 -6.1
  5  -0.57   0.    19.

barre
  5 de 1 a 3
  6 de 2 a 4

gener 4 barre id 1 1 de 1 1 a 5 0

exc
  1 or y -0.195
  3 or y  0.195
  2 or y -0.250
  4 or y  0.250

#----- définition des abouts -----
noeud
  6 -29.506 -3.8 -0.885
 20 -30.306  0. -0.909
 21 -29.506  0. -0.885
  7 -29.506  3.8 -0.885
  8  29.494 -3.8  0.885
 40  30.294  0.  0.909
 39  29.494  0.  0.885
  9  29.494  3.8  0.885

barre
 10 de  6 a 21
 11 de 21 a 7
 12 de  8 a 39
 13 de 39 a 9

```

```

#----- définition du tablier -----
noeud
 22 -26.9802 0. -0.8094
 23 -24.4604 0. -0.7338
 24 -20.9741 0. -0.6292
 25 -17.4877 0. -0.5246
 26 -13.9931 0. -0.4198
 27 -10.4984 0. -0.31495
 28 -6.9905 0. -0.2100
 29 -3.4995 0. -0.1050
 30 0. 0. 0.
 38 26.9802 0. 0.8094
 37 24.4604 0. 0.7338
 36 20.9741 0. 0.6292
 35 17.4877 0. 0.5246
 34 13.9931 0. 0.4198
 33 10.4984 0. 0.31495
 32 6.9905 0. 0.2100
 31 3.4995 0. 0.1050

gener 20 barre id 20 1 de 20 1 a 21 1

#----- définition des haubans -----
gener 8 barre id 40 1 de 23 2 a 5

exc
 40 or x -0.1901 z -0.1598 ex x -0.820 z -0.3407
 41 or x -0.1371 z -0.1582 ex x -0.803 z -0.9267
 42 or x -0.0813 z -0.1565 ex x -0.637 z -1.4372
 43 or x -0.0240 z -0.1548 ex x -0.204 z -1.5524
 44 or x 0.0333 z -0.1531 ex x 0.296 z -1.5342
 45 or x 0.0906 z -0.1514 ex x 0.722 z -1.3964
 46 or x 0.1463 z -0.1497 ex x 0.857 z -0.8768
 47 or x 0.1993 z -0.1481 ex x 0.839 z -0.2910

#----- définition des appuis -----
appui 1,3 el 26924.
          0. 5521.
          27855. 0. 66523.
          0. 707. 0. 8862.
          -6512.5 0. -12962. 0. 21025.
          0. 0. 0. 0. 0. 10.

appui 2,4 el 30690.
          0. 5521.
          -30.425 0. 63493.
          0. 707. 0. 8862.
          -10435. 0. 19215. 0. 23626.
          0. 0. 0. 0. 0. 10.

appui 6 a 9 el di 240. 240. 46000. 240. 240. 1.

#----- définition des constantes des matériaux -----
cons
 5,6,10 a 13,20 a 39 e 1.2e+06 nu 0.2 ro 2.5 temp 1.e-05
 1 a 4 e 20.e+06 nu 0.3 ro 0. temp 1.e-05
 40 a 47 e 19.37e+06 nu 0.3 ro 8.5 temp 1.1e-05

#----- définition des caractéristiques mécaniques -----
cara
 20 a 39 sx 5.922 sy 4. sz 1.5 ix 0.66 iy 0.571 iz 55.74
          vy 6.75 wy 6.75 vz 0.99 wz 0.36
 40 a 47 sx 0.0033 ix 1.e-06 iy 1.e-06 iz 1.e-06
          vy 0.1 wy 0.1 vz 0.1 wz 0.1
 1 a 4 sx 0.0828 ix 0.01533 iy 0.00766 iz 0.00766
          vy 0.5 wy 0.5 vz 0.5 wz 0.5
 5,6 sx 0.96 ix 0.03 iy 0.0153 iz 10.
          vy 0.5 wy 0.5 vz 0.5 wz 0.5
 10 a 13 sx 2.55 sz 1.7 ix 0.651 iy 0.3692 iz 10.
          vy 0.4 wy 0.4 vz 0.5828 wz 0.7172

```

```

#----- définition des chargements -----
charg 1 'effet du poids propre'
  poids propre tout
fin
charg 2 'gradient thermique 1 degres'
  temp 20 a 29 gz 1.
fin
#----- exécution des chargements -----

exec charg

#----- définition du tablier -----

tablier
  classe 1
  barre 20 a 39
    zone_trans
    1 larg 1.20      # trottoir de gauche
    2 larg 7.00     # largeur chargeable
    3 larg 1.20     # trottoir de droite
fin
#----- définition des charges d'exploitation -----

surch 1 'effet de A(1)'
  al
  zone 2
fin
surch 2 'effet de BC'
  bc
  zone 2
  pond 1.1          # coefficient de majoration dynamique
fin
surch 3 'effet des charges de trottoir'
  trot
  zone 1,3
fin
#----- exécution des charges d'exploitation -----

exec surch 1,2,3

#----- définition d'une enveloppe règlementaire -----

env 1 'charges de chaussée'
  surch 1,2
fin
env 2 comb 'combinaison ELS rare'
  charg 1          # poids propre
  charg 2 0. 6.    # gradient thermique 0 ou 6 degrés
  env 1 1.2        # charges de chaussée
  surch 3          # charge de trottoir
fin
#----- sortie des résultats -----

sortie 'exemple3.txt'

resu
  env 2
  appui barre
fin

```

### 18.3.2 - FICHER RESULTAT

Le fichier résultat correspondant à cet exemple se trouve dans le répertoire `exemples` de **ST1** (`exemple3.txt`).

### 19.3.3 - VISUALISATION DES RESULTATS DU CALCUL

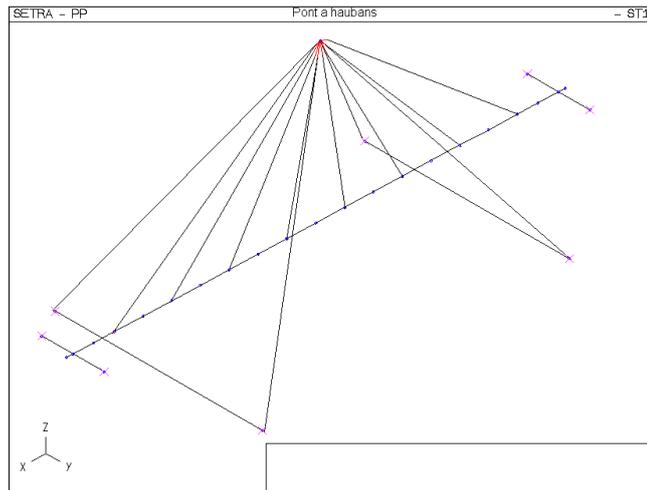
Les calculs ayant été effectués, il est possible d'en visualiser les résultats.

A la fin de la lecture du fichier de données, **ST1** rend la main à l'utilisateur, ceci se traduit par l'écriture du prompt > à l'écran.

Le passage en mode graphique s'effectue par la commande `DESS` (cf. p257). L'écran passe alors en mode graphique.

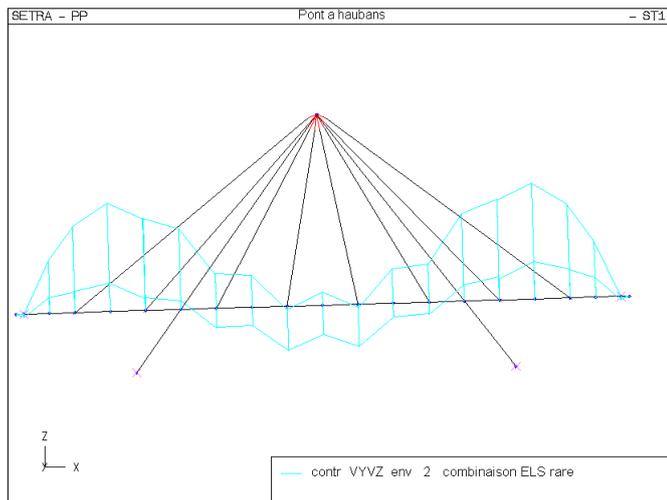
Le dessin de la géométrie de la structure s'obtient par la commande suivante :

`geom`



L'enveloppe ELS rare des contraintes de la fibre supérieure du tablier s'obtient par les commandes suivantes :

```
vue 0 -1 0
selec barre 20 ia 39
contr vyvz env 2
```



La sortie de **ST1** s'effectue par la commande `QUIT` ou `QUITTER` (cf. p41).

## 19.4 - STRUCTURE PLANE - CHARGEMENT EUROCODE 1.2

On compare dans cet exemple les résultats de chargement du modèle 1 de l'Eurocode 1.2 avec les charges Bc et Mc120 du F61-II.

$\Sigma$  *Le temps de calculs des charges Eurocode est nettement plus important que celui des autres cas de charges.*

### 19.4.1 - FICHER DE DONNEES

```

===== EXEMPLE4.ST1 =====
#
#      Exemple de fichier de données pour le chargement Eurocode 1.2
#
#      Comparaison EC1.2 (LM1) / F61,II (Bc, Mc120)
#      Toutes les charges sont exprimées en kN.
#
=====
option plane
titre 'PSIDP 3 travées EC2'
#----- méthode forfaitaire -----
gnewton=9.81      # si 1 calcul en t - si 9.81 calcul en kN
                  # unités t et m sauf spécifications contraires
                  # longueur de travées 1 et 2
lgtr1=17.5       # m
lgtr2=27         # m
                  # caractéristiques dalle
hdalle1=0.90     # m épaisseur
sectiondalle=8.007 # m2 section brute
inertiedalle=0.535 # m4 inertie brute
                  # fibre supérieure et inférieure de la dalle
fibsuf=0.386     # m
fibinf=0.514     # m
                  # périmètre de la dalle sans l'extrados en m
                  # longrine supposant protéger la dalle
perimetredalle=0*12.3+0.24*2+6.2+2.1*2+2*(0.95**2+0.55**2)**0.5
#-----
lgt1=lgtr1
lgt2=lgtr1+lgtr2
lgt3=lgtr1+lgtr2+lgtr1
noeud
  1 0.0 0.0
  2 lgt1 0.0
  3 lgt2 0.0
  4 lgt3 0.0
appui
  1 noeud 1 dy
  2 noeud 2 dx dy
  3 noeud 3 dy
  4 noeud 4 dy
barre
  1 1 2
  2 2 3
  3 3 4
cara
  tout sx sectiondalle iz inertiedalle vy fibsup wy fibinf # section tablier brut

```

```

#-----
etude effort depla
  1 se 0.0 a 1 pas 0.1 rel
  2 se 0.0 a 1 pas 0.1 rel
  3 se 0.0 a 1 pas 0.1 rel
fin

#----- béton -----
# résistance du beton à la compression à 28jours
fckk=35 # MPa
fcm=fckk+8

# module béton instantané
Ei28=22*(fcm/10)**0.3*1000 # MPa

#----- béton précontraint-----
hygrom=70 # %

modulinst=Ei28*1000/9.81*gnewton # t/m2*gnewton

mat 1 'EC2 inst'
  si (gnewton=1) << E EC2 TM2 FCK fckk >> sinon << E EC2 KNM2 FCK fckk >>
    # E modulinst
  nu 0.2 # béton non fissuré
  ro 2.5*gnewton # t/m3*gnewton
  temp 1e-5
  retrait EC2
  fluage EC2

  # H=2*Aire section trans. dalle/périmetre dalle
  # en contact à l'air (sans extradados) en mm
  rh hygrom h 2*sectiondalle/perimetredalle*1000
  ciment N
fin

cons tout mat 1 # caractéristique instantanée

#-----
# nombre de travées necessitant des coefficients de Guyon différents
ntrav_etud=1
# coefficient de répartition travée 1 à 1m du bord
listcoefrep1=1.9,-0.5
# coefficient de répartition travée 2 à 1m du bord
listcoefrep2=2,-0.6

tablier
  classe 1
  classe trafic 2
  zone_trans
    1 larg 0.5
    2 larg 11
    3 larg 0.8
  barre 1 a 3
  ldif 1*(0.08+0.45) # diffusion des impacts
  # ep chaussée min + 1/2 ep hourdis
  # ldif ne s'applique qu'aux impacts des camions
  # et pas aux charges reparties (AL,UDL,...)

  rep_trans
  kbarre 1,3 ktrans listcoefrep1
  kbarre 2 ktrans listcoefrep2
fin

```

```

#-----
surch 1 'LM1 cara'
  zone 2
  lml cara
  pond gnewton/9.81 # pond t/kN
fin
surch 2 'LM1 freq'
  zone 2
  lml freq
  pond gnewton/9.81 # pond t/kN
fin
surch 10 'Mc120'
  mc120
  zone 2
  pond 1.12*gnewton # coef. dyn.
fin
surch 11 'AL'
  al
  zone 2
  pond gnewton*1.2
fin
surch 12 'Bc'
  bc
  zone 2
  pond 1.1*gnewton*1.2 # coeff dyn *pond t/t
fin
surch 13 'Bt'
  bt
  zone 2
  pond 1.1*gnewton*1.2 # coeffdyn*pond t/t
fin
exec surch 1,2,10 a 13
surch 3 'LM3'
  zone 2
  lm3 vs_1800_200
  zonevs 2 yvs 1 7 abs pondvs 1.1
  lml lgexclu 25
  pond gnewton/9.81 # pond t/kN
fin
exec surch 3
#-----
env 31 'LM1 cara'
  surch 1 1.0
fin
env 32 'LM1 freq'
  surch 2 1.0
fin
env 35 'A B Mc120'
  surch 10,11,12,13
fin
#-----
sortie 'exemple4.txt'
resu
  lister surch 1 a 3
fin

```

### 19.4.2 - FICHER RESULTAT

Le fichier résultat correspondant à cet exemple se trouve dans le répertoire exemples de **ST1** (exemple4.txt)

### 19.4.3 - VISUALISATION DES RESULTATS DU CALCUL

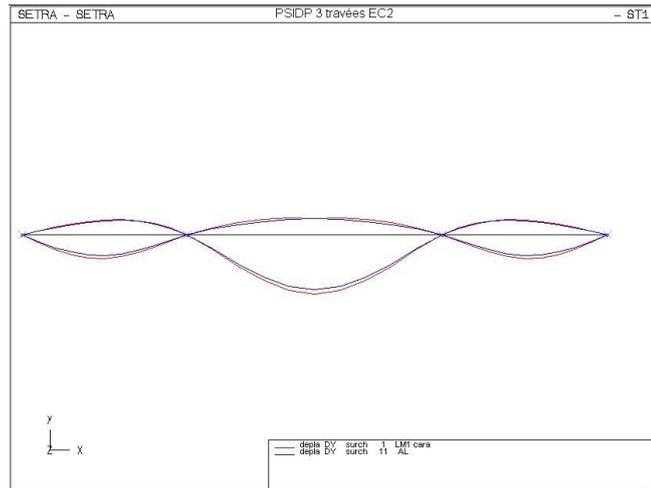
Les calculs ayant été effectués, il est possible d'en visualiser les résultats.

A la fin de la lecture du fichier de données, **ST1** rend la main à l'utilisateur, ceci se traduit par l'écriture du prompt > à l'écran.

Le passage en mode graphique s'effectue par la commande `DESS` (cf. p257). L'écran passe alors en mode graphique.

Le dessin des déplacements selon l'axe des Y s'obtient par les commandes suivantes :

```
depla DY surch 1
depla DY surch 11
```



La sortie de **ST1** s'effectue par la commande `QUIT` ou `QUITTER` (cf. p41).

## 19.5 - STRUCTURE PLANE - PRETENSION

On présente ici un exemple de calcul en prétension avec traitement thermique.

### 19.5.1 - FICHER DE DONNEES

```
##### EXEMPLE5.ST1 #####
#
#   Exemple de fichier de données pour la prétension
#
#####

OPTION SPATIALE

TITRE 'traitement_thermique_ec2'

sortie 'traitement_thermique_ec2.txt'   non pagine

#-----

NOEUD

 1  X  0.000  Y  0.000  Z  0
 2  X  10     Y  0.000  Z  0
 3  X  20     Y  0.000  Z  0

#-----

BARRE
  GENER 2 BARRE ID 11 1 DE 1 1 A 2 1
FIN

#-----

APPUI
 11 NOEUD 1      DY DZ
 12 NOEUD 2              RX
 13 NOEUD 3      DY DZ
 22 NOEUD 2 DX              RX
FIN

#-----

ETUDE EFFORT DEPLA
TOUTES SE 0. A 1. pas 0.1

#-----
```

MATERIAU 1 'Beton'

E EC2 TM2 FCK 30  
 NU 0.2 RO 2.5  
 TEMP 1e-05  
 RETRAIT EC2  
 FLUAGE EC2  
 RH 55 H 1250 CIMENT N  
 t\_therm fcmp 35 lambda 0.2 dtp 1,1,1 theta 40,60,40

FIN

#-----  
 CARA 11,12 SX 10 IX 0.1 IY 10 IZ 10 VY 1 WY 1 VZ 1 WZ 1

CONS 11,12 MAT 1

#-----

PREC 11 '1 cable 19 T15 S'  
 section 1e-3  
 tension 1000\*100  
 pretension lineaire lg\_scel 2  
 e 2e7  
 rg 2000\*100 r1000 2.5

FIN

PREC 12 '1 cable 19 T15 S'  
 section 1e-3  
 tension 1000\*100  
 pretension bilineaire lg\_scel 1 2 coef 0.6  
 e 2e7  
 rg 2000\*100 r1000 2.5

FIN

PREC 13 '1 cable 19 T15 S'  
 section 1e-3  
 tension 1000\*100  
 pretension parabol lg\_scel 3  
 e 2e7  
 rg 2000\*100 r1000 2.5

FIN

#-----

CABLE 101

PREC 11  
 BARRE 11,12  
 TRACE INTERIEUR  
 X 0 Y 0 Z 0  
 X 10 Y 0 Z 0  
 X 20 Y 0 Z 0

FIN

CABLE 102

PREC 12  
 LG\_GAINE OR 2 EX 2  
 BARRE 11,12  
 TRACE INTERIEUR  
 X 0 Y 0 Z 0  
 X 10 Y 0 Z 0  
 X 20 Y 0 Z 0

FIN

CABLE 103

PREC 13  
 PAS\_CABLE 0.5  
 LG\_GAINE OR 2  
 BARRE 11,12  
 TRACE INTERIEUR  
 X 0 Y 0 Z 0  
 X 10 Y 0 Z 0  
 X 20 Y 0 Z 0

FIN

```

#-----
PHASAGE 101 'Mise tension pretension cab 101 lin'

  ACTIVER APPUI 11,12,13
  ACTIVER APPUI 22
  DATE 0
  ACTIVER BARRE 11 A 12 AGE 0.01 # age positif quasi nul
  TENDRE_BANC CABLES 101
  DATE 5 # date superieure a la date de fin de cure
  # CHARGE POIDS PROPRE 11,12 # pour memoire, à activer pour un phasage reel
  RELACHER_BANC CABLES 101
  etat 21 'mise tension'
  DATE 100
  CHARG
    BARRE 11,12 UNI FZ -100
  FIN

FIN PHASAGE

EXEC PHASAGE
#-----
charg 101 'cable 101'
  cable 101 tension
fin

charg 104 'cable ret'
  cable 101 perte retrait 0.0001
fin
charg 105 'cable relax'
  cable 101 perte relax 0.5
fin
charg 106 'cable uni'
  cable 101 perte uni 100
fin
charg 107 'cable 100 perte inst'
  cable 101 perte inst
fin
charg 110 'cable 101 '
  cable 101 tension perte retrait 0.0001 relax 0.5 uni 100
fin
EXEC CHARG
#-----

  lister cara cable
  lister prec
  lister cable

resu
  etat barre 11,12
  etat cable
  phasage cable
  charg 110 barre 11,12
  charg 110 cable
fin

```

## 19.5.2 - FICHER RESULTAT

Le fichier résultat correspondant à cet exemple se trouve dans le répertoire `exemples` de **ST1** (`exemple6.txt`).

--- CARACTERISTIQUES DES CABLES DE PRECONTRAINTE ---

Cable	Titre	Precontrainte	Tension	Longueur	Deviation	Cf.Trans.	Allong.
101		11	Or Ex	20.000	0.000	1.000	0.100
102		12	Or Ex	20.000	0.000	1.000	0.100
103		13	Or Ex	20.000	0.000	1.000	0.100

--- DISPOSITIF DE PRECONTRAINTE : 11 -- 1 cable 19 T15 S ---

- . Section du cable : 0.10000E-02
- . Coefficient de frottement par unite d'angle : 0.0000
- . Coefficient de frottement par unite de longueur : 0.0000
- . Rentrée du cone d'ancrage : 0.0000
- . Tension : 0.10000E+06
- . Module d'Young : 0.20000E+08
- . Limite de rupture des aciers : 0.20000E+06
- . Perte par relaxation a 1000 heures : 2.5000
- . Cable avec Pretension - scellement lineaire
- . Longueur de scellement pretension : 2.0000

--- DISPOSITIF DE PRECONTRAINTE : 12 -- 1 cable 19 T15 S ---

- . Section du cable : 0.10000E-02
- . Coefficient de frottement par unite d'angle : 0.0000
- . Coefficient de frottement par unite de longueur : 0.0000
- . Rentrée du cone d'ancrage : 0.0000
- . Tension : 0.10000E+06
- . Module d'Young : 0.20000E+08
- . Limite de rupture des aciers : 0.20000E+06
- . Perte par relaxation a 1000 heures : 2.5000
- . Cable avec Pretension - scellement bilineaire
- . Longueurs de scellement pretension : 1.0000 2.0000
- . Coefficient sur contrainte maxi loi bilineaire scellement : 0.60000

--- DISPOSITIF DE PRECONTRAINTE : 13 -- 1 cable 19 T15 S ---

- . Section du cable : 0.10000E-02
- . Coefficient de frottement par unite d'angle : 0.0000
- . Coefficient de frottement par unite de longueur : 0.0000
- . Rentrée du cone d'ancrage : 0.0000
- . Tension : 0.10000E+06
- . Module d'Young : 0.20000E+08
- . Limite de rupture des aciers : 0.20000E+06
- . Perte par relaxation a 1000 heures : 2.5000
- . Cable avec Pretension - scellement parabolique
- . Longueur de scellement pretension : 3.0000

--- CABLE : 101 ---

- . Dispositif de precontrainte : 11
- . Type de mise en tension : Or Ex
- . Pas de decoupage : 0.25000
- . Longueur : 20.000
- . Deviation angulaire totale : 0.0000
- . Coefficient de transmission : 1.0000
- . Allongement a la mise en tension : 0.10000
- . Liste des barres support : 11 12
- trace interieur --
- X        Y        Z
- 0.0000    0.0000    0.0000
- 10.000    0.0000    0.0000
- 20.000    0.0000    0.0000

--- CABLE : 102 ---

- . Dispositif de precontrainte : 12
- . Type de mise en tension : Or Ex

```
. Pas de decoupage : 0.25000
. Longueur de gainage pretension : OR: 2.0000    EX: 2.0000
. Longueur : 20.000
. Deviation angulaire totale : 0.0000
. Coefficient de transmission : 1.0000
. Allongement a la mise en tension : 0.10000
. Liste des barres support :      11      12
  -- trace interieur --
    X      Y      Z
0.0000    0.0000    0.0000
10.000    0.0000    0.0000
20.000    0.0000    0.0000
```

--- CABLE : 103 ---

```
. Dispositif de precontrainte : 13
. Type de mise en tension : Or Ex
. Pas de decoupage : 0.50000
. Longueur de gainage pretension : OR: 2.0000    EX: 0.0000
. Longueur : 20.000
. Deviation angulaire totale : 0.0000
. Coefficient de transmission : 1.0000
. Allongement a la mise en tension : 0.10000
. Liste des barres support :      11      12
  -- trace interieur --
    X      Y      Z
0.0000    0.0000    0.0000
10.000    0.0000    0.0000
20.000    0.0000    0.0000
```

etc...

## 19.6 - STRUCTURE PLANE – MODE PROPRE ET SPECTRE

On présente ici un exemple de calcul de mode propres et de spectres.

### 19.6.1 - FICHER DE DONNEES

```
#-----
option plane
TITRE 'nrj Eurocode plan'

lg = 1/(2**0.5)
noeud
21 0.0 0.0
22 1.0*lg 1.0*lg
23 2.0*lg 2.0*lg
24 3.0*lg 3.0*lg
# generation barre

barre 20 de 21 a 22
barre 21 de 22 a 23
barre 22 de 23 a 24

#cons tout e 1
cara 20 sx 264000 iz 264000*3
cara 21 sx 176000 iz 176000*3
cara 22 sx 88000 iz 88000*3

amortissement 10
pond 0.01
energie ksi 5
fin

amortissement 11
pond 0.01
energie ksi 2
fin

cons 20 e 1 ro 1400/264000*10 g_dyn 10 amortissement 10 # ro en F/L3
cons 21 e 1 ro 1400/176000*10 g_dyn 10 amortissement 10
cons 22 e 1 ro 1400/88000*10 g_dyn 10 amortissement 11

masse propre
barre 20,21,22
fin

appui 1 noeud 21 dx dy rz
appui 2 noeud 22
appui 3 noeud 23
appui 4 noeud 24

etude effort depla
tout se 0 a 1 pas 1 rel

exec mode

#-----
spectre 1
pond 9.81
EUROCODE
HORIZONTAL AX 0.1 S 1 ST 1.2 PERIODE 0.01 0.2 2.5 4
VERTICAL AX 0.1*0.9 S 1.1 PERIODE 0.01 0.2 2.0 3
fin

spectre 10 reponse
spectre 1
CQC
POND X 1
fin
```

```

spectre 20 reponse
  spectre 1
  CQC
  POND Y 1
fin

exec spectre reponse 10,20

env 10 comb
  spectre 10 1.0 -1.0
  spectre 20 1.0 -1.0
fin
#-----
spectre 100 reponse
  spectre 1
  CQC
  POND X 1 Y 1
fin
spectre 101 reponse
  spectre 1
  CQC
  POND X 1 Y -1
fin
spectre 102 reponse
  spectre 1
  CQC
  POND X -1 Y 1
fin
spectre 103 reponse
  spectre 1
  CQC
  POND X -1 Y -1
fin

exec spectre reponse 100 a 103

env 100 comb
  spectre 100 1.0 -1.0
fin
env 101 comb
  spectre 101 1.0 -1.0
fin
env 102 comb
  spectre 102 1.0 -1.0
fin
env 103 comb
  spectre 103 1.0 -1.0
fin

env 1000
  env 100
  env 101
  env 102
  env 103
fin

#
#####
sortie 'exemple7.txt' non pagine

#lister amortissement
#lister spectre

RESU
  MODE FREQUENCE
  SPECTRE 10,20 barre effort
  ENV 10,1000 barre effort
FIN

```

## 19.6.2 - FICHER RESULTAT

Le fichier résultat correspondant à cet exemple se trouve dans le répertoire `exemples` de **ST1** (`exemple7.txt`).

--- AMORTISSEMENTS DYNAMIQUES ---

Nombre de definition d amortissement : 2

\* Numero Amortissement : 10

.ponderation : 0.10000E-01

.fraction d amortissement (calcul energie) : 5.0000 %

Nombre de modes amortis directement : 0

\* Numero Amortissement : 11

.ponderation : 0.10000E-01

.fraction d amortissement (calcul energie) : 2.0000 %

Nombre de modes amortis directement : 0

\* Amortissement modal moyen calculé a partir de l energie de deformation des structures amorties

.numero	du mode :	1	
.periode	du mode :	1.0003	sec
.fraction d amortissement	du mode :	3.9883	%
.numero	du mode :	2	
.periode	du mode :	0.75391	sec
.fraction d amortissement	du mode :	3.2128	%
.numero	du mode :	3	
.periode	du mode :	0.45755	sec
.fraction d amortissement	du mode :	4.1589	%
.numero	du mode :	4	
.periode	du mode :	0.31395	sec
.fraction d amortissement	du mode :	4.5430	%
.numero	du mode :	5	
.periode	du mode :	0.16318	sec
.fraction d amortissement	du mode :	5.9638	%
.numero	du mode :	6	
.periode	du mode :	0.63057E-01	sec
.fraction d amortissement	du mode :	5.3821	%

```

--- RESULTATS DU MODE PROPRE :          1 ---

Periode                1.0003      sec      Frequence   :    0.99972      Hz
Facteur Participation Mod 76.758      Masse Modale :    5891.7
Masse Modale Generalisee 1.0000
Taux Participation Modale 84.167      %      Cumul       :    84.167      %

    ---> Direction                1
    Taux Participation Modale      42.084      %      Cumul       :    42.084      %
    ---> Direction                2
    Taux Participation Modale      42.084      %      Cumul       :    42.084      %

--- RESULTATS DU MODE PROPRE :          2 ---

Periode                0.75391     sec      Frequence   :    1.3264      Hz
Facteur Participation Mod -0.21120E-04  Masse Modale :    0.44606E-09
Masse Modale Generalisee 1.0000
Taux Participation Modale 0.63723E-11 %      Cumul       :    84.167      %

    ---> Direction                1
    Taux Participation Modale      33.718      %      Cumul       :    75.801      %
    ---> Direction                2
    Taux Participation Modale      33.718      %      Cumul       :    75.801      %

--- RESULTATS DU MODE PROPRE :          3 ---

Periode                0.45755     sec      Frequence   :    2.1855      Hz
Facteur Participation Mod 26.458      Masse Modale :    700.00
Masse Modale Generalisee 1.0000
Taux Participation Modale 10.000      %      Cumul       :    94.167      %

    ---> Direction                1
    Taux Participation Modale      5.0000      %      Cumul       :    80.801      %
    ---> Direction                2
    Taux Participation Modale      5.0000      %      Cumul       :    80.801      %

--- RESULTATS DU MODE PROPRE :          4 ---

Periode                0.31395     sec      Frequence   :    3.1853      Hz
Facteur Participation Mod 20.206      Masse Modale :    408.28
Masse Modale Generalisee 1.0000
Taux Participation Modale 5.8325      %      Cumul       :    100.00      %

    ---> Direction                1
    Taux Participation Modale      2.9163      %      Cumul       :    83.718      %
    ---> Direction                2
    Taux Participation Modale      2.9163      %      Cumul       :    83.718      %

--- RESULTATS DU MODE PROPRE :          5 ---

Periode                0.16318     sec      Frequence   :    6.1280      Hz
Facteur Participation Mod 0.0000      Masse Modale :    0.0000
Masse Modale Generalisee 1.0000
Taux Participation Modale 0.0000      %      Cumul       :    100.00      %

    ---> Direction                1
    Taux Participation Modale      11.144      %      Cumul       :    94.861      %
    ---> Direction                2
    Taux Participation Modale      11.144      %      Cumul       :    94.861      %

--- RESULTATS DU MODE PROPRE :          6 ---

Periode                0.63057E-01 sec      Frequence   :    15.859      Hz
Facteur Participation Mod -0.62172E-14  Masse Modale :    0.38654E-28
Masse Modale Generalisee 1.0000
Taux Participation Modale 0.55220E-30 %      Cumul       :    100.00      %

    ---> Direction                1
    Taux Participation Modale      5.1385      %      Cumul       :    100.00      %

```

---> Direction 2  
 Taux Participation Modale 5.1385 % Cumul : 100.00 %

--- RESULTATS REPONSE SPECTRALE : 10 ---

Barre	Abscisse	N	Ty	Mz
20	0.000	1371.	1371.	2747.
20	1.000	1371.	1371.	1505.
21	0.000	1068.	1068.	1505.
21	1.000	1068.	1068.	547.3
22	0.000	547.3	547.3	547.3
22	1.000	547.3	547.3	0.5546E-03

--- RESULTATS REPONSE SPECTRALE : 20 ---

Barre	Abscisse	N	Ty	Mz
20	0.000	1357.	1357.	2720.
20	1.000	1357.	1357.	1490.
21	0.000	1057.	1057.	1490.
21	1.000	1057.	1057.	541.8
22	0.000	541.8	541.8	541.8
22	1.000	541.8	541.8	0.5490E-03

--- RESULTATS DE L'ENVELOPPE : 10 ---

Barre	Abscisse	N	Ty	Mz
20	0.000	Min -2727.7	-2727.7	-5466.6
		Max 2727.7	2727.7	5466.6
20	1.000	Min -2727.7	-2727.7	-2995.8
		Max 2727.7	2727.7	2995.8
21	0.000	Min -2124.4	-2124.4	-2995.8
		Max 2124.4	2124.4	2995.8
21	1.000	Min -2124.4	-2124.4	-1089.2
		Max 2124.4	2124.4	1089.2
22	0.000	Min -1089.2	-1089.2	-1089.2
		Max 1089.2	1089.2	1089.2
22	1.000	Min -1089.2	-1089.2	-.11036E-02
		Max 1089.2	1089.2	0.11036E-02

--- RESULTATS DE L'ENVELOPPE : 1000 ---

Barre	Abscisse	N	Ty	Mz
20	0.000	Min -2727.7	-2727.7	-5466.6
		Max 2727.7	2727.7	5466.6
20	1.000	Min -2727.7	-2727.7	-2995.8
		Max 2727.7	2727.7	2995.8
21	0.000	Min -2124.4	-2124.4	-2995.8
		Max 2124.4	2124.4	2995.8
21	1.000	Min -2124.4	-2124.4	-1089.2
		Max 2124.4	2124.4	1089.2
22	0.000	Min -1089.2	-1089.2	-1089.2
		Max 1089.2	1089.2	1089.2
22	1.000	Min -1089.2	-1089.2	-.11036E-02
		Max 1089.2	1089.2	0.11036E-02



```
fin
```

```
etude effort depla  
tout se 0 a 1 pas 1 rel
```

```
exec historique 100  
#  
env 10 comb  
  contrg 10  
  historique 100  
fin
```

```
#####  
sortie 'exemple8.txt' non pagine
```

```
RESU  
  env 10 barre effort contrg  
fin  
resu  
  HISTORIQUE BARRE  contrg effort  
FIN
```

## 19.7.2 - FICHER RESULTAT

Le fichier résultat correspondant à cet exemple se trouve dans le répertoire exemples de ST1 (exemple8.txt).

--- RESULTATS DE L'ENVELOPPE : 10 ---

```

=> Resultats concomitants des extrema de la contrainte generalisee : 10
Barre Abscisse N Ty Tz Mx My Mz
20 0.000 Min 36788. -61748. 57264. 0.0000 -62588. 30874.
Max -27876. 13088. -37630. 0.0000 45696. -6544.2
20 1.000 Min -29246. -49847. -30133. 0.0000 7466.6 -24923.
Max 36788. -61748. 57264. 0.0000 -5323.9 -30874.

21 0.000 Min 12000. -20153. 32747. 0.0000 -33098. 10076.
Max 20705. -19434. 5409.9 0.0000 -5276.7 9717.0
21 1.000 Min -12074. 8735.1 -8110.1 0.0000 -51.451 4367.5
Max 20705. -19434. 5409.9 0.0000 133.28 -9717.0

```

Contrainte 10

```

=> Resultats concomitants des extrema de la contrainte generalisee : 10
Barre Abscisse N Ty Tz Mx My Mz
20 0.000 Min -25799.
Max 17821.
20 1.000 Min -21779.
Max 31465.

21 0.000 Min -21098.
Max 15429.
21 1.000 Min -12125.
Max 20839.

```

--- RESULTATS DE L HISTORIQUE : 100 --- test titre histo

Sollicitation : K\*DU+C\*VU+M\*AU

```

Barre : 20
Temps Abscisse N Ty Tz Mx My Mz
0.10000E-01 0.0000 7655.9 64278. 32185. 0.0000 -22386. -32139.
0.20000E-01 0.0000 21564. 0.12101E+06 48743. 0.0000 -42167. -60503.
0.30000E-01 0.0000 31910. 58971. 11491. 0.0000 -31908. -29485.
0.40000E-01 0.0000 37743. -43584. -2432.3 0.0000 -30793. 21792.
0.50000E-01 0.0000 39127. -97746. 32946. 0.0000 -51422. 48873.
0.60000E-01 0.0000 36788. -61748. 57264. 0.0000 -62588. 30874.
0.70000E-01 0.0000 31624. 30679. 32029. 0.0000 -44794. -15339.
0.80000E-01 0.0000 24318. 87330. -1883.7 0.0000 -19527. -43665.
0.90000E-01 0.0000 15259. 54929. -1494.2 0.0000 -9986.5 -27464.
0.10000 0.0000 4743.4 -23626. 14387. 0.0000 -7394.8 11813.
0.11000 0.0000 -6688.8 -70303. 3696.8 0.0000 8528.7 35151.
0.12000 0.0000 -18036. -49922. -25914. 0.0000 32907. 24961.
0.13000 0.0000 -27876. 13088. -37630. 0.0000 45696. -6544.2
0.14000 0.0000 -34688. 59668. -24439. 0.0000 42746. -29834.
0.15000 0.0000 -37315. 46799. -15879. 0.0000 38806. -23399.
0.16000 0.0000 -35345. -8769.1 -24483. 0.0000 40437. 4384.6
0.17000 0.0000 -29246. -49847. -30133. 0.0000 37600. 24923.

```

```

Temps Abscisse N Ty Tz Mx My Mz
0.10000E-01 1.0000 7655.9 64278. 32185. 0.0000 9798.1 32139.
0.20000E-01 1.0000 21564. 0.12101E+06 48743. 0.0000 6575.6 60503.
0.30000E-01 1.0000 31910. 58971. 11491. 0.0000 -20417. 29485.
0.40000E-01 1.0000 37743. -43584. -2432.3 0.0000 -33225. -21792.
0.50000E-01 1.0000 39127. -97746. 32946. 0.0000 -18475. -48873.
0.60000E-01 1.0000 36788. -61748. 57264. 0.0000 -5323.9 -30874.
0.70000E-01 1.0000 31624. 30679. 32029. 0.0000 -12765. 15339.
0.80000E-01 1.0000 24318. 87330. -1883.7 0.0000 -21411. 43665.
0.90000E-01 1.0000 15259. 54929. -1494.2 0.0000 -11481. 27464.
0.10000 1.0000 4743.4 -23626. 14387. 0.0000 6992.3 -11813.
0.11000 1.0000 -6688.8 -70303. 3696.8 0.0000 12225. -35151.
0.12000 1.0000 -18036. -49922. -25914. 0.0000 6993.2 -24961.
0.13000 1.0000 -27876. 13088. -37630. 0.0000 8066.1 6544.2
0.14000 1.0000 -34688. 59668. -24439. 0.0000 18307. 29834.
0.15000 1.0000 -37315. 46799. -15879. 0.0000 22927. 23399.
0.16000 1.0000 -35345. -8769.1 -24483. 0.0000 15954. -4384.6
0.17000 1.0000 -29246. -49847. -30133. 0.0000 7466.6 -24923.

```

```

Temps Abscisse contrainte gen 10
0.10000E-01 0.0000 -14731.
0.20000E-01 0.0000 -20603.
0.30000E-01 0.0000 2.1353
0.40000E-01 0.0000 6950.9
0.50000E-01 0.0000 -12295.
0.60000E-01 0.0000 -25799.
0.70000E-01 0.0000 -13170.
0.80000E-01 0.0000 4791.1
0.90000E-01 0.0000 5272.1
0.10000 0.0000 -2651.4
0.11000 0.0000 1839.8
0.12000 0.0000 14871.
0.13000 0.0000 17821.
0.14000 0.0000 8057.8
0.15000 0.0000 1491.5
0.16000 0.0000 5091.7
0.17000 0.0000 8353.9

```

Temps	Abscisse	contrainte	gen	10
0.10000E-01	1.0000			17454.
0.20000E-01	1.0000			28140.
0.30000E-01	1.0000			11493.
0.40000E-01	1.0000			4518.6
0.50000E-01	1.0000			20651.
0.60000E-01	1.0000			31465.
0.70000E-01	1.0000			18859.
0.80000E-01	1.0000			2907.5
0.90000E-01	1.0000			3777.9
0.10000	1.0000			11736.
0.11000	1.0000			5536.6
0.12000	1.0000			-11043.
0.13000	1.0000			-19810.
0.14000	1.0000			-16381.
0.15000	1.0000			-14387.
0.16000	1.0000			-19391.
0.17000	1.0000			-21779.

Barre : 21

Temps	Abscisse	N	Ty	Tz	Mx	My	Mz
0.10000E-01	0.0000	353.80	14117.	-9166.8	0.0000	9239.5	-7058.4
0.20000E-01	0.0000	2110.0	44171.	-6677.4	0.0000	7037.4	-22086.
0.30000E-01	0.0000	6161.9	37138.	20351.	0.0000	-20549.	-18569.
0.40000E-01	0.0000	12000.	-20153.	32747.	0.0000	-33098.	10076.
0.50000E-01	0.0000	17656.	-49135.	18326.	0.0000	-18347.	24567.
0.60000E-01	0.0000	20705.	-19434.	5409.9	0.0000	-5276.7	9717.0
0.70000E-01	0.0000	19511.	16119.	12616.	0.0000	-12557.	-8059.3
0.80000E-01	0.0000	14062.	29675.	21222.	0.0000	-21505.	-14837.
0.90000E-01	0.0000	5979.0	23543.	11258.	0.0000	-11326.	-11772.
0.10000	0.0000	-2259.7	-5217.3	-6797.2	0.0000	6880.0	2608.6
0.11000	0.0000	-8455.5	-32122.	-12147.	0.0000	12326.	16061.
0.12000	0.0000	-11591.	-22609.	-6889.1	0.0000	6823.3	11304.
0.13000	0.0000	-12074.	8735.1	-8110.1	0.0000	8058.6	-4367.5
0.14000	0.0000	-11255.	24459.	-18077.	0.0000	18149.	-12229.
0.15000	0.0000	-10537.	16978.	-22732.	0.0000	22907.	-8489.0
0.16000	0.0000	-10566.	-2173.9	-15766.	0.0000	15827.	1087.0
0.17000	0.0000	-10935.	-19566.	-7475.1	0.0000	7423.4	9783.1
Temps	Abscisse	N	Ty	Tz	Mx	My	Mz
0.10000E-01	1.0000	353.80	14117.	-9166.8	0.0000	72.702	7058.4
0.20000E-01	1.0000	2110.0	44171.	-6677.4	0.0000	360.00	22086.
0.30000E-01	1.0000	6161.9	37138.	20351.	0.0000	-198.41	18569.
0.40000E-01	1.0000	12000.	-20153.	32747.	0.0000	-351.08	-10076.
0.50000E-01	1.0000	17656.	-49135.	18326.	0.0000	-21.148	-24567.
0.60000E-01	1.0000	20705.	-19434.	5409.9	0.0000	133.28	-9717.0
0.70000E-01	1.0000	19511.	16119.	12616.	0.0000	58.581	8059.3
0.80000E-01	1.0000	14062.	29675.	21222.	0.0000	-283.55	14837.
0.90000E-01	1.0000	5979.0	23543.	11258.	0.0000	-68.630	11772.
0.10000	1.0000	-2259.7	-5217.3	-6797.2	0.0000	82.752	-2608.6
0.11000	1.0000	-8455.5	-32122.	-12147.	0.0000	178.88	-16061.
0.12000	1.0000	-11591.	-22609.	-6889.1	0.0000	-65.786	-11304.
0.13000	1.0000	-12074.	8735.1	-8110.1	0.0000	-51.451	4367.5
0.14000	1.0000	-11255.	24459.	-18077.	0.0000	72.239	12229.
0.15000	1.0000	-10537.	16978.	-22732.	0.0000	174.41	8489.0
0.16000	1.0000	-10566.	-2173.9	-15766.	0.0000	60.718	-1087.0
0.17000	1.0000	-10935.	-19566.	-7475.1	0.0000	-51.711	-9783.0

Temps	Abscisse	contrainte	gen	10
0.10000E-01	0.0000			9593.3
0.20000E-01	0.0000			9147.4
0.30000E-01	0.0000			-14387.
0.40000E-01	0.0000			-21098.
0.50000E-01	0.0000			-690.42
0.60000E-01	0.0000			15429.
0.70000E-01	0.0000			6954.2
0.80000E-01	0.0000			-7443.3
0.90000E-01	0.0000			-5347.4
0.10000	0.0000			4620.2
0.11000	0.0000			3870.6
0.12000	0.0000			-4767.7
0.13000	0.0000			-4015.0
0.14000	0.0000			6894.2
0.15000	0.0000			12370.
0.16000	0.0000			5260.7
0.17000	0.0000			-3511.6

Temps	Abscisse	contrainte	gen	10
0.10000E-01	1.0000			426.51
0.20000E-01	1.0000			2470.0
0.30000E-01	1.0000			5963.5
0.40000E-01	1.0000			11649.
0.50000E-01	1.0000			17635.
0.60000E-01	1.0000			20839.
0.70000E-01	1.0000			19570.
0.80000E-01	1.0000			13778.
0.90000E-01	1.0000			5910.4
0.10000	1.0000			-2177.0
0.11000	1.0000			-8276.6
0.12000	1.0000			-11657.
0.13000	1.0000			-12125.
0.14000	1.0000			-11183.
0.15000	1.0000			-10362.
0.16000	1.0000			-10506.
0.17000	1.0000			-10987.

## 19.8- STRUCTURE PLANE - MODE DE FLAMBEMENT LINEAIRE ELASTIQUE

On présente ici un exemple de calcul de mode critique de flambement linéaire élastique.

### 19.8.1 - FICHER DE DONNEES

```
#-----
OPTION PLANE
TITRE 'CHARGE CRITIQUE'

lg=10
kl=2
ndiv=10

NOEUD
  POUR i=1 A ndiv+1
    <<
      i X 0 Y lg*(i-1)/ndiv
    >>
FIN

APPUI
  1 DX DY RZ
FIN

BARRE
  POUR i=1 A ndiv << i DE i A i+1 >>
FIN

CONS TOUT E 1

CARA TOUT SX 1 IZ 1

ETUDE EFFORT DEPLA TOUT SE 0 A 1 PAS 0.1

CHARG 1
  NOEUD ndiv+1 FY -(pi**2)/((kl*lg)**2)
FIN

EXEC CHARG 1

EXEC FLAMBEMENT 2 VAR CHARG 1 #CTE CHARG 0

SORTIE 'exemple9.txt' non pagine
RESU
  flambement mode depla
fin
```

## 19.8.2 - FICHER RESULTAT

Le fichier résultat correspondant à cet exemple se trouve dans le répertoire `exemples` de **ST1** (`exemple9.txt`).

--- RESULTATS DU MODE CRITIQUE : 1 ---

Effort critique : 1.0000  
 Facteur Participation Modale : -0.47753E-02 Rigidite Modale : 0.22803E-04  
 Rigidite Modale Generalisee 1.0000  
 Taux Participation Modale : 0.27726E-01 % Cumul : 0.27726E-01 %

Noeud	DX	DY	RZ
1	0.0000	0.0000	0.0000
2	-0.22315	0.0000	0.44538
3	-0.88710	0.0000	0.87979
4	-1.9755	0.0000	1.2925
5	-3.4615	0.0000	1.6735
6	-5.3087	0.0000	2.0132
7	-7.4714	0.0000	2.3033
8	-9.8964	0.0000	2.5367
9	-12.524	0.0000	2.7077
10	-15.290	0.0000	2.8120
11	-18.125	0.0000	2.8471

--- RESULTATS DU MODE CRITIQUE : 2 ---

Effort critique : 9.0006  
 Facteur Participation Modale : 0.14177E-01 Rigidite Modale : 0.20099E-03  
 Rigidite Modale Generalisee 1.0000  
 Taux Participation Modale : 0.24437 % Cumul : 0.27210 %

Noeud	DX	DY	RZ
1	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.65863	0.0000	-1.2928
3	2.4908	0.0000	-2.3035
4	5.0970	0.0000	-2.8121
5	7.9092	0.0000	-2.7078
6	10.314	0.0000	-2.0134
7	11.788	0.0000	-0.87992
8	12.010	0.0000	0.44545
9	10.930	0.0000	1.6736
10	8.7851	0.0000	2.5369
11	6.0421	0.0000	2.8472

## 19.9- STRUCTURE PLANE – CALCUL AU FEU 2D

On présente ici un exemple de calcul au feu en 2D.

### 19.9.1 - FICHER DE DONNEES

```
#-----
#-----
#- Exemple 10 : Calcul au Feu
#-----
# unite de l exemple MN et m
#-----

OPTION PLANE

TITRE 'Calcul au feu'

SORTIE 'exemple10.txt'  NON PAGING

# Géométrie -----
nb =9
LstN=1,2,3,7,8,9
LstFeu=4,5,6
numbarf = 5

lst_tot = LstN, LstFeu

pour i = 1 a nb+1 pas 1
<<
noeud i 0+(i-1)*3.6/nb      0
>>

pour i = 1 a nb pas 1
<<
barre i i i+1
>>

appui 1      dx dy rz
appui nb+1   dy rz

# Definition des expositions au feu des parois -----

EXPOSITION FEU 1 temp 20
EXPOSITION FEU 2 cn
EXPOSITION FEU 3 hcm protection 0.03/0.19  #-Epaisseur/Conductivité
EXPOSITION FEU 4 hc

EXPOSITION 5      # equivalent cn en 1991-1-2 §3.2.1 eq 3.4
LOI_GAZ
0      20
0.05   70.4141723089921
0.1    108.069014260641
0.15   138.135824883661
0.2    163.165805049932
0.25   184.606832878284
0.3    203.360226379578
0.35   220.025340832799
0.4    235.021005187276
0.45   248.651451930143
0.5    261.144651495926
0.55   272.675847138924
0.6    283.382657779213
0.65   293.375132876898
0.7    302.742657761945
0.75   311.558823804919
0.8    319.884943307187
0.85   327.772637928216
0.9    335.265779072382
0.95   342.401965679031
1      349.213665756567
```

```

2 444.504877875504
3 502.289302991853
4 543.887309257871
5 576.410430568309
6 603.117647609837
7 625.77682520701
8 645.455108041785
9 662.846386741557
10 678.427331513134
20 781.354927230988
30 841.79587968833
50 918.084808553963
100 1021.75321804906
FIN
#-----

LISTER EXPOSITION

#----- MATERIAUX -----

Fcck=30

modul = 3/2*Fcck/0.0025

MATERIAU 1 ' beton traverse'
E FEU EC2 MPA FCK Fcck # TRACTION OUI
# E modul fck Fcck
RO 0.025
UU 0.015
CONDUCTIVITE EC2 AN
GRANULAT SILICE
RHO FEU 2500. # CTE # Kg/m3 => chaleur massique
EMISSIVITE 0.7
# CHALEUR_SPECIFIQUE_MASSIQUE 900
TEMP 1e-5
FIN

#----- SECTION de CALCUL FEU -----
Expo=3
ep = 1
inert = (ep**3)/12

SECTION 1 ' Dalle de 1m '
DALLE EPAISSEUR ep
LARGEUR 1
EXPOSITION SUP 1 INF Expo
MATERIAU 1
MAILLE 0.01
FIN

LISTER SECTION

#----- ACIERS -----

ACIER 20 'aciers1 : HA20'
DIAMETRE 0.020
SECTION 3.142e-4
LAMINE CHAUD
FYK 500
E 200000
FIN

ACIER 25 'aciers1 : HA25'
DIAMETRE 0.025
SECTION 4.409e-4
LAMINE CHAUD
FYK 500
E 200000
FIN

#----- ARMATURES -----

ARMATURE 1 'ARMATURE DALLE'
ACIER 25 NOMBRE 6 ENROBAGE SUP 0.05 #-6HA25 SUR 1.0M
ACIER 20 NOMBRE 6 ENROBAGE INF 0.10 #-6HA20 SUR 1.0M

```

```

FIN

#- Proprietes mecaniques des BARRES -----
pour i=LstN
<<
  CARA i sx ep*1.0 iz 1.0*inert vy ep/2 wy ep/2
  CONS i mat 1
>>
pour i=LstFeu
<<
  CARA i SECTION 1 ARMA 1
>>

  LISTER CARA LstFeu

#- Etudes des setions d etudes -----
ETUDE SEUL EFFORT DEPLA
TOUT SE 0 A 1 PAS 1
FIN

#----- CHARGEMENT -----
CHARG 1 'pp'
  #-poids propre
  pour i=lst_tot << POIDS PROPRE i>>
FIN

CHARG 2 'fy -1'
  pour i=lst_tot << BARRE i UNI FY -1 >>
FIN

CHARG 100 COMB 'charge statique combinee'
  CHARG 1 0.5
  CHARG 2 1.
FIN

EXEC CHARG 100

# feu -----
FEU 20 'FEU'
  DUREE 60 # MINUTES
FIN

RESU
  FEU SECTION
FIN

#--Incendie assoicié à 1 feu et 1 charge -----
INCENDIE 10
  FEU 20 CHARG 100
FIN

EXEC INCENDIE 10

#-----
RESU
  INCENDIE 10 BARRE numbarf CARA CHAUD TEMP
FIN

RESU
  INCENDIE 10 BARRE numbarf EFFORT DEPLA
FIN

RESU
  INCENDIE 10 APPUI
FIN

```

## 19.9.2 - FICHER RESULTAT

Le fichier résultat correspondant à cet exemple se trouve dans le répertoire `exemples` de **ST1** (`exemple9.txt`).

```

--- EXPOSITION :      1 ---

. Type d'exposition : Temperature constante
. Valeur temperature : 20.000
. Protection : Non
. Coefficient thermique de convection EC1 (voir documentation)

--- EXPOSITION :      2 ---

. Type d'exposition : CN
. Protection : Non
. Coefficient thermique de convection EC1 (voir documentation)

--- EXPOSITION :      3 ---

. Type d'exposition : HCM
. Protection : Oui
. Resistance thermique equivalente de la protection : 0.15789
. Coefficient thermique de convection EC1 (voir documentation)

--- EXPOSITION :      4 ---

. Type d'exposition : HC
. Protection : Non
. Coefficient thermique de convection EC1 (voir documentation)

--- EXPOSITION :      5 ---

. Type d'exposition : LOI (temps,temperature) des gaz
  0.0000      20.000
  0.50000E-01  70.414
  0.10000      108.07
  0.15000      138.14
  0.20000      163.17
  0.25000      184.61
  0.30000      203.36
  0.35000      220.03
  0.40000      235.02
  0.45000      248.65
  0.50000      261.14
  0.55000      272.68
  0.60000      283.38
  0.65000      293.38
  0.70000      302.74
  0.75000      311.56
  0.80000      319.88
  0.85000      327.77
  0.90000      335.27
  0.95000      342.40
  1.0000      349.21
  2.0000      444.50
  3.0000      502.29
  4.0000      543.89
  5.0000      576.41
  6.0000      603.12
  7.0000      625.78
  8.0000      645.46
  9.0000      662.85
  10.000      678.43
  20.000      781.35
  30.000      841.80
  50.000      918.08
  100.00     1021.8
. Protection : Non
. Coefficient thermique de convection EC1 (voir documentation)

```

```

--- SECTION :      1 -- Dalle de 1m  ---

. Dalle
. Epaisseur          :  1.0000
. Largeur            :  1.0000
. Matériau           :      1
. Numero d'exposition inf :    3
. Numero d'exposition sup :    1

      --- CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES BARRES ---

- Caracteristiques constantes -
Barre      Sx      Sy      Iz
   4      0.0000   0.0000   0.0000
   5      0.0000   0.0000   0.0000
   6      0.0000   0.0000   0.0000

      --- CARACTERISTIQUES DES BARRES ( FIBRES ) ---

- Caracteristiques constantes -
Barre      Vy      Wy
   4      0.50000   0.50000
   5      0.50000   0.50000
   6      0.50000   0.50000

--- FEU :          20      FEU ---
--- SECTION :      1 --- Dalle de 1m  ---
--- DUREE :        60.00000 ---
      z      Temperature
0.00000      260.38190
0.00500      234.75178
0.01500      183.49155
0.02500      142.73164
0.03500      119.56894
0.04500      100.91789
0.05500       85.80542
0.06500       72.89035
0.07500       62.05222
0.08500       53.08407
0.09500       45.75009
0.10500       39.82016
0.11500       35.08113
0.12500       31.33973
0.13500       28.42318
0.14500       26.17926
0.15500       24.47595
0.16500       23.20066
0.17500       22.25908
0.18500       21.57366
0.19500       21.08177
0.20500       20.73378
0.21500       20.49113
0.22500       20.32433
0.23500       20.21133
0.24500       20.13586
0.25500       20.08618
0.26500       20.05393
0.27500       20.03330
0.28500       20.02029
0.29500       20.01220
0.30500       20.00724
0.31500       20.00424
0.32500       20.00245
0.33500       20.00140
0.34500       20.00079
0.35500       20.00044
0.36500       20.00024
0.37500       20.00013
0.38500       20.00007
0.39500       20.00004
0.40500       20.00002
0.41500       20.00001
...
1.00000       20.00000

```

--- RESULTATS CHARGE INCENDIE : 10 ---

--- BARRE : 5 ---

Effort : N = -0.91038E-14 M = -0.39927E-01

Rigidite secante : E1.S = 2591.1 - E2.I = 530.33  
 Ratio Module Secant/ Module initial : E1/E0 = 14.395 % - E2/E0 35.355 % - Module à fro  
 18000.

Distance CDG/ fibre : SUP = 0.50000 - INF = 0.50000  
 Geometrie equivalente : Aire eq = 0.14395 Inertie eq = 0.29463E-01

Deformation Thermique : axial Epst = 0.46053E-03 Gmt = 0.99878E-03 Rotation=Gmt\*x1 0.39951 mrd  
 Deformation Totale : axial Eps = 0.45986E-03 Gm = 0.10743E-02 Rotation=Gm \*x1 0.42974 mrd

Force Thermique : Axial Nt = Epst/alpha 46.053 Gradient NGt = Gmt.H/alpha 99.878  
 Force Totale : Axial Nt = Eps /alpha 45.986 Gradient NGt = Gm .H/alpha 107.43

--- BARRE : 5 --- Cote z=0.0 (INF-WY(2D)) et z= 1.0000000 (SUP-VY(2D))

Acier :	z (m)	Contrainte (MPa)	Température (°C)	
	0.100	-114.765	45.750	
	0.950	4.718	20.000	
Beton :	z (m)	Contrainte (MPa)	Temperature (°C)	Temperature Maxi (°C)
	0.000	10.059	260.382	260.382
	0.005	8.436	234.752	234.752
	0.015	5.189	183.492	183.492
	0.025	1.910	142.732	142.732
	0.035	0.000	119.569	119.569
	0.045	0.000	100.918	100.918
	0.055	0.000	85.805	85.805
	0.065	0.000	72.890	72.890
	0.075	0.000	62.052	62.052
	0.085	0.000	53.084	53.084
	0.095	0.000	45.750	45.750
	0.105	0.000	39.820	39.820
	0.115	0.000	35.081	35.081
	0.125	0.000	31.340	31.340
	0.135	0.000	28.423	28.423
	0.145	0.000	26.179	26.179
	0.155	0.000	24.476	24.476
	0.165	0.000	23.201	23.201
	0.175	0.000	22.259	22.259
	0.185	0.000	21.574	21.574
	0.195	0.000	21.082	21.082
	0.205	0.000	20.734	20.734
	0.215	0.000	20.491	20.491
	0.225	0.000	20.324	20.324
	0.235	0.000	20.211	20.211
	0.245	0.000	20.136	20.136
	0.255	0.000	20.086	20.086
	0.265	0.000	20.054	20.054
	0.275	0.000	20.033	20.033
	0.285	0.000	20.020	20.020
	0.295	0.000	20.012	20.012
	0.305	0.000	20.007	20.007
	0.315	0.000	20.004	20.004
	0.325	0.000	20.002	20.002
	0.335	0.000	20.001	20.001
	0.345	0.000	20.001	20.001
	0.925	0.000	20.000	20.000
	0.935	0.138	20.000	20.000
	0.945	0.331	20.000	20.000
	0.955	0.525	20.000	20.000
	0.965	0.718	20.000	20.000
	0.975	0.911	20.000	20.000
	0.985	1.105	20.000	20.000
	0.995	1.298	20.000	20.000
	1.000	1.395	20.000	20.000

--- RESULTATS CHARGE INCENDIE : 10 ---

Barre	Abscisse	N	Ty	Mz
5	0.000	-0.88818E-14	0.20036	-0.40220E-01
5	0.400	-0.88818E-14	-0.20036	-0.40220E-01

Barre	Abscisse	Dx	Dy	Rz
5	0.000	0.17327E-03	-0.63033E-03	-0.21996E-03
5	0.400	0.35748E-03	-0.63033E-03	0.21996E-03

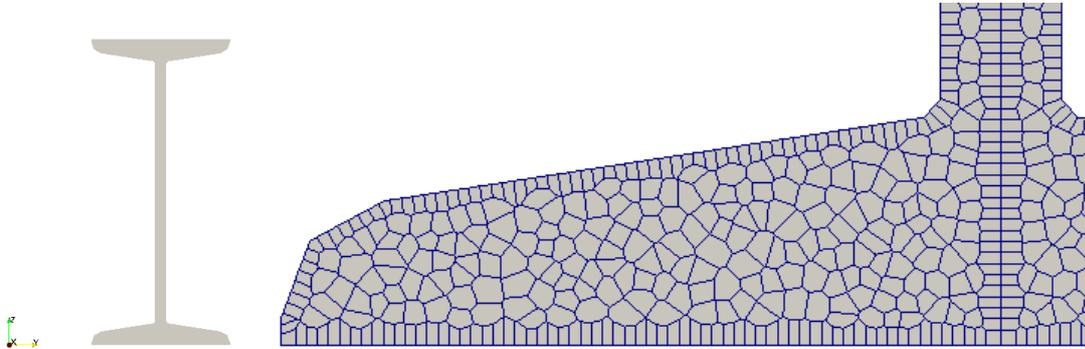
--- RESULTATS CHARGE INCENDIE : 10 ---

Appui	Noeud	Fx	Fy	Mz
1	1	-.91480E-14	1.8158	1.5699
10	10	0.0000	1.8158	-1.5699

## 19.10- STRUCTURE PLANE – CALCUL DE RAIDEUR AU FEU

On présente ici un exemple de calcul au feu en 2D : **Calcul de raideur brute d'une poutre IPN200**

On s'intéresse à une poutre IPN200. Cette poutre fait une hauteur de  $h=200\text{mm}$ , les talons étant de largeur  $90\text{mm}$ , pour une épaisseur moyenne de  $11.3\text{mm}$ , tandis que l'âme fait  $7.5\text{mm}$  de large. Pour calculer les inerties de cette poutre, on se place dans une situation telle que la température sur la poutre reste uniforme, et telle que toutes les fibres de la poutre restent comprimées du fait d'un effort normal faible. Ainsi, les inerties rapportées seront celles d'une section constituée d'un unique matériau.



### 19.10.1 - FICHIER DE DONNEES

```
#-----
#Calcul des inerties d'une poutre IPN avec ST1 Feu
#-----
option spatiale
titre 'INERTIES'
sortie 'feutest9_IPN200.txt' non pagine

#--- DEFINITION DES NOEUDS ---
noeud
1      0      0      0
2      1      0      0
12     2      0      0

#--- DEFINITION DES APPUIS POUR UNE POUTRE ISO ---
appui 1 dx dy dz rx
appui 12 dy dz

#----- DEFINITION DES SECTIONS BETON -----
#--- condition d'exposition au feu comme une temperature constante de 20°C
# la temperature restera de 20°C sur la section.
exposition feu 1 temp 20

Fck=30
matériau 1 ' beton traverse'
e FEU EC2 fck Fck TRACTION OUI
fin

#les paramètres d'une poutre IPN200
hh=0.2 #hauteur
bb=0.09 #largeur
ee=0.0113 #epaisseur talon
aa=0.0075 #epaisseur ame

r1=0.0075
r2=0.0045
angl=atan(0.14)
pii=3.141592653

zA=tan(0.5*(0.5*pii-angl)) #coordonnées de points sur les arrondis
yC=1-sin(angl)
zC=zA-cos(angl)
```

```

zE=zA-sin(0.5*(0.5*pii-angl))
yE=1-cos(0.5*(0.5*pii-angl))

L=r2*(sqrt(1-pii*0.25))*0.5
#dessin de l'IPN point par point
#la taille de maille est réduite à 1mm
section 1 'IPN'
  perimetre
  materiau 1
  maille 0.001
  y -0.5*bb          z -0.5*hh          exposition 1
  y 0.5*bb           z -0.5*hh          exposition 1
  y 0.5*bb           z -0.5*hh+ee-0.14*bb*0.25-r1*zA exposition 1
  y 0.5*bb-r1*yE    z -0.5*hh+ee-0.14*bb*0.25-r1*zE exposition 1
  y 0.5*bb-r1*yC    z -0.5*hh+ee-0.14*bb*0.25-r1*zC exposition 1
  y 0.5*aa+L        z -0.5*hh+ee+0.14*(bb*0.25-L) exposition 1
  y 0.5*aa           z -0.5*hh+ee+0.14*bb*0.25+L    exposition 1
  y 0.5*aa           z -(0.5*hh+ee+0.14*bb*0.25+L)  exposition 1
  y 0.5*aa+L        z -(0.5*hh+ee+0.14*(bb*0.25-L)) exposition 1
  y 0.5*bb-r1*yC    z -(0.5*hh+ee-0.14*bb*0.25-r1*zC) exposition 1
  y 0.5*bb-r1*yE    z -(0.5*hh+ee-0.14*bb*0.25-r1*zE) exposition 1
  y 0.5*bb           z -(0.5*hh+ee-0.14*bb*0.25-r1*zA) exposition 1
  y 0.5*bb           z 0.5*hh            exposition 1
  y -0.5*bb          z 0.5*hh            exposition 1
  y -(0.5*bb)        z -(-0.5*hh+ee-0.14*bb*0.25-r1*zA) exposition 1
  y -(0.5*bb-r1*yE) z -(-0.5*hh+ee-0.14*bb*0.25-r1*zE) exposition 1
  y -(0.5*bb-r1*yC) z -(-0.5*hh+ee-0.14*bb*0.25-r1*zC) exposition 1
  y -(0.5*aa+L)     z -(-0.5*hh+ee+0.14*(bb*0.25-L)) exposition 1
  y -(0.5*aa)       z -(-0.5*hh+ee+0.14*bb*0.25+L)  exposition 1
  y -(0.5*aa)       z -0.5*hh+ee+0.14*bb*0.25+L    exposition 1
  y -(0.5*aa+L)     z -0.5*hh+ee+0.14*(bb*0.25-L)  exposition 1
  y -(0.5*bb-r1*yC) z -0.5*hh+ee-0.14*bb*0.25-r1*zC exposition 1
  y -(0.5*bb-r1*yE) z -0.5*hh+ee-0.14*bb*0.25-r1*zE exposition 1
  y -(0.5*bb)       z -0.5*hh+ee-0.14*bb*0.25-r1*zA exposition 1
fin

#lister SECTION

#---DEFINITION DES BARRES ---
barre 1 1 2
barre 2 2 12

# les caracteristiques mécanique des barres sont tirées de leur section
cara 1 a 2 section 1

etude effort depla
  1 a 2 se 0 a 1 pas 0.125
fin

#le chargement se limite à un très faible effort normal de compression.
#ainsi, toutes les fibres de la poutre gardent la même raideur.
charg 101
  noeud 12 fx -0.01
fin

#----- EXEC INCENDIE -----
#-cas d'un calcul au feu

feu 10
  duree 1
  temp 20.
fin

#décommenter pour avoir un fichier vtp, qui permet d'afficher la section
#avec paraview.
#-----
#resu
#feu section
#fin
#-----

incendie 2
feu 10 charg 101
fin

```

```
exec incendie 2
```

```
#On récupère les caractéristiques de la barre
```

```
resu
```

```
incendie 2 barre 1 cara chaud
```

```
fin
```

```
#-----
```

### 19.10.2 - FICHER RESULTAT

Le fichier de sortie contient la ligne suivante :

```
Geometrie equivalente      : Aire eq = 0.33125E-02 Inertie Y eq  
0.21118E-04 Inertie Z eq 0.11087E-05
```

On retrouve donc bien l'aire de 33.4cm<sup>2</sup>, l'inertie forte de 2140cm<sup>4</sup> et la faible de 117cm<sup>4</sup>. Les écarts sont dû aux arrondis (r1=7.5mm) et congés (r2=4.5mm) du profil IPN200, qui ne sont pas précisément pris en compte sur notre dessin.

## 19.11- STRUCTURE PLANE – POUTRES SUR RESSORTS PSEUDO PLASTIQUE

On présente ici un exemple de calcul de poutres avec ressorts pseudo plastique.

### 19.11.1 - FICHER DE DONNEES

```
#-----
OPTION PLANE

titre 'Ressort NL Plan'

sortie 'exemple11.txt' non pagine

xunit =1.000
nb=40
lg0= 10/nb
numb = int(nb/2)

lg =0
pour i=1 a nb+1 pas 1
<<
    noeud i lg 0
    lg =lg+lg0
>>

appui 1 dx dy #rz
appui numb+1 dy

#

materiau 1 'beton'
e 10000
fin

#----- DEFINITION DES BARRES -----

pour i=1 a nb pas 1 << barre i i i+1 >>

#-----
etude effort depla
tout se 0 a 1 pas 1.0
fin
#-----
cons 1 a nb mat 1
#-----
cara 1 a numb-1 pas 1 sx 1 iz 10

cara pse numb a nb pas 1 sx 1 iz 10
zone 1 kfx 1 kfy 500

ecrire 'sol elastique'
lister cara nb

#-----
charg 101 'ressort elastique'
barre numb a nb uni fy -1000
fin

exec charg 101

#-----
CARA PSE 1 a nb pas 1 sx 1 iz 10
PLASTIQUE NEG kfy 300
zone 1 kfx 1 kfy 500

ecrire 'sol plastique'
lister cara nb
#-----
```

```
charg 102 'ressort plastique'  
      barre numb a nb uni fy -1000  
fin
```

```
exec charg pse 102
```

```
#-----  
# annulation de l effet plastique  
CARA PSE 1 a nb pas 1 sx 1 iz 10  
      PLASTIQUE NEG kfy 0.0  
      zone 1 kfx 1 kfy 500
```

```
ecrire 'sol elastique'  
lister cara nb
```

```
resu  
  charge barre nb effort depla  
fin
```

```
resu  
  charge barre nb press  
fin
```

## 19.11.2 - FICHER RESULTAT

Le fichier résultat correspondant à cet exemple se trouve dans le répertoire `exemples` de **ST1** (`exemple11.txt`).

```

sol elastique
  --- CARACTERISTIQUES MECANQUES DES BARRES ---

  - Poutres sur sol elastique -
  Barre      Sx      Iz      Zone      Kfx      Kfy
            40      1.0000    10.000    1  0.000<X<  L      1.000    500.000

  --- CARACTERISTIQUES DES BARRES ( FIBRES ) ---

sol plastique
  --- CARACTERISTIQUES MECANQUES DES BARRES ---

  - Poutres sur sol elastique -
  Barre      Sx      Iz      Zone      Kfx      Kfy
            40      1.0000    10.000    1  0.000<X<  L      1.000    500.000
  Ressort plastique
  Seuil plastique
  fx      0.000  fy      300.000
  actif si pression <0

  --- CARACTERISTIQUES DES BARRES ( FIBRES ) ---

sol elastique
  --- CARACTERISTIQUES MECANQUES DES BARRES ---

  - Poutres sur sol elastique -
  Barre      Sx      Iz      Zone      Kfx      Kfy
            40      1.0000    10.000    1  0.000<X<  L      1.000    500.000

  --- CARACTERISTIQUES DES BARRES ( FIBRES ) ---

--- RESULTATS DU CHARGEMENT :      101 ---

Titre : ressort elastique

  Barre  Abscisse      N      Ty      Mz
        40      0.000    0.0000    112.11    13.847
        40      0.250    0.0000    0.10953E-03  0.29607E-08

  Barre  Abscisse      Dx      Dy      Rz
        40      0.000    0.0000    -1.0711    -0.25616
        40      0.250    0.0000    -1.1351    -0.25617

--- RESULTATS DU CHARGEMENT :      102 ---

Titre : ressort plastique

  Barre  Abscisse      N      Ty      Mz
        40      0.000    0.0000    174.97    21.780
        40      0.250    0.0000    0.17506E-03 -0.65346E-09

  Barre  Abscisse      Dx      Dy      Rz
        40      0.000    0.0000    -1.2406    -0.29978
        40      0.250    0.0000    -1.3155    -0.29980

--- RESULTATS DU CHARGEMENT :      101 ---

Titre : ressort elastique

  Barre  Abscisse      Px      Py
        40      0.000    0.0000    -535.54
        40      0.250    0.0000    -567.56

```

---

--- RESULTATS DU CHARGEMENT : 102 ---

Titre : ressort plastique

Barre	Abscisse	Px	Py
40	0.000	0.0000	-291.31
40	0.250	0.0000	-308.91

# *IV*

## **ANNEXES**



## DESCRIPTION DU FICHIER PARAMETRES

Le fichier `ST1.par` est le fichier qui contient toutes les données paramétrables de **ST1** :

- le dimensionnement des tableaux internes de **ST1**

- le dictionnaire des mots clés (les mots clés utilisables peuvent être modifiés par l'utilisateur, toutefois une modification de ces mots clés entraîne une non concordance entre le programme **ST1** modifié et le manuel)

- la définition de certaines constantes usuelles

- les paramètres par défaut du calculateur de structures

- les couleurs et types de trait des dessins

— *Les limites modifiables dans le fichier paramètres sont définies au chapitre Limites du programme p28.*

## EXTRAIT DU FICHIER PARAMETRE

```

st1-v24
400 # taille memoire vive en mega-octets (pour le noyau uniquement)#ne pas depasser 500 Mo
128 # taille memoire disque nb_lign_index - BASEIND à modifier pour gros projets(ref:64)
CEREMA_DTOA # Nom SOCIETE (limite à 12 caracteres)
4 'stli' #7 'starbcl'
4 'stld' #7 'starlst'
20 # nombre maximum de fichiers ouverts simultanement
256 # longueur maximale d'un nom de fichier
12 # nombre maximum de boucles actives simultanement
128 # longueur maximale d'une ligne de fichier <256
128 # longueur maximale d'un mot <256
20 # longueur du buffer de liste (nombre de reels )
10000 # nombre maximum de cles du dictionnaire
0 # assimilation des majuscles et des minuscules ( 0:non 1:oui )
0 # code de representation des caracteres ( 0:ASCII 1:EBCDIC )
5000 # nombre maximum de variables
1000 # nombre maximum de tableaux
20 # hauteur des piles dans les expression arith.
20 # % sur le total memoire affecte a la zone primaire
50 # nombre maximum groupes de variables : $var
0 # titre sortie cable (0: titre / charg - 1: titre /cable)
100 # Nombre de modes propres maximum (attention ne pas trop augmenter :memoire)
50 # Nombre d iteration calcul modes propres maximum methode ss espace
25 # Nombre de modes critiques maximum (attention ne pas trop augmenter :memoire)
0 # prise en compte du raidissage de KG par l'effort de traction (0:non 1:oui)
0 # Sortie Matrice Rigidite et Masse dans fichier tampon (0 : non, 1:oui)
2 # inertie polaire > inert_masse rot dyn: 0: ipol=ip /1:si ip nul, ip=itorsion/2: si ip nul, ip=Iy+Iz
0.00005 # tolerance calcul au feu (max 0.05)#-definition des mots cle internes-----
...
FIN
#-definition des constantes
pi=acos(-1)
#-----
#-definition des parametres du calculateur de structures
LG_LISTE 20000 #longueur maximale des listes externes
LG_CHAINE 256
LONG_ENTIER 9
LONG_REEL 12
SEP_LISTE ', '
MAX_MENU 50 # dessin
#-----
PARA_STRUCTURE 20000 40000 2000 #-nombre maximum de : noeuds, barres, appuis
OPTION PLANE #-definition de l'option de calcul par defaut
MX_ETUDE 200000 #-nombre maximum de sections d'etude
PAGINATION #-definition de la pagination (fichier de sortie)
ASC_PAGE 12 #-code ascii de saut de page (12 ou 49)
MAX_LIGNE 100 #-nombre maximum de ligne par page
FIN
#-----
ERREUR 'erreur.txt' #-nom du fichier de rappel des erreurs
#-----
EUROCODE
PSI_FREQ TS 0.75 UDL 0.4
POIDS TS 300.0, 200.0, 100.0 UDL 9.0, 2.5
CLASSE 1 AJUSTEMENT TS 1.0, 1.0 UDL 1.0, 1.2 LM2 0.8
CLASSE 2 AJUSTEMENT TS 0.9, 0.8 UDL 0.7, 1.0 LM2 0.8
CLASSE 3 AJUSTEMENT TS 0.8, 0.5 UDL 0.5, 1.0 LM2 0.8
FIN
#-----
ANALYSE FEU
newton_raphson MAX_ITER 500 PERIODE 5
y var
cara zero
FIN
#-----
#w640_480 = 1 #-ecran
w800_600 = 2
w1024_768 = 3
w1280_1024 = 4
ECRAN w1024_768 #-definition du type d'ecran graphique
...
FIN_PARA

```



# B

## PRINCIPES DE CALCUL

### B1 - EFFETS INSTANTANES DE LA PRECONTRAINTE

Le tracé d'un câble de précontrainte est défini par des tronçons de cubiques paramétrés par l'abscisse curviligne du câble. Ce tracé est discrétisé suivant un pas variable en fonction de la courbure du câble. Cette discrétisation conduit à un tracé en ligne brisée qui sert à construire un chargement de la structure équivalent à l'effet de l'armature de précontrainte. Cette méthode est connue sous le nom de *méthode externe*.

#### B1.1 - CONTRAINTES DANS LES ARMATURES A LA MISE EN TENSION

Les contraintes dans les aciers de précontrainte sont évaluées à la mise en tension en tenant compte des pertes instantanées suivantes :

- les pertes de tension par frottement de l'armature
- les pertes de tension à l'ancrage
- les pertes de tension par non simultanément de mise en tension (cas d'un phasage)

##### B1.1.1 - PERTES DE TENSION PAR FROTTEMENT DE L'ARMATURE

La tension  $\sigma_{p0}$  d'une armature de précontrainte à l'abscisse curviligne  $s$  lors de sa mise en tension est obtenue par la formule :

$$\sigma_{p0}(s) = \sigma_{pa} \cdot e^{-f \cdot \alpha - \varphi \cdot s} = \sigma_{pa} \cdot e^{-\mu \cdot (\alpha - kphi \cdot s)}$$

avec :

$\sigma_{pa}$	tension à l'ancrage actif le plus proche
$e$	base des logarithmes népériens
$s$	distance curviligne de la section à l'ancrage actif le plus proche
$\alpha$	déviations angulaires totales du câble sur la distance $s$
$f$	coefficient de frottement en courbe (rd <sup>-1</sup> ) notion BPEL
$\varphi$	coefficient de perte de tension par unité de longueur (m <sup>-1</sup> ) Notion BPEL
$\mu$	coefficient de frottement en courbe (rd <sup>-1</sup> ) Notion eurocode
$kphi$	coefficient de perte de tension par unité de longueur ou déviations angulaires parasites ou coefficient de festonnage (rad.m <sup>-1</sup> ) Notion eurocode (NB: $\mu \cdot kphi = \varphi$ )

##### B1.1.2 - PERTES DE TENSION A L'ANCRAGE

Le glissement de l'armature par rapport à son ancrage entraîne une perte de tension qui est évaluée comme suit.

On détermine l'abscisse  $s_l$  extrême de propagation de l'effet du recul d'un ancrage par la formule :

$$g = \frac{1}{E_p} \cdot \int_0^{s_l} \sigma_{p0}(s) - \sigma_p(s_l) \cdot e^{-f \cdot \alpha(s_1-s) - \varphi \cdot (s_1-s)} \cdot ds$$

on déduit de l'équation précédente la perte de précontrainte pour toute section comprise entre l'ancrage et la section  $s_l$  :

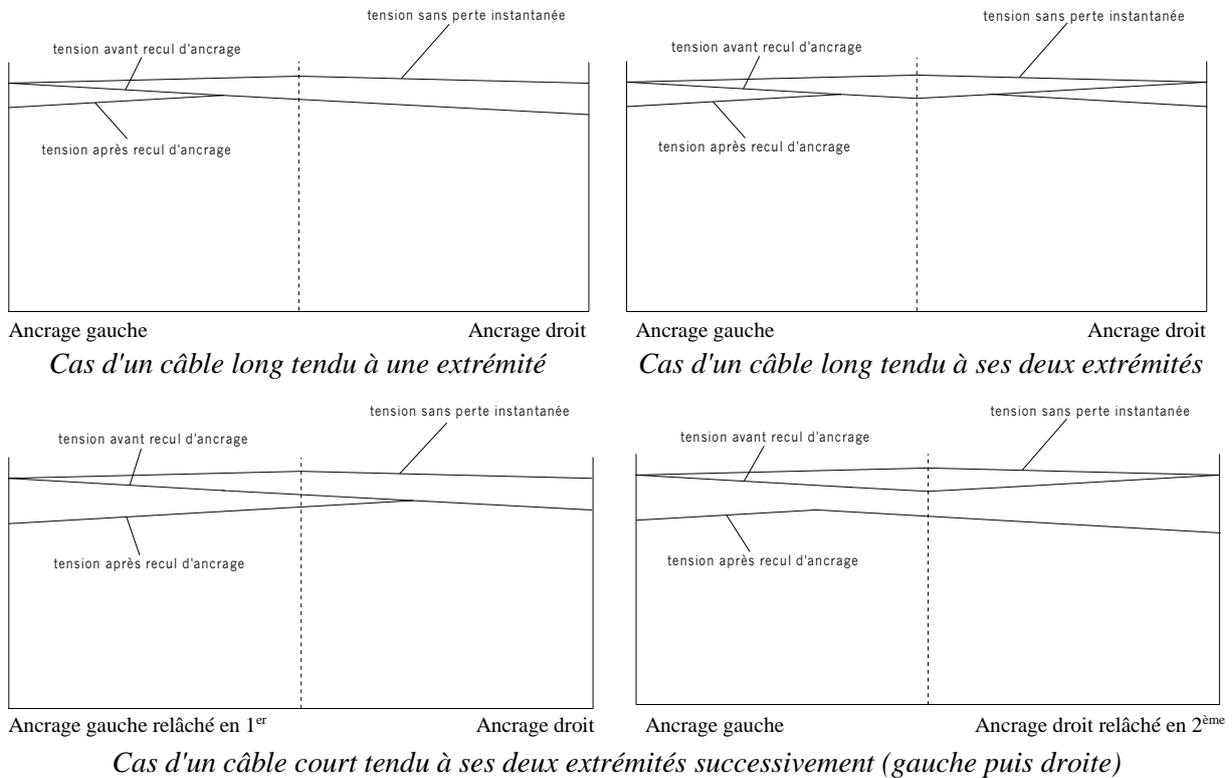
$$\Delta\sigma(s) = \sigma_{p0}(s) - \sigma_p(s_l) \cdot e^{-f \cdot \alpha(s_1-s) - \varphi \cdot (s_1-s)}$$

avec :

- $g$  rentrée d'ancrage (valeur dépendant du dispositif de précontrainte)

- $E_p$  module d'élasticité de l'acier de précontrainte
- $\sigma_{p0}(s)$  contrainte dans l'armature avant perte par recul de l'ancrage
- $\sigma_p(s_j)$  contrainte dans l'armature à la section  $s_j$  après perte par recul d'ancrage

— Pour un câble court comportant deux ancrages actifs, il peut arriver que les zones de propagation de l'effet des reculs d'ancrage se chevauchent. Dans ce cas, l'ordre dans lequel sont relâchés les ancrages intervient dans la valeur de la perte de précontrainte (cf. commande CABLE p120).



**B1.1.3 - PERTES DE TENSION PAR NON SIMULTANÉITÉ DE MISE EN TENSION (CAS D'UN PHASAGE)**

Les pertes de tension par non simultanée de mise en tension sont évaluées à partir du calcul de la déformation des éléments lors de la mise en tension (voir ci-après).

**B1.2 - EFFET DES DEFORMATIONS DES ELEMENTS SUR LA PRECONTRAINTE (CAS D'UN PHASAGE)**

La déformation d'une barre contenant des armatures de précontrainte entraîne une variation des tensions dans les armatures qui lui sont attachées.

Pour chaque tronçon de câble **ST1** calcule :

la déformation  $\epsilon_p$  de l'élément au niveau du centre de gravité du câble

la variation de tension dans le câble par la formule :

$$\Delta\sigma_p = E_p \cdot \epsilon_p$$

le chargement externe dû à la variation de la tension dans le câble

## B2 - EFFETS DIFFERES - CAS D'UN CHARGEMENT

A l'intérieur d'un chargement (cf. commande *CHARG* p103) les effets différés ne peuvent être pris en compte que de manière simplifiée. Pour tenir compte de ces effets de manière plus exacte il faut faire appel à un phasage (cf. commande *PHASAGE* p177).

### B2.1 - PRISE EN COMPTE DES EFFETS DIFFERES DANS LES MATERIAUX

La prise en compte des déformations différées dans les matériaux (retrait, fluage) peut être effectuée par un chargement de type *déformation répartie* (cf. commande *DEFOR* p118).

### B2.2 - PRISE EN COMPTE DES EFFETS DIFFERES DANS LES ARMATURES DE PRECONTRAINTE

La prise en compte des pertes différées dans les armatures de précontrainte s'effectue au moyen de règles simplifiées dépendant du règlement utilisé comme indiqué ci-dessous.

#### PERTE DE PRECONTRAINTE DUE AU RETRAIT BPEL91

La perte de précontrainte due au retrait est évaluée (voir BPEL91 Chap. 3.3,21) par la formule :

$$\Delta\sigma_r = E_p \cdot \varepsilon_r$$

avec :

$E_p$       module d'élasticité de l'acier de précontrainte  
 $\varepsilon_r$       déformation de retrait

— Pour  $\varepsilon_r = 2 \cdot 10^{-4}$ ,  $\Delta\sigma_r \approx 40 \text{ MPa}$  soit environ 3% de la tension instantanée.

#### PERTE DE PRECONTRAINTE DUE AU FLUAGE BPEL91

La perte de précontrainte due au fluage est évaluée (voir BPEL91 Chap. 3.3,21) par la formule :

$$\Delta\sigma_{fl} = 2.5 \cdot \sigma_b \cdot \frac{E_p}{E_{ij}}$$

avec :

$\sigma_b$       contrainte finale dans le béton au niveau des armatures  
 $E_p$       module d'élasticité de l'acier de précontrainte  
 $E_{ij}$       module d'élasticité du béton lors de la mise en tension

— Pour  $\sigma_b = 6 \text{ MPa}$ ,  $\Delta\sigma_{fl} \approx 110 \text{ MPa}$  soit environ 8% de la tension instantanée.

**PERTE DE PRECONTRAINTE DUE A LA RELAXATION DES ACIERS BPEL91**

La perte de précontrainte due à la relaxation des aciers est évaluée (voir BPEL91 Chap. 3.3,23) par la formule :

$$\Delta\sigma_\rho(s) = \frac{6}{100} \cdot \rho_{1000} \cdot \left( \frac{\sigma_{pi}(s)}{f_{prg}} - \mu_0 \right) \cdot \sigma_{pi}(s)$$

avec :

$\sigma_{pi}(s)$	contrainte dans les aciers après pertes instantanées		
$\rho_{1000}$	valeur garantie de la perte par relaxation à 1000 heures		
$\mu_0$	coefficient égal à :		
	0.43	si	$\rho_{1000} \leq 2.5$ (armature TBR)
	0.35	si	$2.5 < \rho_{1000} < 8$
	0.30	si	$8 \leq \rho_{1000}$ (armature RN)

— Pour une armature TBR,  $\Delta\sigma_\rho \approx 50$  MPa soit environ 4% de la tension instantanée.

$\Sigma$  La perte différée totale due au retrait, au fluage et à la relaxation doit être évaluée (voir BPEL91 Chap. 3.3,24) par la formule :

$$\Delta\sigma_d = \Delta\sigma_r + \Delta\sigma_{fl} + \frac{5}{6} \cdot \Delta\sigma_\rho$$

$\Sigma$  La perte différée  $j$  jours après la mise en tension du câble peut être évaluée (voir BPEL91 Chap. 3.3,24) par la formule :

$$\sigma_{dj} = r(j) \cdot \Delta\sigma_d$$

avec :

$$r(j) = \frac{j}{j + 9 \cdot r_m}$$

$r_m$  rayon moyen de la pièce exprimé en cm

**PERTE DE PRECONTRAINTE DUE AU FLUAGE BHP99**

La perte de précontrainte due au fluage est évaluée (voir BPEL91 annexe 14 Chap. 3.3,22) par la formule :

béton sans fumée de silice :  $\Delta\sigma_{fl} = \frac{3}{4} \cdot (\sigma_b + \sigma_M) \cdot \frac{E_p}{E_{ij}}$  si  $\sigma_M < 1.5 \sigma_b$   $\Delta\sigma_{fl} = \frac{15}{8} \cdot \sigma_b \cdot \frac{E_p}{E_{ij}}$

béton avec fumée de silice :  $\Delta\sigma_{fl} = \frac{2}{5} \cdot (\sigma_b + \sigma_M) \cdot \frac{E_p}{E_{ij}}$  si  $\sigma_M < 1.5 \sigma_b$   $\Delta\sigma_{fl} = \sigma_b \cdot \frac{E_p}{E_{ij}}$

avec :

$\sigma_b$	contrainte finale dans le béton au niveau des armatures
$\sigma_M$	contrainte maximale dans le béton au centre de gravité des armatures de précontrainte sous l'effet de l'ensemble des charges, y compris la précontrainte
$E_p$	module d'élasticité de l'acier de précontrainte
$E_{ij}$	module d'élasticité du béton lors de la mise en tension

## B3 - EFFETS DIFFERES - CAS D'UN PHASAGE

∑ *Ce paragraphe ne concerne que les utilisateurs de ST1 version 2.*

Suivant le type de matériau et le dispositif de précontrainte définis, **ST1** est susceptible de faire varier les paramètres suivants en fonction du temps :

- le module de Young
- la déformation due au retrait
- la déformation due au fluage
- la tension dans les aciers actifs

Les trois premiers paramètres sont liés à la définition du matériau des barres (*cf. commande MAT p74*), le quatrième dépend du type de dispositif de précontrainte utilisé (*cf. commande PREC p90*).

### B3.1 - PRISE EN COMPTE DES EFFETS DIFFERES DANS LES MATERIAUX

**ST1** calcule en fonction du temps  $t$  la déformation  $\varepsilon(t)$  du matériau soumis à un historique de contrainte  $\sigma(t)$  variable dans le temps, ainsi qu'à des déformations de retrait ou d'origine thermique.

L'hypothèse d'additivité suivante, assez bien vérifiée par l'expérience, est retenue :

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \varepsilon_T(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_f(t)$$

avec :

$E$	module d'élasticité instantané du matériau
$\varepsilon_T(t)$	déformation d'origine thermique
$\varepsilon_r(t)$	déformation due au retrait
$\varepsilon_f(t)$	déformation différée due au fluage

Les évolutions dans le temps de  $\varepsilon_r(t)$  et de  $\varepsilon_f(t)$  sont supposées être des fonctions connues, indépendantes des phénomènes de déformation élastique et de fluage.

#### B3.1.1 - DEFORMATIONS D'ORIGINE THERMIQUE

La fonction  $\varepsilon_T(t)$  est définie par l'utilisateur à l'aide de chargements thermiques (*cf. commande TEMP p115*).

#### B3.1.2 - DEFORMATIONS DUES AU RETRAIT

La fonction  $\varepsilon_r(t)$  est définie réglementairement en fonction du type de matériau et des conditions hygrométriques du milieu ambiant. Les déformations sont calculées automatiquement par **ST1** pour les matériaux suivant l'un des règlements implantés dans **ST1** (voir détails dans la suite du chapitre).

Si la déformation est imposée au niveau du matériau, celle-ci est retenue dans le calcul avec phasage, autrement elle est calculée par **ST1** selon le phasage.

#### B3.1.3 - DEFORMATIONS DIFFERES DUES AU FLUAGE

La prise en compte du fluage fait appel à la méthode incrémentale développée par MM. ACKER et EYMARD du LCPC (voir Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, n°507-1992, Acker et Eymard et voir BPEL99 annexe 1).

Cette méthode est basée sur le fait qu'il est possible de définir un *état du matériau vis à vis du fluage*. La connaissance de cet état à une date donnée suffit alors pour déterminer le comportement du matériau à une date postérieure.

Ainsi, si l'on se place à une date  $t_0$  et si l'on considère un matériau soumis à un historique de sollicitations quelconques, il est possible de définir à l'aide d'un nombre réduit de paramètres l'état de ce matériau vis à vis du fluage. Connaissant cet état, il est alors possible de trouver un chargement fictif (chargement constant ou chargement / déchargement) produisant le même état du matériau.

Pour toute date  $t$  supérieure à  $t_0$ , le fluage du matériau soumis aux sollicitations initiales est alors identique au fluage du matériau qui a été soumis au chargement fictif.

On peut remarquer que la méthode du temps équivalent est identique à la méthode incrémentale pour tout le domaine où l'état du matériau vis à vis du fluage peut être obtenu par un chargement fictif constant.

#### MISE EN OEUVRE DU CALCUL DU FLUAGE DANS ST1

On admet les hypothèses simplificatrices suivantes :

- les déformations de fluage dues aux contraintes tangentes sont négligeables

- les déformations de fluage dues aux contraintes normales sont convenablement évaluées en réduisant la section à 2 fibres (en 2D) et à 4 fibres (en 3D), en conservant la planéité géométrique des sections

- le découpage en pas de temps est suffisamment petit pour que les contraintes puissent être supposées constantes durant chaque pas de temps

A chaque pas de temps **ST1** effectue les calculs suivants :

- calcul des contraintes dans chaque fibre à partir des déplacements des sections de barre

- calcul des déformations de fluage de chaque fibre à la fin du pas de temps

- génération d'un cas de charge comprenant les déformations de fluage, de retrait et les effets de la relaxation des câbles

- mise à jour des déplacements de la structure sous ce cas de charge

#### CALCUL DU FLUAGE DE CHAQUE FIBRE

La méthode incrémentale permet de déterminer la déformation de fluage dans un intervalle de temps ( $t_0, t$ ) à partir de la connaissance des données ci-dessous :

- les caractéristiques du matériau, indépendantes du temps, elles résultent de différents paramètres (module instantané à 28 jours, pourcentage d'armatures adhérentes, rayon moyen, ...)

- les caractéristiques du milieu ambiant, supposé constant dans l'intervalle ( $t_0, t$ ), le milieu ambiant est défini par son hygrométrie

- la contrainte dans le matériau supposée constante dans l'intervalle ( $t_0, t$ )

- la déformation cumulée de fluage au temps  $t_0$ , valeur représentant l'état du béton au temps  $t_0$  vis à vis du fluage

## **B3.2 - PRISE EN COMPTE DES EFFETS DIFFERES DANS LES ARMATURES DE PRECONTRAINTE**

### **B3.2.1 - VARIATION DE LA TENSION DUE AUX DEFORMATIONS DIFFEREES DES ELEMENTS**

Le fluage et le retrait entraînent une déformation des éléments de la structure au cours du temps. Les effets de ces déformations sont pris en compte de la même manière que les déformations instantanées (*cf. p353*).

### **B3.2.2 - PERTE DE PRECONTRAINTE DUE A LA RELAXATION DES ACIERS**

Les pertes par relaxation sont définies réglementairement en fonction du type d'armature de précontrainte utilisée. Ces pertes sont calculées à chaque pas de temps le long de chaque armature suivant l'un des règlements implantés dans **ST1**.

### B3.3 - CAS PARTICULIER DU REGLEMENT BPEL91

#### B3.3.1 - COMPORTEMENT D'UN BETON BPEL91

Le détail de définition d'un béton BPEL91 est donné dans le chapitre *MATERIAUX* (cf. commande — MAT p75).

Les notations utilisées dans les formules suivantes correspondent à :

$f_{c28}$	résistance caractéristique à la compression à 28 jours du béton (en MPa)
$\rho_h$	hygrométrie ambiante moyenne en %
$\rho_s$	rappport des armatures adhérentes à la section de béton ( $A_s/B$ )
$r_m$	rayon moyen de la pièce exprimé en cm ( $Ac/u$ )

#### MODULE DE YOUNG BPEL91

Le module de Young est défini à partir de la résistance caractéristique à 28 jours exprimée en MPa.

**ST1** utilise les formules (voir BPEL91 Chap. 2.1) :

$$E_{ij} = km \cdot k_{unité} \cdot 11000 \cdot \sqrt[3]{f_{cj}}$$

$$\text{avec : } f_{cj} = \frac{j}{4.76+0.83 \cdot j} \cdot f_{c28} \quad \text{si } f_{c28} \leq 40 \text{ MPa}$$

$$f_{cj} = \frac{j}{1.40+0.95 \cdot j} \cdot f_{c28} \quad \text{si } f_{c28} > 40 \text{ MPa}$$

avec :

$E_{ij}$	module instantané du béton
$km$	coefficient avancé (par défaut 1)
$k_{unité}$	coefficient calculé par <b>ST1</b> (dépend de l'unité choisie)
	$k_{unité} = 1.$ BPEL MPA (module exprimé en MPa)
	$k_{unité} = 1000./9.81$ BPEL TM2 (module exprimé en t/m <sup>2</sup> )
	$k_{unité} = 1000.$ BPEL KNM2 (module exprimé en kN/m <sup>2</sup> )
$f_{c28}$	résistance caractéristique à 28 jours en MPa
$j$	âge du béton en jours

#### MODULE DE YOUNG BETON LEGER BPEL99

Le module de Young est défini à partir de la résistance caractéristique à 28 jours exprimée en MPa.

**ST1** utilise les formules (voir BPEL 99 Annexe 5) :

$$E_{ij} = km \cdot k_{unité} \cdot 1650 \cdot \sqrt{f_{cj}(\rho_{bs})^3}$$

$$\text{avec : } f_{cj} = 0.680 \log(2j + 1) \cdot f_{c28} \quad \text{si } j < 7 \text{ jours}$$

$$f_{cj} = [0.519 + 0.332 \cdot \log(j)] \cdot f_{c28} \quad \text{si } j < 28 \text{ jours}$$

#### RESISTANCE CARACTERISTIQUE A J JOUR DANS LE CAS DU TRAITEMENT THERMIQUE

La résistance caractéristique à j jours est définie à partir de la résistance caractéristique à 28 jours exprimée en MPa (voir BPEL99 Annexe 6) :

$$f_{cj} = f_{cp} + \frac{f_{c28} - f_{cp}}{\log_{10}(28 - t_p + 1)} \cdot \log_{10}(j - t_p + 1) \quad \text{si } t_p \leq j < 28 \text{ jours}$$

$$f_{cj} = f_{c28} \quad \text{si } j \geq 28 \text{ jours}$$

$f_{cp}$	résistance caractéristique à la fin de la cure (mise en tension)
$t_p$	Age du béton à la fin de cure (mise en tension)

**DEFORMATION DUE AU RETRAIT BPEL91**

La déformation relative de retrait qui se développe dans un intervalle de temps ( $t_0, t$ ) est donnée par la formule (voir BPEL Annexe 1-3) :

$$\varepsilon(t_0, t) = \varepsilon_r \cdot [r(t) - r(t_0)]$$

avec béton ordinaire :  $r(t) = \frac{t}{t+9 \cdot r_m}$

béton léger :  $r(t) = \frac{t}{t+9 \cdot r_m + E_a \left( \frac{\rho_h - 50}{25} + k \right)}$

avec :  $k = \frac{r_m - 4}{r_m}$  si  $r_m > 4\text{cm}$

$k = 0$  si  $r_m \leq 4\text{cm}$

avec :

$\varepsilon_r$	déformation finale de retrait
$t$	durée exprimée en jours
$r_m$	rayon moyen en cm ( $Ac/u$ )
$E_a$	quantité d'eau absorbée par les granulats
$\rho_h$	hygrométrie ambiante moyenne en %

La déformation finale de retrait  $\varepsilon_r$  peut être donnée directement par sa valeur numérique ou calculée directement par **ST1**. Dans ce cas, **ST1** calcule la valeur finale de retrait par la formule :

$$\varepsilon_r = kre \cdot k_s \cdot \varepsilon_0 \quad \text{avec : } k_s = \frac{1}{1+20 \cdot \rho_s}$$

et béton ordinaire :  $\varepsilon_0 = (100 - \rho_h) \cdot \left( 6 + \frac{80}{10+3 \cdot r_m} \right) \cdot 10^{-6}$

béton léger :  $\varepsilon_0 = (100 - \rho_h) \cdot \left( 9 + \frac{120}{10+3 \cdot r_m} \right) \cdot 10^{-6}$

avec :

$\rho_h$	hygrométrie ambiante moyenne en %
$\rho_s$	rapport des armatures adhérentes à la section de béton ( $A_s/B$ )
$r_m$	rayon moyen de la pièce en cm ( $Ac/u$ )
$kre$	coefficient avancé (par défaut 1)

**DEFORMATION DUE AU RETRAIT BPEL91 DANS LE CAS DE TRAITEMENT THERMIQUE**

La déformation relative de retrait qui se développe dans un intervalle de temps ( $t_0, t$ ) est donnée par la formule (voir BPEL Annexe 6) :

$$\varepsilon(t_0, t) = \varepsilon_r \cdot [r(t + t_{eb}) - r(t_0 + t_{eb})]$$

avec :

$$t_{eb} = t_{pa} \cdot 1,08^{\theta_{max} - \theta_0}$$

$$t_{pa} = \frac{1}{\theta_{max} - \theta_0} \cdot \int_0^{t_f} (\theta(t) - \theta_0) \cdot dt$$

$$\theta_0 = 20^\circ$$

Les autres formules restent inchangées.

**FLUAGE BPEL91**

Le calcul des déformations différées dues au fluage est effectué selon la méthode incrémentale (cf. p336).

**RAPPEL DE QUELQUES DEFINITIONS UTILISEES POUR LE CALCUL DU FLUAGE**

Déformation conventionnelle instantanée (voir BPEL Annexe 1 §4.2,1)

$$\varepsilon_{ic}(j_0) = \frac{\sigma \cdot (j_0 - j_b)}{E_{i28}}$$

avec :

$\varepsilon_{ic}$	déformation conventionnelle instantanée du béton
$E_{i28}$	module instantané du béton à 28 jours

Déformation de fluage (voir BPEL §2.1.52)

$$\varepsilon_{fl} = kfe \cdot \varepsilon_{ic} \cdot K_{fl}(j_0 - j_b) \cdot f(j - j_0)$$

avec :

$\varepsilon_{fl}$  Déformation de fluage à la date  $j$   
 $kfe$  coefficient avancé (par défaut 1)

Coefficient de fluage (voir BPEL Annexe 1 §4.2,2)

$$K_{fl}(j_0 - j_b) = k_s \cdot [k_e + k_c \cdot k(j_0 - j_b)] \Leftrightarrow$$

avec :

$K_{fl}(j_0 - j_b)$  coefficient de fluage à l'âge  $j_0$  de mise en charge  
 $k_s$  même signification que ci-dessus (voir retrait)  
 $k_e$  limite inférieure du coefficient de fluage du béton non armé  
 ( $k_e = 0.40$ ) (béton léger  $k_e = 0.20$ )  
 $k_c$  coefficient dépendant du milieu ambiant

$$\begin{array}{ll} \text{béton ordinaire} & k_c = \frac{120 - \rho_h}{30} + \frac{2}{3} \cdot \frac{100 - \rho_h}{20 + r_m} \\ \text{béton léger} & k_c = \frac{120 - \rho_h}{50} + \frac{2}{5} \cdot \frac{100 - \rho_h}{20 + r_m} \end{array}$$

avec :

$\rho_h$  hygrométrie ambiante moyenne en %  
 $r_m$  rayon moyen de la pièce en cm ( $Ac/u$ )

$k(j_0 - j_b)$  coefficient dépendant du durcissement du béton à la mise en charge

$$k(t = j_0 - j_b) = \frac{100}{100 + (j_0 - j_b)}$$

avec :

$t = j_0 - j_b$  âge du béton exprimé en jours à la mise en charge

Loi d'évolution du fluage (voir BPEL Annexe 1 §4.2,3)

$$f(j - j_0) = \frac{\sqrt{j - j_0}}{\sqrt{j - j_0} + 5 \cdot \sqrt{r_m}}$$

avec :

$f(t)$  loi d'évolution du fluage  
 $t = j - j_0$  durée d'application du chargement exprimé en jours  
 $r_m$  rayon moyen de la pièce en cm ( $Ac/u$ )

Facteur de la durée de chargement (voir BPEL Annexe 1 §4.4,1)

$$k_r(t) = 4 \cdot \sqrt{\log(t)} \quad \text{si } t \geq 2 \text{ jours}$$

$$k_r(t) = 1 + 0.6 \cdot t \quad \text{si } t < 2 \text{ jours}$$

avec :

$t$  durée d'application du chargement exprimé en jours

Loi d'évolution du retour de fluage (voir BPEL Annexe 1 §4.4,2)

$$g(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{1+t}}$$

avec :

$t$  durée d'application du chargement exprimé en jours

#### FLUAGE BPEL91 DANS LE CAS DE TRAITEMENT THERMIQUE

La déformation relative de fluage est donnée par la formule (voir BPEL Annexe 6) :

$$\varepsilon_{fl} = kfe \cdot \varepsilon_{ic} \cdot K_{fl}(j_0 + t_{eb} - j_b) \cdot f(j - j_0)$$

avec :

$$K_{fl}(j_0 + t_{eb} - j_b) = k_s \cdot [k_e + k_c \cdot k(j_0 + t_{eb} - j_b)] \Leftrightarrow$$

$$t_{eb} = t_{pa} \cdot 1,08^{\theta_{max} - \theta_0} \Leftrightarrow$$

$$t_{pa} = \frac{1}{\theta_{max} - \theta_0} \cdot \int_0^{t_f} (\theta(t) - \theta_0) \cdot dt$$

$$\theta_0 = 20^\circ$$

Les autres formules restent inchangées.

**B3.3.2 - COMPORTEMENT D'UNE ARMATURE DE PRECONTRAINTE BPEL91**

**PERTE PAR RELAXATION PURE BPEL91**

La perte par relaxation pure est donnée par la formule (voir BPEL Annexe 2 §3) :

$$\Delta\sigma_p(t, \sigma) = k_1 \cdot \rho_{1000} \cdot \left(\frac{24 \cdot t}{1000}\right)^{\frac{3}{4} \left(1 - \frac{\sigma}{f_{prg}}\right)} \cdot e^{\frac{10 \cdot \frac{\sigma}{f_{prg}} - 7.5}{k_2}} \cdot \sigma$$

avec :

<i>t</i>	temps exprimé en jours	
$\sigma$	contrainte dans l'armature pour $t = 0$	
$f_{prg}$	limite de rupture garantie des aciers de précontrainte	
$\rho_{1000}$	valeur garantie de la perte par relaxation à 1000 h	
$k_1$	= $6.10^{-3}$	si $\rho_{1000} \leq 2.5$
	= $8.10^{-3}$	si $\rho_{1000} > 2.5$
$k_2$	= 1.10	si $\rho_{1000} < 2.5$ (armature TBR)
	= 1.25	si $2.5 \leq \rho_{1000} < 8.0$
	= 1.50	si $8.0 \leq \rho_{1000}$ (armature RN)

**PERTES PAR RELAXATION SOUS DEFORMATION VARIABLE BPEL91**

Pour  $t$  appartenant à un intervalle de temps  $(t_i, t_{i+1})$  pendant lequel l'armature de précontrainte ne subit pas de déformation, on connaît au début du pas de temps la perte par relaxation cumulée  $\Sigma\Delta\sigma_p(t_i)$  et la contrainte  $\sigma_i$  dans l'armature.

On cherche le temps équivalent  $t^*$  (voir BPEL Annexe 2 §4) qui permet de passer par relaxation de la contrainte  $\sigma_i + \Sigma\Delta\sigma_p(t_i)$  à la contrainte  $\sigma_i$  :

$$\Delta\sigma_p(\rightleftharpoons t^*, \sigma_i + \Sigma\Delta\sigma_p(t_i)) = \Sigma\Delta\sigma_p(t_i)$$

pour  $t > t_i$  on calcule la perte par relaxation cumulée en remplaçant :

$t$  par  $t^* + t - t_i$

$\sigma$  par  $\sigma_i + \Sigma\Delta\sigma_p(t_i)$

$$\Sigma\Delta\sigma_p(t) = \Delta\sigma_p(t^* + t - t_i, \sigma_i + \Sigma\Delta\sigma_p(t_i) \rightleftharpoons)$$

**RELAXATION BPEL91 DANS LE CAS DE TRAITEMENT THERMIQUE (ANNEXE 6 BPEL)**

La contrainte due à la relaxation est donnée par la formule (voir BPEL Annexe 6§4.1) :

$$\Delta\sigma_{\rho}(t + t_{eb}, \sigma) = k_1 \cdot \rho_{1000} \cdot \left( \frac{24 \cdot (t + t_{eb})}{1000} \right)^{\frac{3}{4} \left( 1 - \frac{\sigma}{f_{prg}} \right)} \cdot e^{\frac{10 \cdot \frac{\sigma}{f_{prg}} - 7.5}{k_2}} \cdot \sigma$$

avec :

$$t_{eb} = t_{pa} \cdot 1,14^{\theta_{max} - \theta_0}$$

$$t_{pa} = \frac{1}{\theta_{max} - \theta_0} \cdot \int_0^{t_f} (\theta(t) - \theta_0) \cdot dt$$

$$\theta_0 = 20^\circ$$

Les autres formules restent inchangées.

**PERTE THERMIQUE BPEL DANS LE CAS DE TRAITEMENT THERMIQUE**

La perte de contrainte dans le câble due à l'effet de la cure thermique est donnée par la formule (voir Annexe 6 §4.2) :

$$\Delta\sigma_{\theta_{max}} = Ep \cdot \alpha_b \cdot (\theta_{max} - \theta_0) \cdot (1 - \lambda)$$

avec :

$$\theta_0 = 20^\circ$$

$Ep$	Module du câble de précontrainte
$\alpha_b$	Coefficient de dilatation du béton soumis à la cure
$\lambda$	Coefficient fixé à 0,1 dans le BPEL

### B3.4 - CAS PARTICULIER DU REGLEMENT BHP99

#### B3.4.1 - COMPORTEMENT D'UN BETON BHP99

Le détail de définition d'un béton BHP99 est donné dans le chapitre *MATERIAUX* (cf. commande — MAT p75).

Les notations utilisées dans les formules suivantes correspondent à :

$f_{c28}$	résistance caractéristique à la compression à 28 jours du béton (en MPa)
$\rho_h$	hygrométrie ambiante moyenne en %
$\rho_s$	rapport des armatures adhérentes à la section de béton ( $A_s/B$ )
$r_m$	rayon moyen de la pièce exprimé en cm ( $Ac/u$ )

#### MODULE DE YOUNG BHP99

Le module de Young est défini à partir de la résistance caractéristique à 28 jours exprimée en MPa.

**ST1** utilise les formules (voir BPEL Chap. 2.1) :

$$E_{ij} = km \cdot k_{unité} \cdot 11000 \cdot \sqrt[3]{f_{cj}} \quad \text{avec : } f_{cj} = \frac{j}{1.40+0.95 \cdot j} \cdot f_{c28}$$

avec :

$E_{ij}$	module instantané du béton
$km$	coefficient avancé (par défaut 1)
$k_{unité}$	coefficient calculé par <b>ST1</b> (dépend de l'unité choisie)
	$k_{unité} = 1.$ MPA (module exprimé en MPa)
	$k_{unité} = 1000./9.81$ TM2 (module exprimé en t/m <sup>2</sup> )
	$k_{unité} = 1000.$ KNM2 (module exprimé en kN/m <sup>2</sup> )
$f_{c28}$	résistance caractéristique à 28 jours en MPa
$j$	âge du béton en jours

#### RESISTANCE CARACTERISTIQUE DANS LE CAS DU TRAITEMENT THERMIQUE

La résistance caractéristique à 28 jours exprimée en MPa est modifiée (voir BPEL99 Annexe 6 modifiée) :

$$f_{c28m} = f_{c28} \cdot \left(1 - 0,0035 \frac{\theta_{max}}{20}\right) \quad \text{si } \theta_{max} \geq 40^\circ\text{C}$$

La résistance caractéristique à  $j$  jours est définie à partir de la résistance caractéristique à 28 jours exprimée en MPa (voir BPEL99 Annexe 6) :

$$f_{cj} = f_{cp} + \frac{f_{c28m} - f_{cp}}{\log_{10}(28 - t_p + 1)} \cdot \log_{10}(j - t_p + 1) \quad \text{si } t_p \leq j < 28 \text{ jours}$$

$$f_{cj} = f_{c28m} \quad \text{si } j \geq 28 \text{ jours}$$

$f_{cp}$	résistance caractéristique à la fin de la cure (mise en tension)
$t_p$	Age du béton à la fin de cure (mise en tension)

**DEFORMATION DUE AU RETRAIT BHP99**

Déformation de retrait total

$$\varepsilon_{ret} = \frac{krd \cdot \varepsilon_{rd} + kre \cdot \varepsilon_{re}}{1 + n\rho_s}$$

avec :  $n = 15$  si  $40 \leq f_{c28} < 60$  MPa $n = 9$  si  $60 \leq f_{c28} < 80$  MPa $krd$  coefficient avancé (par défaut 1) $kre$  coefficient avancé (par défaut 1) $\rho_s$  rapport des armatures adhérentes à la section de béton ( $A_s/B$ )

Déformation due au retrait endogène

pour  $j - j_b < 28$  jours

$$\text{si } \frac{f_c(j-j_b)}{f_{c28}} < 0.1 \text{ alors } \varepsilon_{re}(j - j_b, f_{c28}) = 0$$

$$\text{si } \frac{f_c(j-j_b)}{f_{c28}} \geq 0.1 \text{ alors } \varepsilon_{re}(j - j_b, f_{c28}) = (f_{c28} - 20) \cdot \left(2.2 \frac{f_c(j-j_b)}{f_{c28}} - 0.2\right) \cdot 10^{-6}$$

$$\text{pour } j - j_b \geq 28 \text{ jours } \varepsilon_{re}(j - j_b, f_{c28}) = (f_{c28} - 20) \cdot (2.8 - 1.1e^{-(j-j_b)/96}) \cdot 10^{-6}$$

Déformation due au retrait de dessiccation

$$\text{béton sans fumée de silice : } \varepsilon_{rd}(j, j_b) = K(f_{c28}) \cdot \frac{72e^{-0.046f_{c28}+75-\rho_h}}{1+8.4\frac{r_m^2}{j-j_0}} \cdot 10^{-6}$$

$$\text{béton avec fumée de silice : } \varepsilon_{rd}(j, j_b) = K(f_{c28}) \cdot \frac{72e^{-0.046f_{c28}+75-\rho_h}}{1+2.8\frac{r_m^2}{j-j_0}} \cdot 10^{-6}$$

avec :  $K(f_{c28}) = 18$  si  $40 \leq f_{c28} < 57$  MPa $K(f_{c28}) = 30 - 0.21f_{c28}$  si  $57 \leq f_{c28} < 80$  MPa

avec :

 $r_m$  rayon moyen en cm ( $Ac/u$ ) $\rho_h$  hygrométrie ambiante moyenne en % $j_b$  date de bétonnage du béton $j$  date courante $j - j_b$  âge courant du béton $j_0$  Age à partir du quel commence la dessiccation ( $j_0 = j_b$  sauf si étuvage  $j_0 > j_b$ ) $j - j_0$  Durée de dessiccation du béton**DEFORMATION DUE AU RETRAIT BPEL99 DANS LE CAS DE TRAITEMENT THERMIQUE**

La déformation relative de retrait qui se développe dans un intervalle de temps ( $t_0, t$ ) est donnée par la formule (voir BPEL Annexe 6 modifiée) :

$$\varepsilon(t_0, t) = \varepsilon_r \cdot [r(t) - r(t_0)]$$

La résistance caractéristique est réduite ( $f_{c28}$  est remplacée par  $f_{c28m}$ ) (voir BPEL Annexe 6 modifiée):

**FLUAGE BHP99**

Le calcul des déformations différées dues au fluage est effectué selon la méthode incrémentale (cf. p336).

Déformation de fluage différé total

$$\varepsilon_{flu} = \frac{kfd \cdot \varepsilon_{fd} + kfe \cdot \varepsilon_{fp}}{1 + n \cdot \rho_s}$$

avec :

$\rho_s$  rapport des armatures adhérentes à la section de béton ( $A_s/B$ )

$n = 15$  si  $40 \leq f_{c28} < 60MPa$

$n = 9$  si  $60 \leq f_{c28} < 80MPa$

$kfd$  coefficient avancé (par défaut 1)

$kfe$  coefficient avancé (par défaut 1)

Déformation conventionnelle instantanée à la date de mise en charge  $j_0$

$$\varepsilon_{ic}(j_0) = \frac{\sigma(j_0 - j_b)}{E_{i28}}$$

$\varepsilon_{ic}$  déformation conventionnelle instantanée du béton

$E_{i28}$  module instantané du béton à 28 jours

Déformation conventionnelle différée par fluage propre

$$\varepsilon_{fp}(j_0) = K_{fl}(j_0 - j_b) \cdot f(j - j_0) \cdot \varepsilon_{ic}(j_0)$$

$K_{fl}$  coefficient de fluage du béton à la date  $j$  pour un bétonnage à la date  $j_b$  pour une mise en charge à l'âge  $j$

Coefficient de fluage  $K_{fl}$  et loi d'évolution du fluage  $f$

béton sans fumée de silice :  $K_{fl} = 1.4$   $f(j - j_0) = \frac{\sqrt{j-j_0}}{\sqrt{j-j_0 + kfc \cdot 0.40e^{\frac{3.1f_c(j_0)}{f_{c28}}}}}$

béton avec fumée de silice:  $K_{fl} = \frac{3.6}{f_c(j_0 - j_b)^{0.37}}$   $f(j - j_0) = \frac{\sqrt{j-j_0}}{\sqrt{j-j_0 + kfc \cdot 0.37e^{\frac{2.8f_c(j_0)}{f_{c28}}}}}$

avec :

$K_{fl}(j_0 - j_b)$  coefficient de fluage à l'âge  $t_l$  de mise en charge

$f(j - j_0)$  loi d'évolution du fluage

$j - j_0$  durée d'application du chargement exprimé en jours

$r_m$  rayon moyen de la pièce en cm ( $Ac/u$ )

$f_c(j_0)$  résistance du béton à la date  $j_0$

$kfc$  coefficient avancé de cinétique de fluage (par défaut =1)

Déformation conventionnelle différée par fluage de dessiccation

béton sans fumée de silice :  $\varepsilon_{fd} = 3,2 \cdot 10^3 \cdot [\varepsilon_{rd}(j) - \varepsilon_{rd}(j_0)] \cdot \varepsilon_{ic}(j_0)$

béton avec fumée de silice :  $\varepsilon_{fd} = 10^3 \cdot [\varepsilon_{rd}(j) - \varepsilon_{rd}(j_0)] \cdot \varepsilon_{ic}(j_0)$

$\varepsilon_{rd}(j)$  déformation due au retrait de dessiccation

**DEFORMATION DUE AU FLUAGE BPEL99 DANS LE CAS DE TRAITEMENT THERMIQUE**

La déformation de fluage prend en compte la résistance caractéristique réduite  $f_{c28m}$  (voir BPEL Annexe 6 modifiée)

**B3.4.2 - COMPORTEMENT D'UNE ARMATURE DE PRECONTRAINTE BHP99**

Voir § B3.3.2 - comportement d'une armature de précontrainte BPEL91

### B3.5 - CAS PARTICULIER DU REGLEMENT CEB90 - COMPORTEMENT D'UN BETON CEB90

Référence: Bulletin d'information n°213/214 - CEB-FIP Model Code 1990 (mai 1993)

Le détail de définition d'un béton CEB90 est donné dans le chapitre MATERIAUX (cf. commande MAT p78).

Les notations utilisées dans les formules suivantes correspondent à :

$f_{ck}$	résistance caractéristique à la compression à 28 jours du béton (en MPa)	
$\rho_h$	hygrométrie ambiante moyenne en %	(voir CEB 2.1-69)
$h$	rayon moyen de la pièce exprimé en mm ( $2A_c/u$ )	

Les types de ciments sont caractérisés comme suit :

SL	ciments à prise lente
N, R	ciments normaux ou à prise rapide
RS	ciments haute résistance à prise rapide

#### DEFINITION DE QUELQUES VARIABLES INTERMEDIAIRES

Résistance moyenne à 28 jours

$$f_{cm} = f_{ck} + \Delta f$$

avec :

$$\Delta f = 8 \text{ MPa} \quad (\text{voir CEB 2.1-1})$$

Module d'élasticité à 28 jours

$$E_{ci} = E_{c0} \cdot \sqrt[3]{\frac{f_{cm}}{10}}$$

avec :

$$E_{c0} = 2.15 \cdot 10^4 \text{ MPa} \quad (\text{voir CEB 2.1-15})$$

#### MODULE DE YOUNG CEB90

Le module de Young utilisé par **ST1** est calculé à partir du module d'élasticité à 28 jours et de l'âge du matériau par la formule :

$$E_{ci}(t) = km \cdot k_{unité} \cdot E_{ci} \cdot \beta_E(t) \quad (\text{voir CEB 2.1-57})$$

avec :

$km$	coefficient avancé (par défaut 1)
$k_{unité}$	coefficient calculé par <b>ST1</b> (dépend de l'unité choisie)
	= 1 MPA (module exprimé en MPa)
	= 1000./9.81 TM2 (module exprimé en t/m <sup>2</sup> )
	= 1000. KNM2 (module exprimé en kN/m <sup>2</sup> )
$E_{ci}$	module d'élasticité à 28 jours (voir ci-dessus)

$$\beta_E(t) = \sqrt{e^{s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)}} \quad (\text{voir CEB 2.1-54 et 2.1-58})$$

avec :

$t$	âge du béton en jours
$s$	coefficient dépendant du type de ciment
	= 0.38 pour des ciments à prise lente SL
	= 0.25 pour des ciments normaux ou à prise rapide N et R
	= 0.20 pour des ciments haute résistance à prise rapide RS

**DEFORMATION DUE AU RETRAIT CEB90**

La déformation relative de retrait qui se développe dans un béton à l'âge  $t$  est donnée par la formule :

$$\varepsilon_{cs} = kre \cdot \varepsilon_{cs0} \cdot \beta_s(t - t_s) \quad (\text{voir CEB 2.1-74})$$

avec :

- $kre$  coefficient avancé (par défaut 1)  
 $\varepsilon_{cs0}$  déformation de retrait à l'infini (voir ci-dessus)  
 $\beta_s(t-t_0)$  loi d'évolution du retrait (voir ci-dessous)

Déformation de retrait à l'infini

$$\varepsilon_{cs0} = \left[ 160 + 10 \cdot \beta_{sc} \cdot \left( 9 - \frac{f_{cm}}{10} \right) \right] \cdot \beta_{RH} \cdot 10^{-6} \quad (\text{voir CEB 2.1-76})$$

avec :

- $\beta_{sc}$  = 4 pour des ciments à prise lente SL  
 = 5 pour des ciments normaux ou à prise rapide N et R  
 = 8 pour des ciments haute résistance à prise rapide RS
- $\beta_{RH}$  =  $-1.55 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{RH}{100} \right)^3 \right]$  si  $40\% \leq RH < 99\%$  (voir CEB 2.1-77)  
 = 0.25 si  $RH \geq 99\%$

Loi d'évolution du retrait

$$\beta_s(t - t_s) = \sqrt{\frac{t - t_s}{350 \cdot \left( \frac{h}{100} \right)^2 + t - t_s}} \quad (\text{voir CEB 2.1-79})$$

avec :

- $t$  âge du béton en jours  
 $t_s$  âge du béton en jours au moment où commence le retrait

**DEFORMATION DUE AU FLUAGE CEB90**

La déformation de fluage est donnée par la formule :

$$\varepsilon_{cc} = kfe \cdot \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{ci}} \cdot \varphi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) \quad \text{(voir CEB 2.1-61 et 2.1-64)}$$

avec :

- $kfe$  coefficient avancé (par défaut 1)
- $t_0$  âge du béton au moment du chargement
- $\sigma_c(t_0)$  contrainte dans le béton au moment du chargement
- $E_{ci}$  module d'élasticité à 28 jours (voir ci-dessus)
- $\phi_0$  coefficient de fluage à l'infini (voir ci-dessous)
- $\beta_c(t-t_0)$  loi d'évolution du fluage(voir ci-dessous)

Coefficient de fluage à l'infini

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \quad \text{(voir CEB 2.1-65)}$$

avec :

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0.46 \cdot \sqrt[3]{\frac{h}{100}}} \quad \text{(voir CEB 2.1-66)}$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5.3}{\sqrt{\frac{f_{cm}}{10}}} \quad \text{(voir CEB 2.1-67)}$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + \sqrt[5]{t_0}} \quad \text{(voir CEB 2.1-68)}$$

Loi d'évolution du fluage

$$\beta_c(t - t_0) = \left( \frac{t - t_0}{\beta_h + t - t_0} \right)^{0.3} \quad \text{(voir CEB 2.1-70)}$$

avec :

$$\beta_h = \frac{150 \cdot h}{100} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{1.2 \cdot RH}{100} \right)^{18} \right] + 250 \leq 1500 \quad \text{(voir CEB 2.1-71)}$$

### B3.6 - CAS PARTICULIER DU REGLEMENT EN1992-1-1

#### B3.6.1 - COMPORTEMENT D'UN BETON EN1992-1-1

Le détail de définition d'un béton EN1992-1-1 est donné dans le chapitre MATERIAUX (cf. — commande MAT p80).

Les notations utilisées dans les formules suivantes correspondent à :

$f_{ck}$	résistance caractéristique à la compression à 28 jours (en MPa)
$\rho_h$	hygrométrie ambiante moyenne en %
$h$	rayon moyen de la pièce exprimé en mm (2Ac/u)

Les classes de résistance sont caractérisées comme suit :

S	classe de résistance CEM 32,5 N (ciments à prise lente)
N	classe de résistance CEM 32,5 R, CEM 42,5 N (ciments normaux)
R	classe de résistance CEM 42,5 R, CEM 52,5 N, CEM 52,5 R (ciments haute résistance à prise rapide)

#### MODULE DE YOUNG EN1992-1-1

Le module de Young est défini à partir de la résistance caractéristique  $f_{ck}$  à 28 jours exprimée en MPa.

**ST1** utilise les formules (voir EN1992-1-1 Tableau 3.1).

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad \text{avec : } f_{cm} \text{ en MPa}$$

$$E_{cm} = km \cdot k_{unité} \cdot 22\,000 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3} \quad \text{avec : } f_{cm} \text{ en MPa}$$

$$f_{cm}(j) = f_{cm} \cdot \exp\left[s \left(1 - \left(\frac{28}{j}\right)^{0.5}\right)\right]$$

$$E_j = E_{cm} \cdot \left(\exp\left[s \left(1 - \left(\frac{28}{j}\right)^{0.5}\right)\right]\right)^{0.3}$$

avec :

$E_{cm}$	module instantané du béton
$km$	coefficient avancé (par défaut =1)
$k_{unité}$	coefficient calculé par <b>ST1</b> (dépend de l'unité choisie)
	$k_{unité} = 1$ EC2 MPa (module exprimé en MPa)
	$k_{unité} = 1\,000/9.81$ EC2 tm2 (module exprimé en t/m <sup>2</sup> )
	$k_{unité} = 1\,000$ EC2 KNM2 (module exprimé en kN/m <sup>2</sup> )
$f_{ck}$	résistance caractéristique à 28 jours en MPa
$j$	âge du béton en jours
$s$	coefficient dépendant du type de ciment
	$s = 0.20$ ciment de classe R
	CEM42.5 R, CEM52.5 N, et CEM52.5 R
	$s = 0.25$ ciment de classe N
	CEM32.5 R, CEM42.5 N
	$s = 0.38$ ciment de classe S
	CEM32.5 N

**RESISTANCE MOYENNE A J JOUR EN1992-1-1 DANS LE CAS DU TRAITEMENT THERMIQUE**

La résistance moyenne à j jour définie à partir de la résistance moyenne à 28 jours exprimée en MPa.

**ST1** utilise les formules (voir EC2-1-1 §10.3.1.1) :

$$f_{cm}(j) = f_{cmp} + \frac{f_{cm} - f_{cmp}}{\log_{10}(28 - t_p + 1)} \cdot \log_{10}(j - t_p + 1) \quad \text{si } t_p \leq j < 28 \text{ jours}$$

$$f_{cm}(j) = f_{c28} \quad \text{si } j \geq 28 \text{ jours}$$

avec :

$f_{cmp}$  résistance moyenne à la fin de la cure (mise en tension)  
 $t_p$  Age du béton à la fin de cure (mise en tension)

**DEFORMATION DUE AU RETRAIT EN1992-1-1**

La déformation relative de retrait qui se développe dans un intervalle de temps ( $j_0, j$ ) est donnée par la formule (voir EN1992-1-1 (eq. 3.8 à 3.13) & Annexe B2) :

Retrait total  $\varepsilon_{cs}$

$$\varepsilon_{cs} = krd \cdot \varepsilon_{cd} + kre \cdot \varepsilon_{ca} \quad (\text{voir eq. 3.8})$$

$kre$  coefficient avancé (par défaut =1)  
 $krd$  coefficient avancé (par défaut =1)

Retrait de dessiccation  $\varepsilon_{cd}$

$$\varepsilon_{cd}(j) = \beta_{ds}(j) \cdot k_h(h) \cdot \varepsilon_{cd0} \quad (\text{voir eq. 3.9})$$

$$\beta_{ds}(j) = \frac{j}{j + 0.04\sqrt{h^3}} \quad (\text{voir eq. 3.10})$$

avec :

$j$  âge du béton à l'instant  $t$  considéré en jours  
 $h$  rayon moyen de la section transversale en mm (2Ac/u)  
 $k_h(h)$  coefficient dépendant du rayon moyen (tableau 3.3)  
 $kh(100)=1$  ;  $kh(200)=0.85$  ;  $kh(300)=0.75$  ;  $kh(h>500)=0.70$

$$\varepsilon_{cd0} = 0.85 \left[ (220 + 110\alpha_{ds1}) \cdot \exp\left(-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}\right) \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH} \quad (\text{voir annexe B2 eq. B11})$$

$$\beta_{RH} = 1.55 \left[ 1 - \left( \frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] \quad (\text{voir annexe B2 eq. B12})$$

avec :

$f_{cm}$  résistance moyenne en compression en MPa  
 $f_{cm0}$  10 MPa  
 $RH$  humidité relative de l'environnement ambiant en %  
 $RH_0$  100 %  
 $\alpha_{ds1}$  coefficient dépendant du type de ciment  
 $\alpha_{ds1}=3$  (classe S) ou 4 (classe N) ou 6 (classe R)  
 $\alpha_{ds2}$  coefficient dépendant du type de ciment  
 $\alpha_{ds1}=0.13$  (classe S) ou 0.12 (classe N) ou 0.11 (classe R)

Retrait endogène  $\varepsilon_{ca}$

$$\varepsilon_{ca}(j) = \beta_{as}(j) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty) \quad (\text{voir eq. 3.11})$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2.5(f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \quad (\text{voir eq. 3.12})$$

$$\beta_{as}(j) = 1 - \exp(-0.2j^{0.5}) \quad (\text{voir eq. 3.13})$$

**DEFORMATION DUE AU RETRAIT DANS LE CAS DE TRAITEMENT THERMIQUE**

La déformation relative de retrait est donnée par la formule:

Retrait total  $\varepsilon_{cs}$

$$\varepsilon_{cs} = krd \cdot \varepsilon_{cd} + kre \cdot \varepsilon_{ca} \quad (\text{voir eq. 3.8})$$

Retrait de dessiccation  $\varepsilon_{cd}$

$$\varepsilon_{cd}(j) = \beta_{ds}(j) \cdot k_h(h) \cdot \varepsilon_{cd0} \quad (\text{voir eq. 3.9})$$

$$\beta_{ds}(j_0) = \frac{j - j_p}{j - j_p + 0.04\sqrt{h^3}} \quad (\text{voir eq. 3.10})$$

avec :

$j_p$  Age du béton à la fin de cure (mise en tension)

Retrait endogène  $\varepsilon_{ca}$

$$\varepsilon_{ca}(j) = 0$$

**FLUAGE EN1992-1-1**

Le calcul des déformations différées dues au fluage est effectué selon la méthode incrémentale (cf. p336).

Déformation conventionnelle instantanée à la date  $j_0$

$$\varepsilon_{ic}(j_0) = \frac{\sigma_c(j_0 - j_b)}{E_c}$$

avec :

- $\sigma_c$  contrainte de compression constante appliquée à la date  $j_0$  de mise en charge du béton (décrite dans le phasage)
- $E_c$  module tangent instantané du béton  
 $E_c = 1.05E_{cm}$  § 3.1.4 (2)

Déformation conventionnelle différée

$$\varepsilon_{cc}(j_0) = kfe \cdot \varphi_k(\infty, j_0) \cdot \frac{\sigma_c(j_0)}{E_c} \quad \text{(voir eq. 3.6)}$$

- $kfe$  coefficient avancé (par défaut =1)
- $\varphi_k(j, j_0)$  coefficient de fluage du béton à la date  $j$  pour une mise en charge à l'âge  $j_0$

Coefficient de fluage §3.1.4 (2)(3)(4)

$$\varphi_k(\infty, j_0) = \phi(\infty, j_0)$$

L'annexe B §B.1 fournit la définition du coefficient de fluage:

- $\phi(j, j_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(j, j_0)$  (voir eq. B1)
- $\phi_0 = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(j_0)$  (voir eq. B2)
- $\phi_{RH} = 1 + \frac{1-RH/100}{0.1\sqrt[3]{h}}$  pour  $f_{cm} \leq 35\text{MPa}$  (voir eq. B3a)
- $\phi_{RH} = \left[1 + \frac{1-RH/100}{0.1\sqrt[3]{h}} \alpha_1\right] \alpha_2$  pour  $f_{cm} > 35\text{MPa}$  (voir eq. B3b)

avec :

- $RH$  humidité relative de l'environnement ambiant en %
- $h$  rayon moyen de la pièce exprimé en mm  
 $h = 2Ac / u$  (voir eq. B6)
- $Ac$  aire de la section droite
- $u$  périmètre de l'élément en contact avec l'atmosphère

- $\beta(f_{cm}) = \frac{16.8}{\sqrt{f_{cm}}}$  (voir eq. B4)
- $\beta(j_0) = \frac{1}{0.1 + j_{0T}^{0.2}} \Leftrightarrow$  (voir eq. B5)
- $j_{0T} = j_{0T} \cdot \left(\frac{9}{2 + j_{0T}^{1.2}}\right)^\alpha \geq 0,5$  et  $j_{0T} = j_0$  (voir eq. B9)
- $\beta_c(j, j_0) = \left(\frac{j - j_0}{\beta_H + j - j_0}\right)^{0.3}$  (voir eq. B7)
- $\beta_H = 1.5[1 + (0.012RH)^{18}] \Leftrightarrow h + 250 \leq 1500$  pour  $f_{cm} \leq 35\text{MPa}$  (voir eq. B8a)
- $\beta_H = 1.5[1 + (0.012RH)^{18}] \Leftrightarrow h + 250\alpha_3 \leq 1500\alpha_3$  pour  $f_{cm} > 35\text{MPa}$  (voir eq. B8b)
- $\alpha_1 = \left[\frac{35}{f_{cm}}\right]^{0.7}$   $\alpha_2 = \left[\frac{35}{f_{cm}}\right]^{0.2}$   $\alpha_3 = \left[\frac{35}{f_{cm}}\right]^{0.5}$  (voir eq. B8.c)

**FLUAGE EC2 DANS LE CAS DE TRAITEMENT THERMIQUE**

La déformation relative de fluage est donnée par la formule (EN 1992-1-1 Annexe B) :

$$j_{0T} = \sum e^{-(4000/[273+T(\Delta t_i)]-13.65)} \cdot \Delta t_i \quad \text{(voir eq. B10)}$$

avec :

- $T(\Delta t_i)$  température en degré de la cure entre 0 et 80 degrés
- $\Delta t_i$  durée pendant laquelle est appliquée la température T

A noter que,  $j_{0T} = \sum \Delta t_i = j_0$ , lorsque la température est de 20 degrés, c'est à dire lorsqu'il n'y a pas de cure.

### B3.6.2 - COMPORTEMENT D'UNE ARMATURE DE PRECONTRAITE EN1992-1-1

#### PERTE PAR RELAXATION PURE EN1992-1-1

La perte par relaxation pure est donnée par la formule (voir EN 1992-1-1 §3.3.2 eq. 3.28-3.29-3.30 Annexe C) :

$$\Delta\sigma_{pr}(t, \sigma) = k_1 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{k_3 \mu} \cdot \left( \frac{24 \cdot t}{1000} \right)^{\frac{3}{4}(1-\mu)} \cdot \sigma_{pi}$$

avec :

$t$	temps exprimé en jours		
$\sigma_{pi}$	contrainte initiale dans l'armature pour $t = 0$		
$\mu = \sigma_{pi} / f_{pk}$	limite de rupture garantie des aciers de précontrainte		
$\rho_{1000}$	valeur garantie de la perte par relaxation à 1000 h		
$k_1$	0.66.10 <sup>-5</sup>	si	$\rho_{1000} \leq 2.5$ (armature TBR)
	1.98.10 <sup>-5</sup>	si	$2.5 \leq \rho_{1000} < 8$
	5.39.10 <sup>-5</sup>	si	$8.0 \leq \rho_{1000}$ (armature RN)
$k_3$	9.1	si	$\rho_{1000} \leq 2.5$ (armature TBR)
	8	si	$2.5 \leq \rho_{1000} < 8$
	6.7	si	$8.0 \leq \rho_{1000}$ (armature RN)

#### PERTES PAR RELAXATION SOUS DEFORMATION VARIABLE EN 1992-1-1

Pour  $t$  appartenant à un intervalle de temps  $(t_i, t_{i+1})$  pendant lequel l'armature de précontrainte ne subit pas de déformation, on connaît au début du pas de temps la perte par relaxation cumulée  $\Sigma\Delta\sigma_p(t_i)$  et la contrainte  $\sigma_i$  dans l'armature.

On cherche le temps équivalent  $t^*$  qui permet de passer par relaxation de la contrainte  $\sigma_i + \Sigma\Delta\sigma_p(t_i)$  à la contrainte  $\sigma_i$  :

$$\Delta\sigma_p(t^*, \sigma_i + \Sigma\Delta\sigma_p(t_i)) = \Sigma\Delta\sigma_p(t_i)$$

pour  $t > t_i$  on calcule la perte par relaxation cumulée en remplaçant :

$$t \quad \text{par} \quad t^* + t - t_i$$

$$\sigma \quad \text{par} \quad \sigma_i + \Sigma\Delta\sigma_p(t_i)$$

$$\Sigma\Delta\sigma_p(t) = \Delta\sigma_p(t^* + t - t_i, \sigma_i + \Sigma\Delta\sigma_p(t_i))$$

**RELAXATION EC2 DANS LE CAS DE TRAITEMENT THERMIQUE**

La contrainte due à la relaxation est donnée par la formule (voir EC2-1-1 §10.3.2) :

$$\Delta\sigma_{pr}(t + t_{eb}, \sigma) = k_1 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{k_3\mu} \cdot \left( \frac{24 \cdot (t + t_{eb})}{1000} \right)^{\frac{3}{4}(1-\mu)} \cdot \sigma_{pi}$$

avec :

$$t_{eb} = t_{pa} \cdot 1,14^{\theta_{max} - \theta_0} \quad \text{et} \quad t_{pa} = \frac{1}{\theta_{max} - \theta_0} \cdot \sum_i (\theta(\Delta t_i) - \theta_0) \cdot \Delta t_i \quad (\text{eq 10.2})$$

$$\theta_0 = 20^\circ$$

$T(\Delta t_i)$  température en degré de la cure entre 0 et 80 degrés  
 $\Delta t_i$  durée pendant laquelle est appliquée la température T

Les autres formules restent inchangées.

**PERTE THERMIQUE EC2 DANS LE CAS DE TRAITEMENT THERMIQUE**

La perte de contrainte dans le câble due à l'effet de la cure est donnée par la formule (voir EC2-1-1 §10.5.2) :

$$\Delta\sigma_{\theta_{max}} = Ep \cdot \alpha_b \cdot (\theta_{max} - \theta_0) \cdot (1 - \lambda)$$

avec :

$$\theta_0 = 20^\circ$$

$Ep$  Module du câble de précontrainte  
 $\alpha_b$  Coefficient de dilatation du béton soumis à la cure  
 $\lambda$  Coefficient fixé à 0,5 dans l'EC2

### B3.7 - CAS PARTICULIER DU REGLEMENT BHP EN1992-2 - COMPORTEMENT D'UN BETON BHP EN1992-2

Le détail de définition d'un béton BHP EN1992-2 est donné dans le chapitre MATERIAUX (cf. commande MAT p81).

Les notations utilisées dans les formules suivantes correspondent à :

$f_{ck}$	résistance caractéristique à la compression à 28 jours du béton (en MPa)
$\rho_h$	hygrométrie ambiante moyenne en %
$\rho_s$	rapport des armatures adhérentes à la section de béton ( $A_s/B$ )
$h$	rayon moyen de la pièce exprimé en mm ( $2Ac/u$ )
$n$	coefficient d'équivalence Acier/Béton ( $E_s/E_c$ )

Les classes de résistance sont caractérisées comme suit :

S	classe de résistance CEM 32,5 N (ciments à prise lente)
N	classe de résistance CEM 32,5 R, CEM 42,5 N (ciments normaux)
R	classe de résistance CEM 42,5 R, CEM 52,5 N, CEM 52,5 R (ciments haute résistance à prise rapide)

#### MODULE DE YOUNG BHP EN1992-2 (EN1992-1-1)

Le module de Young est défini à partir de la résistance caractéristique  $f_{ck}$  à 28 jours exprimée en MPa.

**ST1** utilise les formules (voir EN1992-1-1 Tableau 3.1).

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad \text{avec : } f_{cm} \text{ en MPa}$$

$$E_{cm} = km \cdot k_{unité} \cdot 22000 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3} \quad \text{avec : } f_{cm} \text{ en MPa}$$

$$E_j = E_{cm} \cdot \left( \exp \left[ s \left( 1 - \left( \frac{28}{j} \right)^{0.5} \right) \right] \right)^{0.3}$$

avec :

$E_{cm}$	module instantané du béton
$km$	coefficient avancé (par défaut =1)
$k_{unité}$	coefficient calculé par <b>ST1</b> (dépend de l'unité choisie)
	$k_{unité} = 1.$ EC2 MPa (module exprimé en MPa)
	$k_{unité} = 1\ 000/9.81$ EC2 tm2 (module exprimé en t/m <sup>2</sup> )
	$k_{unité} = 1\ 000$ EC2 KNM2 (module exprimé en kN/m <sup>2</sup> )
$f_{ck}$	résistance caractéristique à 28 jours en MPa
$j$	âge du béton en jours
$s$	coefficient dépendant du type de ciment
	$s = 0.20$ ciment de classe R
	CEM42.5 R, CEM52.5 N, et CEM52.5 R
	$s = 0.25$ ciment de classe N
	CEM32.5 R, CEM42.5 N
	$s = 0.38$ ciment de classe S
	CEM32.5 N

**RESISTANCE MOYENNE A J JOUR EN1992-1-1 DANS LE CAS DU TRAITEMENT THERMIQUE**

La résistance moyenne à j jour définie à partir de la résistance moyenne à 28 jours exprimée en MPa.

**ST1** utilise les formules (voir EC2-1-1 §10.3.1.1) :

$$f_{cm}(j) = f_{cmp} + \frac{f_{cm} - f_{cmp}}{\log_{10}(28 - t_p + 1)} \cdot \log_{10}(j - t_p + 1) \quad \text{si} \quad t_p \leq j < 28 \text{ jours}$$

$$f_{cm}(j) = f_{c28} \quad \text{si} \quad j \geq 28 \text{ jours}$$

avec :

$f_{cmp}$       résistance moyenne à la fin de la cure (mise en tension)  
 $t_p$         Age du béton à la fin de cure (mise en tension)

**DEFORMATION DUE AU RETRAIT BHP EN1992-2**

La déformation relative de retrait qui se développe dans un intervalle de temps ( $j_0, j$ ) est donnée par la formule suivante (cf. EN 1992-1-1 et Annexe B2 et EN 1992-2 Annexe B103).

Déformation de retrait total (EN 1992-1-1)

$$\varepsilon_{ret} = \frac{krd \cdot \varepsilon_{cd} + kre \cdot \varepsilon_{ca}}{1 + n\rho_s} \quad (\text{eq. 3.8})$$

et prise en compte des aciers

$krd$	coefficient avancé (par défaut =1)
$kre$	coefficient avancé (par défaut =1)
$\rho_s$	rapport des armatures adhérentes à la section de béton ( $A_s/B$ )
$n$	coefficient d'équivalence Acier/Béton ( $E_s/E_c$ )

Déformation due au retrait endogène (EN 1992-2 Annexe B103)

pour  $j - j_b < 28$  jours

$$\text{si } \frac{f_{cm}(j - j_b)}{f_{ck}} < 0.1 \text{ alors } \varepsilon_{ca}(j - j_b, f_{ck}) = 0$$

$$\text{si } \frac{f_{cm}(j - j_b)}{f_{ck}} \geq 0.1 \text{ alors } \varepsilon_{ca}(j - j_b, f_{ck}) = (f_{ck} - 20) \cdot \left(2.2 \frac{f_{cm}(j - j_b)}{f_{ck}} - 0.2\right) \cdot 10^{-6}$$

$$\text{pour } j - j_b \geq 28 \text{ jours } \varepsilon_{ca}(j - j_b, f_{ck}) = (f_{ck} - 20) \cdot (2.8 - 1.1e^{-(j - j_b)/96}) \cdot 10^{-6}$$

Déformation due au retrait de dessiccation (EN 1992-2 Annexe B103)

$$\varepsilon_{cd}(j, j_b) = K(f_{ck}) \cdot \frac{72e^{-0.046f_{ck}} + 75 - \rho_h}{1 + \beta_{cd} \cdot \frac{h^2}{j - j_0}} \cdot 10^{-6}$$

béton sans fumée de silice :  $\beta_{cd} = 0.021$

béton avec fumée de silice :  $\beta_{cd} = 0.007$

avec :  $K(f_{ck}) = 18$  si  $f_{ck} < 55$  MPa

$K(f_{ck}) = 30 - 0.21f_{ck}$  si  $55 \leq f_{ck}$

avec :

$h$	rayon moyen en mm (2Ac/u)
$\rho_h$	hygrométrie ambiante moyenne en %
$j_b$	date de bétonnage du béton
$j$	date courante
$j - j_b$	âge courant du béton
$j_0$	âge où commence la dessiccation ( $j_0 = j_b$ sauf si étuvage $j_0 > j_b$ )
$j - j_0$	durée de dessiccation du béton

**DEFORMATION DUE AU RETRAIT DANS LE CAS DE TRAITEMENT THERMIQUE**

La déformation relative de retrait est modifiée avec les formules suivantes:

Retrait de dessiccation  $\varepsilon_{cd}$

$j_p$  Age du béton à la fin de cure (mise en tension)

Retrait endogène  $\varepsilon_{ca}$   $\varepsilon_{ca}(j) = 0$

**FLUAGE BHP EN1992-2**

Le calcul des déformations différées dues au fluage est effectué selon la méthode incrémentale (cf. p336).

Déformation de fluage différé total

$$\varepsilon_{flu} = \frac{kfe \cdot \varepsilon_{ccb} + kfd \cdot \varepsilon_{ccd}}{1 + n \rho_s}$$

$kfe, kfd$  coefficients avancés (par défaut =1)

$\rho_s$  rapport des armatures adhérentes à la section de béton ( $A_s/B$ )

$n$  coefficient d'équivalence Acier/Béton ( $E_s/E_c$ )

Déformation conventionnelle instantanée à la date  $j_0$

$$\varepsilon_{ic}(j_0) = \frac{\sigma_c(j_0 - j_b)}{E_c}$$

$\varepsilon_{ic}$  déformation conventionnelle instantanée du béton

$E_c$  module tangent instantané du béton ( $E_c = 1.05 E_{cm}$ ) § 3.1.4(2)

$\sigma_c$  contrainte de compression constante appliquée à la date  $j_0$  de mise en charge du béton

Déformation conventionnelle différée par fluage propre

$$\varepsilon_{ccb}(j_0) = \phi_b(j - j_0) \cdot \frac{\sigma_c(j_0 - j_b)}{E_c}$$

$$\phi_b(j - j_0) = \phi_{b0}(j - j_0) \cdot f(j - j_0)$$

$\phi_{b0}$  coefficient de fluage du béton à la date  $j$  pour un bétonnage à la date  $j_b$  pour une mise en charge à l'âge  $j_0$

$f$  loi d'évolution de fluage

$$f(j - j_0) = \frac{\sqrt{j - j_0}}{\sqrt{j - j_0} + \beta_{bc}}$$

béton sans fumée de silice :  $\phi_{b0} = 1.4$   $\beta_{bc} = kfc \cdot 0.40 e^{3.1 f_{cm}(j_0)/f_{ck}}$

béton avec fumée de silice :  $\phi_{b0} = \frac{3.6}{f_{cm}(j_0 - j_b)^{0.37}}$   $\beta_{bc} = kfc \cdot 0.37 e^{2.8 f_{cm}(j_0)/f_{ck}}$

$j - j_0$  durée d'application du chargement exprimé en jours

$f_{cm}(j_0 - j_b)$  résistance moyenne du béton à la date de chargement  $j_0$

$kfc$  coefficient avancé de cinétique de fluage (par défaut =1)

Déformation conventionnelle différée par fluage de dessiccation

$$\varepsilon_{ccd}(j_0) = \phi_d(j - j_0) \cdot \frac{\sigma_c(j_0 - j_b)}{E_c}$$

$$\phi_d(j - j_0) = \phi_{d0} \cdot [\varepsilon_{cd}(j) - \varepsilon_{cd}(j_0)]$$

béton sans fumée de silice :  $\phi_{d0} = 3200$

béton avec fumée de silice :  $\phi_{d0} = 1000$

$\varepsilon_{cd}(j)$  déformation due au retrait de dessiccation

$\phi_{d0}$  coefficient de fluage de dessiccation du béton à la date  $j$  pour un bétonnage à la date  $j_b$  pour une mise en charge à l'âge  $j_0$

**FLUAGE EC2 DANS LE CAS DE TRAITEMENT THERMIQUE**

La déformation relative de fluage est complétée par la formule (EN 1992-1-1 Annexe B) :

$\varphi_{b0}$  est modifié par la formule :

$$j_{0T} = \sum e^{-\frac{4000}{[273+T(\Delta t_i)]-13.65}} \cdot \Delta t_i \quad (\text{voir eq. B10})$$

avec :

$T(\Delta t_i)$  température en degré de la cure entre 0 et 80 degrés

$\Delta t_i$  durée pendant laquelle est appliquée la température T

A noter que,  $j_{0T} = \sum \Delta t_i = j_0$ , lorsque la température est de 20 degrés, c'est à dire lorsqu'il n'y a pas de cure.

### B3.8 - CAS PARTICULIER DU REGLEMENT FIB 2010

#### B3.8.1 - COMPORTEMENT D'UN BETON FIB 2010

Le détail de définition d'un béton FIB 2010 est donné dans le chapitre *MATERIAUX* (cf. commande — MAT p81).

Les notations utilisées dans les formules suivantes correspondent à :

$f_{ck}$	résistance caractéristique à la compression à 28 jours du béton (en MPa)
$\rho_h$	hygrométrie ambiante moyenne en %
$\rho_s$	rapport des armatures adhérentes à la section de béton ( $A_s/B$ )
$h$	rayon moyen de la pièce exprimé en mm ( $2Ac/u$ )
$n$	coefficient d'équivalence Acier/Béton ( $E_s/E_c$ )

Les classes de résistance sont caractérisées comme suit :

S	classe de résistance CEM 32,5 N (ciments à prise lente)
N	classe de résistance CEM 32,5 R, CEM 42,5 N (ciments normaux)
R	classe de résistance CEM 42,5 R, CEM 52,5 N, CEM 52,5 R (ciments haute résistance à prise rapide)

#### MODULE DE YOUNG FIB 2010

Le module de Young est défini à partir de la résistance caractéristique  $f_{ck}$  à 28 jours exprimée en MPa.

**ST1** utilise les formules

$$f_{cm} = f_{ck} + \Delta f \quad \text{avec : } f_{cm} \text{ en MPa}$$

$$\Delta f = 8 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = km \cdot k_{unité} \cdot 21500 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{1/3} \cdot \alpha_i \quad \text{avec : } f_{cm} \text{ en MPa} \quad (\text{eq 5.1-20 / 5.1.21 / 5.1-23})$$

$$\alpha_i = 1 \text{ (module tangent appliqué)}$$

$$\alpha_i = \min\left(0.8 + 0.2 \frac{f_{cm}}{88}; 1.0\right) \quad (\text{eq 5.1-24}) \text{ non appliqué (module sécant)}$$

$$E_j = E_{cm} \cdot \left(\exp\left[s \left(1 - \left(\frac{28}{j}\right)^{0.5}\right)\right]\right)^{0.5} \quad (\text{eq 5.1-56}) \text{ (eq 5.1-57)}$$

avec :

$E_{cm}$	module instantané du béton
$km$	coefficient avancé (par défaut =1)
$k_{unité}$	coefficient calculé par <b>ST1</b> (dépend de l'unité choisie)
	$k_{unité} = 1.$ EC2 MPa (module exprimé en MPa)
	$k_{unité} = 1\ 000/9.81$ EC2 tm2 (module exprimé en t/m <sup>2</sup> )
	$k_{unité} = 1\ 000$ EC2 KNM2 (module exprimé en kN/m <sup>2</sup> )
$f_{ck}$	résistance caractéristique à 28 jours en MPa
$j$	âge du béton en jours
$s$	coefficient dépendant du type de ciment si $f_{cm} \leq 60\text{MPa}$
	$s = 0.20$ ciment de classe R
	CEM42.5 R, CEM52.5 N, et CEM52.5 R
	$s = 0.25$ ciment de classe N
	CEM32.5 R, CEM42.5 N
	$s = 0.38$ ciment de classe S
	CEM32.5 N
$s$	coefficient indépendant du type de ciment si $f_{cm} > 60\text{MPa}$
	$s = 0.20$ ciment toutes classes

**RESISTANCE MOYENNE A J JOUR FIB 2010 DANS LE CAS DU TRAITEMENT THERMIQUE**

La résistance moyenne à j jour définie à partir de la résistance moyenne à 28 jours exprimée en MPa.

**ST1** utilise les formules :

$$f_{cm}(j) = f_{cmp} + \frac{f_{cm} - f_{cmp}}{\log_{10}(28 - j_p + 1)} \cdot \log_{10}(j - j_p + 1) \quad \text{si } j_p \leq j < 28 \text{ jours}$$

$$f_{cm}(j) = f_{cm} \quad \text{si } j \geq 28 \text{ jours}$$

avec :

$f_{cmp}$  résistance moyenne à la fin de la cure (mise en tension)  
 $j_p$  Age du béton à la fin de cure (mise en tension)

### DEFORMATION DUE AU RETRAIT FIB 2010

La déformation relative de retrait qui se développe dans un intervalle de temps  $(j_0, j)$  est donnée par la formule (voir FIB 2010 (eq. 5.1.77 et suivantes)) :

Retrait total  $\varepsilon_{cs}$

$$\varepsilon_{cs} = \frac{krd \cdot \varepsilon_{ca} + kre \cdot \varepsilon_{ca}}{1 + n \rho_s} \quad (\text{eq. 5.1-75})$$

$kre$  coefficient avancé (par défaut =1)

$krd$  coefficient avancé (par défaut =1)

$\rho_s$  rapport des armatures adhérentes à la section de béton ( $A_s/B$ )

$n$  coefficient d'équivalence Acier/Béton ( $E_s/E_c$ )

Retrait endogène  $\varepsilon_{ca}$

$$\varepsilon_{ca}(j) = \varepsilon_{cas0}(f_{cm}) \cdot \beta_{as}(j) \quad (\text{eq. 5.1-76})$$

$$\varepsilon_{cas0}(f_{cm}) = \alpha_{as} \left( \frac{f_{cm}/f_{cm0}}{6 + f_{cm}/f_{cm0}} \right)^{2.5} \cdot 10^{-6} \quad (\text{eq. 5.1-78})$$

$$\beta_{as}(j) = 1 - \exp(-0.2j^{0.5}) \quad (\text{eq. 5.1-79})$$

avec :

$f_{cm}$  résistance moyenne en compression en MPa

$f_{cm0}$  10 MPa

$j$  âge du béton à l'instant  $t$  considéré en jours

$\alpha_{as}$  coefficient dépendant du type de ciment

$\alpha_{as}=800$  (classe S) ou  $700$  (classe N) ou  $600$  (classe R)

Retrait de dessiccation  $\varepsilon_{cd}$

$$\varepsilon_{cd}(j) = \varepsilon_{cds0}(f_{cm}) \cdot \beta_{ds}(j) \cdot \beta_{RH} \quad (\text{eq. 5.1-77})$$

$$\varepsilon_{cds0} = \left[ (220 + 110\alpha_{ds1}) \cdot \exp\left(-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}\right) \right] \cdot 10^{-6} \quad (\text{eq. 5.1-80})$$

$\alpha_{ds1}$  coefficient dépendant du type de ciment

$\alpha_{ds1}=3$  (classe S) ou  $4$  (classe N) ou  $6$  (classe R)

$\alpha_{ds2}$  coefficient dépendant du type de ciment

$\alpha_{ds2}=0.13$  (classe S) ou  $0.12$  (classe N) ou  $0.12$  (classe R)

$$\beta_{ds}(j) = \left( \frac{j}{j + 0.035 \cdot h^2} \right)^{0.5} \quad (\text{eq. 5.1-82})$$

$$\beta_{RH} = -1.55 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] \text{ si } 40\% \leq RH < 99\% \beta_{s1} \quad (\text{eq. 5.1-81})$$

$$= 0.25 \quad \text{si } RH \geq 99\% \beta_{s1}$$

$$\beta_{s1} = \min \left[ \left( \frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.1} ; 1 \right] \quad (\text{eq. 5.1-83})$$

$h$  rayon moyen de la section transversale en mm (2Ac/u)

$RH$  humidité relative de l'environnement ambiant en %

$RH_0$  100 %

**DEFORMATION DUE AU RETRAIT DANS LE CAS DE TRAITEMENT THERMIQUE**

La déformation relative de retrait est donnée par la formule:

Retrait total  $\varepsilon_{cs}$

$$\varepsilon_{cs} = krd \cdot \varepsilon_{cd} + kre \cdot \varepsilon_{ca}$$

Retrait de dessiccation  $\varepsilon_{cd}$

$$\varepsilon_{cd}(j) = \varepsilon_{cds0}(f_{cm}) \cdot \beta_{ds}(j) \cdot \beta_{RH}$$

$$\beta_{ds}(j) = \frac{j - j_p}{j - j_p + 0.035 \cdot h^2}$$

avec :

$j_p$  Age du béton à la fin de cure (mise en tension)  
Retrait endogène  $\varepsilon_{ca}$

$$\varepsilon_{ca}(j) = 0$$

### FLUAGE FIB 2010

Le calcul des déformations différées dues au fluage est effectué selon la méthode incrémentale (cf. p336).

Déformation de fluage différé total

$$\varepsilon_{flu} = \frac{kfe \cdot \varepsilon_{ccb} + kfd \cdot \varepsilon_{ccd}}{1 + n \rho_s} \quad (\text{eq 5.1-63})$$

$kfe, kfd$  coefficients avancés (par défaut =1)

$\rho_s$  rapport des armatures adhérentes à la section de béton ( $A_s/B$ )

$n$  coefficient d'équivalence Acier/Béton ( $E_s/E_c$ )

Déformation conventionnelle instantanée à la date  $j_0$

$$\varepsilon_{ic}(j_0) = \frac{\sigma_c(j_0 - j_b)}{E_c}$$

$\varepsilon_{ic}$  déformation conventionnelle instantanée du béton

$E_c$  module instantané tangent du béton

$\sigma_c$  contrainte de compression constante appliquée à la date  $j_0$  de mise en charge du béton

Déformation conventionnelle différée par fluage de dessiccation

$$\varepsilon_{ccd}(j_0) = \varphi_{dc}(j - j_0) \cdot \frac{\sigma_c(j_0 - j_b)}{E_c}$$

$$\Rightarrow \varphi_{dc}(j - j_0) = \beta_{dc}(f_{cm}) \cdot \beta_{RH} \cdot \beta_{dc}(j_0) \cdot \beta_{ds}(j - j_0) \quad (\text{eq. 5.1-67})$$

$$\beta_{dc}(f_{cm}) = \frac{412}{(f_{cm})^{1.4}} \quad (\text{eq. 5.1-68})$$

$$\beta_{RH} = \left[ 1 - \left( \frac{RH}{RH_0} \right) \right] \frac{1}{\sqrt[3]{0.1 \cdot \frac{h}{100}}} \quad (\text{eq. 5.1-69})$$

$h$  rayon moyen de la section transversale en mm (2Ac/u)

$RH$  humidité relative de l'environnement ambiant en %

$RH_0$  100 %

$$\beta_{dc}(j_0) = \left( \frac{1}{0.1 + j_{0,adj}^{0.2}} \right) \quad (\text{eq. 5.1-70})$$

$$\beta_{dc}(j - j_0) = \left( \frac{j - j_0}{\beta_h + j - j_0} \right)^{\gamma(j_0)} \quad (\text{eq. 5.1-71a})$$

$$\gamma(j_0) = \frac{1}{2.3 + \frac{3.5}{\sqrt{j_{0,adj}}}} \quad (\text{eq. 5.1-71b})$$

$$\beta_h = 1.5 \cdot h + 250 \cdot \alpha_{fcm} \leq 1500 \cdot \alpha_{fcm} \quad (\text{eq. 5.1-71c})$$

$$\alpha_{fcm} = \left( \frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.5} \quad (\text{eq. 5.1-71d})$$

$$j_{0,adj} = \max \left( 0.5, j_{0T} \cdot \left[ \frac{9}{2 + j_{0T}^{1.2}} + 1 \right]^\alpha \right) \quad (\text{eq. 5.1-73})$$

$\alpha$  coefficient dépendant du type de ciment

$\alpha = -1$  (classe S) ou 0 (classe N) ou 1 (classe R)

Déformation conventionnelle différée par fluage propre

$$\varepsilon_{ccb}(j_0) = \varphi_{bc}(j - j_0) \cdot \frac{\sigma_c(j_0 - j_b)}{E_c}$$

$$\varphi_{bc}(j - j_0) = \varphi_{b0} \cdot \beta_{bc}(j - j_0) \quad (\text{eq 5.1-64})$$

$\varphi_{b0}$  coefficient de fluage du béton à la date  $j$  pour un bétonnage à la date  $j_b$  pour une mise en charge à l'âge  $j_0$

$$\varphi_{b0} = \frac{1.8}{f_{cm}^{0.7}} \quad (\text{eq 5.1-65})$$

$$\beta_{bc} = \ln \left[ kfc \cdot \left( \frac{30}{j_{0,adj}} + 0.035 \right)^2 (j - j_0) + 1 \right] \quad (\text{eq 5.1-66})$$

$j-j_0$  durée d'application du chargement exprimé en jours

$kfc$  coefficient avancé de cinétique de fluage (par défaut =1)

#### FLUAGE FIB 2010 DANS LE CAS DE TRAITEMENT THERMIQUE

Dans le cas de traitement thermique, la déformation relative de fluage est modifiée par la formule:

$$j_{0T} = \sum e^{-\frac{4000}{[273+T(\Delta t_i)]-13.65}} \cdot \Delta t_i \quad (\text{eq 5.1-85})$$

avec :

$T(\Delta t_i)$  température en degré de la cure entre 0 et 80 degrés

$\Delta t_i$  durée pendant laquelle est appliquée la température T

A noter que,  $j_{0T} = \sum \Delta t_i = j_0$ , lorsque la température est de 20 degrés, c'est à dire lorsqu'il n'y a pas de cure.

### B3.9 - CAS PARTICULIER DU MODELE ACI\_B3 (ACI 209.2R-21)

#### B3.9.1 - COMPORTEMENT D'UN BETON B3 (ACI 209.2R-21)

Le détail de définition d'un béton ACI\_B3 est donné dans le chapitre *MATERIAUX* (cf. commande — MAT p87).

Les formules sont issues du standard américain ACI 209.2R-21.

Les notations utilisées dans les formules suivantes correspondent à :

$f_{ck}$	résistance caractéristique à la compression à 28 jours du béton (en MPa)
$RH$	hygrométrie ambiante moyenne en %
$\rho_s$	rapport des armatures adhérentes à la section de béton ( $A_s/B$ )
$h$	rayon moyen de la pièce exprimé en mm ( $2Ac/u$ )
$n$	coefficient d'équivalence Acier/Béton ( $E_s/E_c$ )

#### MODULE DE YOUNG ACI\_B3

Le module de Young est défini à partir de la résistance caractéristique  $f_{ck}$  à 28 jours exprimée en MPa.

**ST1** utilise les formules

$$f_{cm} = f_{ck} + \Delta f \quad \text{avec : } f_{cm} \text{ en MPa}$$

$$\Delta f = 8.3 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = k_m \cdot k_{unite} \cdot \kappa \cdot \sqrt{f_{cm}} \quad (\text{eq A-39})$$

avec :  $f_{cm}$  en MPa et  $\kappa = 4734$  (MPa)

$$E_j = E_{cm} \cdot \left( \frac{j}{4+0.85 \cdot j} \right)^{1/2} \quad (\text{eq A-34})$$

avec :

$E_{cm}$  module instantané du béton à 28 jours

$k_m$  coefficient avancé (par défaut =1)

$k_{unite}$  coefficient calculé par **ST1** (dépend de l'unité choisie)

$k_{unite} = 1.$  EC2 MPa (module exprimé en MPa)

$k_{unite} = 1\ 000/9.81$  EC2 tm2 (module exprimé en t/m<sup>2</sup>)

$k_{unite} = 1\ 000$  EC2 KNM2 (module exprimé en kN/m<sup>2</sup>)

$f_{ck}$  résistance caractéristique à 28 jours en MPa

$j$  âge du béton en jours

### DEFORMATION DUE AU RETRAIT B3

La déformation relative de retrait qui se développe dans un intervalle de temps ( $j_0, j$ ) est donnée par la formule :

Retrait total  $\varepsilon_{CS}$

$$\varepsilon_{CS} = \frac{k_{rd} \cdot \varepsilon_{cd}}{1 + n \rho_s}$$

- $k_{rd}$  coefficient avancé (par défaut = 1)  
 $\rho_s$  rapport des armatures adhérentes à la section de béton ( $A_s/B$ )  
 $n$  coefficient d'équivalence Acier/Béton ( $E_s/E_c$ )

Retrait de dessiccation  $\varepsilon_{cd}$

$$\varepsilon_{cd}(j) = \varepsilon_{sh\infty} \cdot k_h \cdot S(j - j_c) \quad (\text{eq A-31})$$

$\varepsilon_{sh\infty}$  déformation finale du retrait (valeur asymptotique)

$$\varepsilon_{sh\infty} = \varepsilon_{s\infty} \cdot \frac{E_{cm}(j_{eq})}{E_{cm}(j_c + \tau_{sh})} \quad (\text{eq A-32})$$

Avec  $j_{eq} = 607$  jours

$\tau_{sh}$  paramètre de retrait

$$\tau_{sh} = k_t \cdot (k_s \cdot h)^2 \quad (\text{eq A-36})$$

$k_t$  coefficient dépendant de la date de fin de cure

$$k_t = 8.5 \times 10^{-2} \cdot j_c^{-0.08} \cdot f_{cm}^{-0.25} \text{ (jours/m}^2\text{)}$$

$k_s$  coefficient dépendant de la forme de la section (tab A-9)

$$k_s = \begin{cases} 1.00 & \text{pour une dalle infinie} \\ 1.15 & \text{pour un cylindre infini} \\ 1.25 & \text{pour un prisme infini} \\ 1.30 & \text{pour une sphère} \\ 1.55 & \text{pour un cube} \end{cases}$$

$\varepsilon_{s\infty}$  coefficient dépendant du type de ciment, du mode de cure du béton et de la quantité d'eau libre utilisée :

$$\varepsilon_{s\infty} = \alpha_1 \cdot k_c \cdot (1.9 \cdot 10^{-2} \cdot w^{2.1} \cdot f_{cm}^{-0.28} + 270) \cdot 10^{-6} \quad (\text{eq A-33})$$

$$\alpha_1 = \begin{cases} 1.00 & \text{ciment de type I} \\ 0.85 & \text{ciment de type II} \\ 1.10 & \text{ciment de type III} \end{cases} \quad (\text{tab A-7})$$

$$k_c = \begin{cases} 0.75 & \text{cure par évaporation} \\ 1.20 & \text{cure protégée de la dessiccation} \\ 1.00 & \text{béton immergé (HR = 100\%)} \end{cases} \quad (\text{tab A-8})$$

$k_h$  coefficient dépendant de l'humidité relative ambiante (tab A-6)

$$k_h = \begin{cases} 1 - \left(\frac{RH}{RH0}\right)^3 & \text{si } RH/RH0 \leq 0.98 \\ \left[-12.9404 \cdot \left(\frac{RH}{RH0}\right) + 12.7404\right] & \text{si } 0.98 \leq RH/RH0 \leq 1.0 \\ -0.2 & \text{si } RH/RH0 = 1.0 \end{cases}$$

$$S(j, j_c) = \tanh\left(\sqrt{\frac{j - j_c}{\tau_{sh}}}\right) \quad (\text{eq A-35})$$

$j_c$  âge du béton à la fin de la cure (jours)

$w$  quantité d'eau libre dans le béton en  $\text{kg/m}^3$  ( $0.35 \leq w/c \leq 0.85$ )  
tel que  $160 \text{ kg/m}^3 \leq c \leq 720 \text{ kg/m}^3$

$h$  rayon moyen de la section transversale en mm (2Ac/u)

$RH$  humidité relative de l'environnement ambiant en %

$RH0$  100 %

**FLUAGE B3**

Le calcul des déformations différées dues au fluage est effectué selon la méthode incrémentale (cf. p336).

Déformation de fluage différé total

$$\varepsilon_{flu} = \frac{kfe \cdot \varepsilon_{ccb} + kfd \cdot \varepsilon_{ccd}}{1 + n \rho_s}$$

$kfe, kfd$  coefficients avancés (par défaut = 1)

$\rho_s$  rapport des armatures adhérentes à la section de béton ( $A_s/B$ )

$n$  coefficient d'équivalence Acier/Béton ( $E_s/E_c$ )

Déformation conventionnelle instantanée à la date  $j_0$

$$\varepsilon_{ic}(j_0) = \sigma_c(j_0 - j_b) \cdot (q_1 + C_0(j_{0.01}, j_0)) \underset{j-j_0 \rightarrow 0.01 \text{ jours}}{\approx} \sigma_c(j_0 - j_b) \cdot (q_1 + \Delta_{0.01})$$

$$\text{Avec } q_1 = \frac{0.6}{E_{cm}} \quad (\text{eq A-38})$$

$$\text{Et } \Delta_{0.01} = \left( q_3 + \frac{q_2}{\sqrt{j_0}} \right) \cdot \ln(1 + 0.01^{0.1})$$

$\varepsilon_{ic}$  déformation conventionnelle instantanée du béton

$E_{cm}$  module d'élasticité du béton à 28 jours

$C_0$  complaisance de fluage propre lorsque  $j-j_0 \leq 0.01$  jours

$\sigma_c$  contrainte de compression constante appliquée à la date  $j_0$  de mise en charge du béton

$j_{0.01}-j_0$  durée de de chargement égale à 0,01 jours pour laquelle la complaisance instantanée est assimilée à la souplesse instantanée

Déformation conventionnelle différée par fluage de dessiccation

$$\varepsilon_{ccd}(j_0) = C_d(j, j_0, j_c) \cdot \sigma_c(j_0 - j_c) \quad (\text{eq A-37})$$

$$C_d(j, j_0, j_c) = q_5 \cdot [e^{-8 \cdot H(j)} - e^{-8 \cdot H(j_0)}]^{1/2} \quad (\text{eq A-48})$$

$$q_5 = 0.757 f_{cm}^{-1} \cdot |\varepsilon_{sh\infty}|^{-0.6} \quad (\text{eq A-49})$$

$$H(j) = 1 - S(j, j_c) \cdot \left( 1 - \frac{RH}{RH_0} \right) \quad (\text{eq A-50})$$

$$S(j, j_c) = \tanh \left( \sqrt{\frac{j-j_c}{\tau_{sh}}} \right) \quad (\text{eq A-35})$$

$h$  rayon moyen de la section transversale en mm ( $2Ac/u$ )

$\varepsilon_{sh\infty}$  coefficient dépendant du type de ciment, du mode de cure du béton et de la quantité d'eau libre utilisée (voir paragraphe sur le retrait ACI\_B3)

$RH$  humidité relative de l'environnement ambiant en %

$RH_0$  100 %

$\sigma_c$  contrainte de compression constante appliquée à la date  $j_0$  de mise en charge du béton

Déformation conventionnelle différée par fluage propre

$$\varepsilon_{ccb}(j) = C_0(j, j_0) \cdot \sigma(j_0) \quad (\text{eq A-37})$$

$C_0(j, j_0)$  complaisance de fluage du béton à la date  $j$  pour un bétonnage à la date  $j_b$  pour une mise en charge à l'âge  $j_0$

$$C_0(j, j_0) = q_2 \cdot Q(j, j_0) + q_3 \cdot \ln[1 + (j - j_0)^{0.1}] + q_4 \cdot \ln \left( \frac{j}{j_0} \right) - \Delta_{0.01} \quad (\text{eq A-40})$$

$$q_2 = 185.4 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{c} \cdot f_{cm}^{-0.9} \quad (\text{eq A-41})$$

$$q_3 = 0.29 \cdot \left( \frac{w}{c} \right)^4 \cdot q_2 \quad (\text{eq A-46})$$

$$q_4 = 20.3 \cdot 10^{-6} \cdot \left( \frac{a}{c} \right)^{-0.7} \quad (\text{eq A-47})$$

$$Q(j, j_0) = Q_f(j_0) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{Q_f(j_0)}{Z(j, j_0)} \right)^{r(j_0)} \right]^{\frac{-1}{r(j_0)}} \quad (\text{eq A-42})$$

Avec :

$$Q_f(j_0) = \left[ 0.086 \cdot (j_0)^{\frac{2}{9}} + 1.21 \cdot (j_0)^{\frac{4}{9}} \right]^{-1} \quad (\text{eq A-43})$$

$$Z(j, j_0) = j_0^{-0.5} \cdot \ln[1 + (j - j_0)^{0.1}] \quad (\text{eq A-44})$$

$$r(j_0) = 1.7 \cdot j_0^{0.12} + 8 \quad (\text{eq A-45})$$

$j_0$	date de chargement (en jours)
$j - j_0$	durée d'application du chargement exprimé en jours
$w$	quantité d'eau libre dans le béton en $\text{kg/m}^3$ ( $0.35 \leq w/c \leq 0.85$ )
$c$	quantité de ciment dans le béton en $\text{kg/m}^3$ ( $160 \text{ kg/m}^3 \leq c \leq 720 \text{ kg/m}^3$ )
$ag$	quantité d'agréats dans le béton en $\text{kg/m}^3$ ( $2.5 \leq ag/c \leq 13.5$ )

## B4 - DYNAMIQUE

Les méthodes et principes de calculs appliqués (calculs de modes propres, calculs spectraux, analyse temporelle) sont issus des ouvrages suivants. Pour l'analyse temporelle, la méthode incrémentale est utilisée.

### Bibliographie:

Une présentation de la méthode des éléments finis- Gour Dhatt-Gilbert Touzot –Les presses de l'université Laval, Qc, 1981

Dynamics of structures, 2<sup>nd</sup> édition, Ray Clough, J Penzien, 1993

CIV 6508 - Analyse Dynamique des structures- Ecole Polytechnique de Montréal-P Léger, 1994

Elements de Génie parasismique et de calcul dynamique des structures, Ecole Polytechnique de Montréal, A Filiatrault –1996

Dynamique des structures, application aux ouvrages de génie civil, P. Paultre, Lavoisier, 2005

### B4.1 - RESOLUTION DU PROBLEME DE VALEURS PROPRES

#### Définition du problème de valeurs propres

$$[K][\phi] = [M][\phi][\omega^2]$$

$[K]$  Matrice rigidité (n,n)

$[M]$  Matrice masse (n,n)

$[\phi]$  Matrice de n vecteurs propres de dimension n

$[\omega^2]$  Matrice diagonale des pulsations propres

#### Rappel sur les méthodes de résolution:

Méthode Itération inverse

Méthode Rayleigh Ritz dite Itération par sous espace

#### Vérification de la séquence de Sturm:

Pour une pulsation du mode i, on décompose la matrice sous la forme

$$([K] - \beta \omega_i^2 [M])^{-1} = [L]^T [D] [L] \text{ et } \beta = 1.001$$

Le nombre de termes diagonaux de D négatif donne le nombre de mode sous la pulsation du mode i.

#### Erreur sur les modes propres:

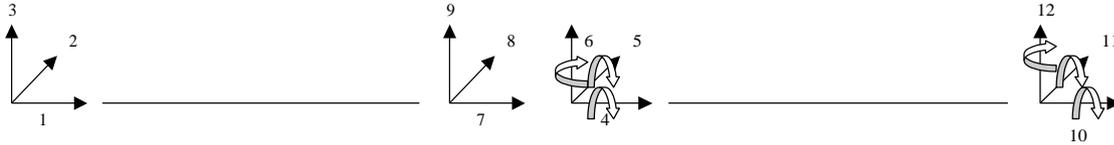
$$\| [K] \vec{\phi}_i - \omega_i^2 [M] \vec{\phi}_i \| < \varepsilon \cdot \| [K] \vec{\phi}_i \|$$

**B4.2 - FORMULATION DE LA MASSE MODALE PAR BARRE**

La matrice de masse consistante d'une barre s'écrit :

$$m_{i,j} = \int_0^l m(x)\psi_i(x)\psi_j(x)dx$$

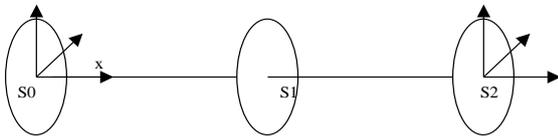
Les fonctions de formes associées aux déformations des 6 degrés de liberté aux 2 extrémités d'une barre sont :



$\psi_1(x) = 1 - \left(\frac{x}{l}\right)$	$\psi_7(x) = \left(\frac{x}{l}\right)$
$\psi_2(x) = 1 - 3\left(\frac{x}{l}\right)^2 + 2\left(\frac{x}{l}\right)^3$	$\psi_8(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^2 \left(3 - 2\frac{x}{l}\right)$
$\psi_3(x) = 1 - 3\left(\frac{x}{l}\right)^2 + 2\left(\frac{x}{l}\right)^3$	$\psi_9(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^2 \left(3 - 2\frac{x}{l}\right)$
$\psi_4(x) = 1 - \left(\frac{x}{l}\right)$	$\psi_{10}(x) = \left(\frac{x}{l}\right)$
$\psi_5(x) = \frac{x}{l} \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2$	$\psi_{11}(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^2 \left(\frac{x}{l} - 1\right)$
$\psi_6(x) = \frac{x}{l} \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2$	$\psi_{12}(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^2 \left(\frac{x}{l} - 1\right)$

Par ailleurs, la masse linéique d'une barre s'écrit sous la forme:

$$m(x) = \rho S(x)$$



$$S(x) = 2(S_0 + S_2 - 2S_1) \left(\frac{x}{L}\right)^2 + (4S_1 - S_2 - 3S_0) \left(\frac{x}{L}\right) + S_0$$

Pour la torsion, on a :

$m(x) = \rho I(x)$ , I est l'inertie polaire

$$I(x) = 2(I_0 + I_2 - 2I_1) \left(\frac{x}{L}\right)^2 + (4I_1 - I_2 - 3I_0) \left(\frac{x}{L}\right) + I_0$$

### B4.3 - MATRICE D'AMORTISSEMENT

#### Matrice d'amortissement de Rayleigh

La matrice d'amortissement de Rayleigh s'écrit :

$$C = \alpha[M] + \beta[K]$$

et le coefficient d'amortissement du mode propre  $j$  s'écrit:

$$\xi_j = \frac{\Phi_j^T [C] \Phi_j}{2\omega_j \Phi_j^T [M] \Phi_j} = \frac{\alpha}{2\omega_j} + \frac{\beta\omega_j}{2}$$

#### Combinaison spectrale CQC :

La combinaison spectrale CQC de la variable  $X$  s'écrit (Voir Filiatrault –Eléments de génie Parasismique) :

$$X_{CQC} = \sqrt{\sum_j \sum_k X_j \rho_{j,k} X_k}$$

$$\rho_{j,k} = \frac{8\sqrt{\zeta_j \zeta_k} (\zeta_j + r\zeta_k) r^{3/2}}{(1-r^2)^2 + 4\zeta_j \zeta_k r(1+r^2) + 4(\zeta_j^2 + \zeta_k^2) r^2}$$

$$r = \frac{\omega_k}{\omega_j}$$

#### Matrice d'amortissement modale

Soit  $n_c$  le nombre de modes propres calculés.

Soit  $\omega_c$  la pulsation de coupure (i.e. qui correspond à la fréquence la plus élevée calculée)

La matrice d'amortissement modal s'écrit :

- Cas d'un seul amortissement (voir Clough and Penzien p242):

$$[C] = [M] \left[ \sum_{n=1}^{n_c-1} \frac{2\tilde{\xi}_n \omega_n}{M_n} \vec{\Phi}_n \cdot \vec{\Phi}_n^t \right] [M] + 2 \frac{\xi_c}{\omega_c} [K]$$

$$\tilde{\xi}_n = \xi_n + \xi_c \left( \frac{\omega_n}{\omega_c} \right)$$

### Calcul des coefficients d'amortissement à partir de l'énergie de déformation

Soit  $E_d$  l'énergie de déformation induite dans le mode  $j$  pour toute la structure. La structure est composée de membrures reliant des noeuds 1 et 2.

Soit  $X_j$  le vecteur déplacement spectral du mode  $j$

Soit  $F_j$  la vecteur force élastique spectrale du mode  $j$

$$E_{dj} = \frac{1}{2} \sum \left( \overrightarrow{F^2}_j \cdot \overrightarrow{X^2}_j - \overrightarrow{F^1}_j \cdot \overrightarrow{X^1}_j \right) = \frac{1}{2} \sum_{i=i_0, \dots, i_n} \left( f^2_{i,j} \cdot d^2_{i,j} - f^1_{i,j} \cdot d^1_{i,j} \right)$$

Soit  $E_{dj}^k$  l'énergie de déformation induite dans le mode  $j$  pour la sous structure "k"

$$E_{dj}^k = \frac{1}{2} \sum_k \left( \overrightarrow{F^2}_j \cdot \overrightarrow{X^2}_j - \overrightarrow{F^1}_j \cdot \overrightarrow{X^1}_j \right) = \frac{1}{2} \sum_{i=k} \left( f^2_{i,j} \cdot d^2_{i,j} - f^1_{i,j} \cdot d^1_{i,j} \right)$$

L'amortissement énergétique modal équivalent du mode  $j$  s'écrit alors:

$$\tilde{\xi}_{eff,j} = \frac{\sum_k \xi_k \cdot E_{dj}^k}{E_{dj}}$$

### B4.4 – ELEMENTS SPECIAUX

La méthode de résolution incrémentale pour une analyse non linéaire est décrite dans l'ouvrage de Paultre en référence.

#### Rappel des caractéristiques mécaniques linéaires élastiques de la barre en statique

Terme de rigidité KR/souplesse S d'une barre

$$\text{Plan}\{\overrightarrow{KR}\} = \begin{Bmatrix} E.A/L \\ G.AS.L \\ E.I.\delta/L \end{Bmatrix} \{\overrightarrow{S}\} = \begin{Bmatrix} S1 \\ S2 \\ S3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} L/(E.A) \\ 1/(G.AS.L) \\ L/(E.I.\delta) \end{Bmatrix} \quad \text{et} \quad \delta = 3$$

$$\text{Spatial}\{\overrightarrow{KR}\} = \begin{Bmatrix} E.A/L \\ G.ASy.L \\ G.ASz.L \\ E.Ix/L \\ E.Iy.\delta/L \\ E.Iz.\delta/L \end{Bmatrix} \{\overrightarrow{S}\} = \begin{Bmatrix} S1 \\ S2 \\ S3 \\ S4 \\ S5 \\ S6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} L/(E.A) \\ 1/(G.ASy.L) \\ 1/(G.ASz.L) \\ L/(E.Ix) \\ L/(E.Iy.\delta) \\ L/(E.Iz.\delta) \end{Bmatrix}$$

Matrices de rigidité/souplesse d'une barre pour les moments (début (1) et fin(2) de barre) par rapport aux rotations relatives aux barres

$$\begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ b & a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{Bmatrix} \quad \text{ou} \quad \begin{Bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \beta & \alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{Bmatrix}$$

Rotations relatives en début et fin de barre en fonction des rotations totales aux nœuds et de la rotation globale de la barre

$$\begin{Bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \omega_{1tot} \\ \omega_{2tot} \end{Bmatrix} - \Omega_{21} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad \text{et} \quad \Omega_{21} = (U_2 - U_1)/L$$

En statique, on a :

En PLAN

$$\begin{Bmatrix} \alpha_z \\ \beta_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S3 + S2 \\ -S3.\gamma + S2 \end{Bmatrix} \quad \text{et} \quad \gamma = 1/2$$

S2 souplesse tranchant et S3 souplesse flexion donc

$$\begin{Bmatrix} S2 \\ S3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \alpha.\gamma + \beta \\ 1 + \gamma \\ \alpha - \beta \\ 1 + \gamma \end{Bmatrix}$$

De même en SPATIAL

$$\begin{Bmatrix} \alpha_y \\ \beta_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S5 + S3 \\ -S5.\gamma + S3 \end{Bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{Bmatrix} \alpha_z \\ \beta_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S6 + S2 \\ -S6.\gamma + S2 \end{Bmatrix} \quad \text{donc} \quad \begin{Bmatrix} S3 \\ S5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \alpha_y.\gamma + \beta_y \\ 1 + \gamma \\ \alpha_y - \beta_y \\ 1 + \gamma \end{Bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{Bmatrix} S2 \\ S6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \alpha_z.\gamma + \beta_z \\ 1 + \gamma \\ \alpha_z - \beta_z \\ 1 + \gamma \end{Bmatrix}$$

**Prise en compte de l'effort normal limite**

Soit  $\overrightarrow{N_p}$  l'effort normal limite

Comme

$$\overrightarrow{N} = [S1]\{\overrightarrow{\delta U_1}\}$$

On a :

$$\{\overrightarrow{\delta U_{1p}}\} = [1/S1]\overrightarrow{N_p}$$

**Prise en compte de l'effort de torsion limite**

Soit  $\overrightarrow{T_{xp}}$  l'effort de torsion limite

Comme

$$\overrightarrow{T_x} = [S4]\{\overrightarrow{\delta U_4}\}$$

On a :

$$\{\overrightarrow{\delta U_{4p}}\} = [1/S4]\overrightarrow{T_{xp}}$$

**Prise en compte du moment limite**

Soit  $\begin{Bmatrix} \overrightarrow{M^y_1} \\ \overrightarrow{M^y_2} \end{Bmatrix}$  les moments limites

Si une extrémité de la barre atteint la limite élastique, calcul du moment associé à la déformation courante

$$\begin{Bmatrix} \overrightarrow{M^{lum}_1} \\ \overrightarrow{M^{lum}_2} \end{Bmatrix} = \min \left[ \begin{Bmatrix} \overrightarrow{M_1} \\ \overrightarrow{M_2} \end{Bmatrix}; \begin{Bmatrix} \overrightarrow{M^y_1} \\ \overrightarrow{M^y_2} \end{Bmatrix} \right] = \begin{bmatrix} a & b \\ b & a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overrightarrow{\omega_1} \\ \overrightarrow{\omega_2} \end{Bmatrix}$$

Déformation à la 1ere limite élastique

$$\begin{Bmatrix} \overrightarrow{\omega^e_1} \\ \overrightarrow{\omega^e_2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \beta & \alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overrightarrow{M^{lum}_1} \\ \overrightarrow{M^{lum}_2} \end{Bmatrix} \text{ et } \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \beta & \alpha \end{bmatrix} = \text{Inv} \begin{bmatrix} a & b \\ b & a \end{bmatrix}$$

**Calcul des termes de la matrice de rigidité sécante KS**

$$\begin{Bmatrix} \overrightarrow{M^{lum}_1} \\ \overrightarrow{M^{lum}_2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{a} & \tilde{b} \\ \tilde{b} & \tilde{a} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overrightarrow{\omega_1} \\ \overrightarrow{\omega_2} \end{Bmatrix} \text{ Donc } \begin{Bmatrix} \overrightarrow{M^{lum}_1} \\ \overrightarrow{M^{lum}_2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1 & \omega_2 \\ \omega_2 & \omega_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{a} \\ \tilde{b} \end{Bmatrix}$$

Donc

$$\begin{Bmatrix} \tilde{a} \\ \tilde{b} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\omega_1 M^{lum}_1 - \omega_2 M^{lum}_2}{\omega^2_1 - \omega^2_2} \\ \frac{\omega_1 M^{lum}_2 - \omega_2 M^{lum}_1}{\omega^2_1 - \omega^2_2} \end{Bmatrix}$$

Matrice de souplesse sécante SS

$$\begin{Bmatrix} \overrightarrow{\omega_1} \\ \overrightarrow{\omega_2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_0 & \beta_0 \\ \beta_0 & \alpha_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overrightarrow{M^{lum}_1} \\ \overrightarrow{M^{lum}_2} \end{Bmatrix} \text{ et } \begin{bmatrix} \alpha_0 & \beta_0 \\ \beta_0 & \alpha_0 \end{bmatrix} = \text{Inv} \begin{bmatrix} \tilde{a} & \tilde{b} \\ \tilde{b} & \tilde{a} \end{bmatrix}$$

Calcul des termes de souplesses mécanique S0 de rigidité sécante?

$$\begin{Bmatrix} \overrightarrow{S02} \\ \overrightarrow{S03} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \overrightarrow{\alpha 0 \cdot \gamma + \beta 0} \\ \frac{1 + \gamma}{\alpha 0 - \beta 0} \\ \frac{1 + \gamma}{1 + \gamma} \end{Bmatrix}$$

Calcul des termes de la matrice de rigidité tangente KT

$$\begin{Bmatrix} \overrightarrow{M_1} \\ \overrightarrow{M_2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \overrightarrow{M^l_1} \\ \overrightarrow{M^l_2} \end{Bmatrix} + [\delta KT] \begin{Bmatrix} \overrightarrow{\delta \omega_1} \\ \overrightarrow{\delta \omega_2} \end{Bmatrix} \text{ et } \begin{Bmatrix} \overrightarrow{\delta \omega_1} \\ \overrightarrow{\delta \omega_2} \end{Bmatrix} = \max \left[ 0; \begin{Bmatrix} \overrightarrow{\omega_1} \\ \overrightarrow{\omega_2} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \overrightarrow{\omega_{y1}} \\ \overrightarrow{\omega_{y2}} \end{Bmatrix} \right] \text{ et } \begin{Bmatrix} \overrightarrow{M^l_1} \\ \overrightarrow{M^l_2} \end{Bmatrix} = \min \left[ \begin{Bmatrix} \overrightarrow{M_1} \\ \overrightarrow{M_2} \end{Bmatrix}; \begin{Bmatrix} \overrightarrow{M^y_1} \\ \overrightarrow{M^y_2} \end{Bmatrix} \right]$$

$$\text{Soit } \begin{Bmatrix} \overrightarrow{M^{\delta}_1} \\ \overrightarrow{M^{\delta}_2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \overrightarrow{M_1} \\ \overrightarrow{M_2} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \overrightarrow{M^l_1} \\ \overrightarrow{M^l_2} \end{Bmatrix}$$

Donc

$$\begin{Bmatrix} \overrightarrow{M^{\delta}_1} \\ \overrightarrow{M^{\delta}_2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} KT1 & KT2 \\ KT2 & KT1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overrightarrow{\delta \omega_1} \\ \overrightarrow{\delta \omega_2} \end{Bmatrix}$$

Finalement

$$\begin{Bmatrix} \overrightarrow{KT1} \\ \overrightarrow{KT2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \omega_1 & \delta \omega_2 \\ \delta \omega_2 & \delta \omega_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overrightarrow{M^{\delta}_1} \\ \overrightarrow{M^{\delta}_2} \end{Bmatrix}$$

**Prise en compte du tranchant plastique**

En PLAN :

$$Vy = (M_z^1 + M_z^2)/L$$

$$\text{Si } Vy \geq Fy, Fy = (M_1^{limV} + M_2^{limV})/L$$

Donc les efforts M de flexion aux extrémités de la barre sont contraints de suivre la règle suivante :

$$M_1^{limV} + M_2^{limV} = Fy \cdot L$$

Par ailleurs

$$\begin{Bmatrix} \overline{\omega_1} \\ \overline{\omega_2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_0 & \beta_0 \\ \beta_0 & \alpha_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overline{M^{limV}_1} \\ \overline{M^{limV}_2} \end{Bmatrix}$$

Donc

$$\alpha_0 + \beta_0 = \frac{\omega_1 + \omega_2}{M^{limV}_1 + M^{limV}_2}$$

Et comme

$$\alpha_0 + \beta_0 = (S03 + S02) + (-S03 \cdot \gamma + S02)$$

Donc comme le terme de souplesse en flexion S03 ne peut être modifié (il contrôle la flexion pure), le terme de souplesse S02 au tranchant est modifié comme suit :

$$S02 = \frac{1}{2} \left[ \frac{\omega_1 + \omega_2}{M^{limV}_1 + M^{limV}_2} - S03 \cdot (1 - \gamma) \right]$$

En SPATIALE, on applique la même méthode pour calculer les termes de souplesses

$$Vy = (M_z^1 + M_z^2)/L$$

$$Vz = (M_y^1 + M_y^2)/L$$

## B5 – CALCUL AU FEU

### GENERALITES

Les méthodes et principes de calculs appliqués sont issus des ouvrages suivants :

- EN 1992-1-2 et son annexe nationale.
- Guide CETU : Comportement au feu des tunnels routiers-Mars 2005-ISBN 2-11-084750-6
- Guide CETU : Compléments au guide –Comportement au feu des tunnels routiers-Mars 2011
- Guide Cerema : Résistance à l'incendie des ponts routiers-Juin 2018-ISSN 2276-0164

Les étapes de calcul sont les suivantes :

1. Définition de la géométrie : des nœuds, des appuis, des barres
2. Définition des matériaux (paramètres « feu »)
3. Définition des expositions au feu des parois de sections (type CN, HCM, T°, adiabatique, etc).
4. Définition des sections transversales liées à un matériau et à des expositions au feu
5. Définition d'un type d'acier passif
6. Définition d'un type d'armature lié à un type d'acier passif
7. Définition des caractéristiques par affectation des sections et de types d'armatures définis
8. Définition d'un chargement statique combinée (non thermique)
9. Définition du feu (paramètres : durée, maille)
10. Définition d'un chargement d'incendie (choix du feu et du chargement statique)
11. Exécution du chargement incendie
  - 1- Calcul de l'effet de la charge combinée à froid dans chaque section (stockage en BD)
  - 2- Construction du maillage des sections, calcul des caractéristiques à froid (stockage en BD) et calcul de la répartition des températures dans chaque section sous l'effet du feu (stockage en BD)
  - 3- Calcul itératif avec une méthode de type Newton-Raphson
    - ⇒ Récupération des déformations thermiques  $\epsilon_{tj}$  à chaque section  $i$  et fibre  $j$
    - ⇒ Récupération des caractéristiques  $E_{Li}$ ,  $E_{Si}$  sécantes et/ou tangentes
    - ⇒ Récupération des efforts de charges dans les barres, sollicitations :  $N_i$ ,  $M_i$
    - ⇒ Calculs sur chaque fibre  $j$  de section des courbures ( $\gamma_i = \gamma_{ti} + M_i/E_{Li}$ ) et des déformations ( $\epsilon_{ij} = \epsilon_{tj} + N_i/E_{Si} + \gamma_i \cdot Y_j$ )
    - ⇒ Calcul des contraintes  $\sigma_{ij}$  à chaque fibre  $j$  à partir des lois moments courbures (fonction de la température)
    - ⇒ ReCalcul des efforts par intégration  $N_{fi} = \text{Somme}(\sigma_{ij} S_j)$ ,  $M_{fi} = \text{Somme}(\sigma_{ij} S_j Y_j)$
    - ⇒ ReCalcul des rigidités par intégration  $E_{Si} = \text{Somme}(E_j S_j)$  et  $E_{Li} = \text{Somme}(E_j I_j)$
    - ⇒ Calcul des nouvelles déformations thermiques  $\epsilon_{tj}$
    - ⇒ Vérification des rotations des rotules plastiques.
    - ⇒ Mise à jour des caractéristiques mécaniques

- ⇒ Application du chargement de déformations thermiques
- ⇒ Exécution du chargement thermique et calcul des effets dans chaque barre
- ⇒ Vérification de la convergence (déformations, rigidités, équilibre).
- ⇒ Si convergence, stockage en BD
- ⇒ Si convergence sortie, sinon rebouclage

#### 4- Stockage des sollicitations en BD

### MODELISATION 3D

La méthode utilisée est une extension de la « méthode par zone », ainsi que décrite dans l'annexe B, section 2 de EN 1992-1-2, où elle y est décrite comme plus précise que la méthode de l'isotherme à 500°C.

#### 1 Méthode du développement et de la distribution de la température dans les éléments structuraux

L'évolution de la température  $T(y, z, t)$  dans la section de béton est régie par une équation de diffusion, la difficulté étant que la densité,  $\rho(T)$  capacité calorifique  $c_p(T)$  et la conductivité thermique  $\lambda(T)$  du béton dépendent de la température :

$$\rho(T)c_p(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda(T)\text{grad}(T)) \quad (1)$$

Cette équation est résolue par un algorithme explicite d'itération en temps. Le temps est donc discrétisé, et la température au temps  $t_{k+1}$  s'écrit directement en fonction de la température au temps  $t_k$  :

$$T(t_{k+1}) = T(t_k) + \frac{t_{k+1}-t_k}{\rho(T(t_k))c_p(T(t_k))} \text{div}(\lambda(T(t_k))\text{grad}(T(t_k))) \quad (2)$$

La durée du pas de temps  $t_{k+1} - t_k$  est choisie en fonction de la taille des mailles, afin de satisfaire la condition de Courant-Friedrichs-Lewy. La section est discrétisée en un nombre fini de fibres  $i \in 1..n$  formant un diagramme de Voronoï, les germes étant placés au hasard pour une section quelconque. L'application qvoronoi de la librairie Qhull [3,4] est utilisé pour calculer les segments délimitant les fibres à partir des germes. L'évolution de la température  $T_i(t_k)$  de la fibre est donc maintenant lié aux flux passant au travers des segments délimitant cette fibre :

$$T(t_{k+1}) = T(t_k) + \frac{t_{k+1}-t_k}{\rho(T(t_k))c_p(T(t_k))A_i} \sum_j F_{i,j}(t_k) \quad (3)$$

Où  $A_i$  est l'aire de la fibre  $i$  et  $F_{i,j}(t_k)$  et le flux entrant dans la cellule  $i$  depuis la facette  $j$  délimitant cette cellule. Pour le calcul de ce flux, il y a deux cas de figure. Si cette facette délimite la limite entre la fibre  $i$  et la fibre  $j$ , alors ce flux s'écrit :

$$F_{i,j}(t_k) = s_{ij}\lambda_i \frac{T_{sij}-T_i}{l_{ij}} = s_{ij}\lambda_j \frac{T_j-T_{sij}}{l_{ij}} = s_{ij} \frac{\lambda_i\lambda_j}{\lambda_i+\lambda_j} \frac{T_j-T_i}{l_{ij}} \quad (4)$$

Où  $l_{ij}$  est la distance entre la facette et les germes,  $s_{ij}$  la longueur de cette facette et  $T_{sij}$  la température sur la facette. La conductivité thermique de la fibre  $\lambda_i$  dépend de la température de cette fibre au pas de temps précédent. La facette peut aussi être libre : elle peut alors être totalement isolé, ce qui entraine un flux nul, ou le flux peut être calculé à partir de la température de la paroi sur la facette :

$$F_{i,j}(t_k) = s_{ij} \frac{1}{r_{ij} + \frac{l_{ij}}{\lambda_i}} \frac{T_p - T_i}{l_{ij}} \quad (5)$$

Avec  $r_{ij}$  la résistance thermique supplémentaire en  $K.W/m^2$  apportée par une éventuelle protection. La température de la paroi  $T_p$  directement exposée au gaz peut être imposée, ou elle est imposée par la température du gaz via la somme des flux thermiques associés à la convection et au rayonnement :

$$F_{i,j}(t_k) = s_{ij} (\alpha_{conv}(T_{gaz} - T_p) + \sigma(T_{gaz}^4 - T_p^4)) \quad (6)$$

Où  $\alpha_{conv}$  est le coefficient de transfert thermique par convection (en  $W.m^{-2}.K^{-1}$ ), les températures sont exprimées en K et  $\sigma$  est le coefficient de flux radiatif prenant en compte l'émissivité (en  $W.m^{-2}.K^{-4}$ ). La combinaison des équations (5) et (6) fait apparaître la température de la paroi comme la racine positive d'un polynôme de degré 4, que l'on peut trouver par une méthode de Newton.

La température des gaz est directement fonction du feu étudié. La méthode explicite permet d'obtenir un profil de la température sur la section exposée à un incendie d'une durée donnée. Cette température maximale donne une idée la dégradation des matériaux : les lois de comportement des Eurocodes fixent la relation entre la contrainte et la déformation du béton pour chaque fibre en fonction de la température atteinte. A partir de ces lois de comportement, il faut maintenant calculer la raideur sécante de la poutre.

## 2 Modèle du comportement mécanique de la structure ou de toute partie de celle-ci (modèle de réponse mécanique)

La résolution du problème mécanique par la méthode de Newton présente deux étapes principales au sein d'une itération. Partant des lois de comportement sécantes élastiques de chaque poutre, il faut pouvoir calculer une nouvelle estimation de la déformation de chaque poutre, en tenant compte des charges appliquées. La résolution de ce problème élastique est du ressort de l'application ST1. Ensuite, partant de cette nouvelle estimation de la déformation de chaque poutre, il faut mettre à jour la raideur sécante élastique de la poutre. Cette étape doit tenir compte des lois de comportement non linéaire de chaque fibre de la poutre.

La température en chaque fibre de la poutre définit une poutre composite, avec une relation entre la déformation élastique  $\varepsilon_{e,i}$  et la contrainte  $\sigma_i$  :

$$\sigma_i = f_i(\varepsilon_{e,i})$$

Par exemple, la résistance à la traction du béton peut être négligée, ce qui donne :

$$f_i(\varepsilon_{e,i}) = 0 \quad \forall \varepsilon_{e,i} < 0$$

Dans le cas où on étudie la tenue à chaud, la déformation élastique de la fibre dépend de sa déformation effective  $\varepsilon_i$  et de la dilatation thermique  $\varepsilon_{th,i}$ , laquelle est fixée par les Eurocodes en fonction de la température :

$$\varepsilon_{e,i} = \varepsilon_i - \varepsilon_{th,i}$$

Le module sécant de la fibre se calcule comme :

$$E_i = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_{e,i}}$$

Le comportement de chaque fibre est donc assimilé à un comportement thermoélastique :

$$\sigma_i = E_i(\varepsilon_i - \varepsilon_{th,i})$$

On peut réécrire cette équation en faisant abstraction de la discrétisation en fibre et en introduisant les coordonnées  $(Y,Z)$  de la fibre dans la section :

$$\sigma(Y,Z) = E(Y,Z)(\varepsilon(Y,Z) - \varepsilon_{th}(Y,Z))$$

La raideur sécante axiale  $ES$  de la poutre se déduit des module d'Young sécant de chaque fibre :

$$ES = \iint_S E(Y, Z) dS$$

On voit de même apparaître la précontrainte thermique axiale  $N_{th}$ :

$$N_{th} = \iint_S E(Y, Z) \varepsilon_{th}(Y, Z) dS$$

De sorte que si la déformation de la section se réduit à une extension axiale  $\varepsilon_{xx}$ , l'effort normal dans la poutre s'écrit :

$$N = ES \varepsilon_{xx} - N_{th}$$

La fibre neutre de la poutre est telle qu'une extension axiale n'induit pas de moment par rapport à cette fibre. Les coordonnées de cette fibre ( $Y_c, Z_c$ ) sont donc telles que :

$$\iint_S E(Y, Z) (Z - Z_c) dS = 0$$

$$\iint_S E(Y, Z) (Y - Y_c) dS = 0$$

Le feu peut donc avoir pour effet de décaler la fibre neutre : elle peut ne plus être au centre de gravité de la section de béton et présenter un excentrement. La raideur en flexion n'est découplée de la raideur normale que s'il on exprime les moments par rapport à cette fibre neutre. La déformation axiale effective  $\varepsilon_i$  de la fibre se calcule à partir de la déformation axiale de la section, dont il est fait l'hypothèse qu'elle reste plane. Cette déformation est donc de la forme :

$$\varepsilon(Y, Z) = \varepsilon_{xx} + \theta_Y(Z - Z_c) + \theta_Z(Y - Y_c)$$

Dans ce repère, les moments se calculent comme :

$$\begin{aligned} M_Z &= \iint_S \sigma(Y, Z) (Y - Y_c) dS \\ &= \iint_S E(Y, Z) (\varepsilon_{xx} + \theta_Y(Z - Z_c) + \theta_Z(Y - Y_c) - \varepsilon_{th}(Y, Z)) (Y - Y_c) dS \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_Y &= \iint_S \sigma(Y, Z) (Z - Z_c) dS \\ &= \iint_S E(Y, Z) (\varepsilon_{xx} + \theta_Y(Z - Z_c) + \theta_Z(Y - Y_c) - \varepsilon_{th}(Y, Z)) (Z - Z_c) dS \end{aligned}$$

Soit en l'absence de dilatation thermique :

$$M_Z = EI_{ZZ}\theta_Z + EI_{YZ}\theta_Y$$

$$M_Y = EI_{YY}\theta_Y + EI_{YZ}\theta_Z$$

Avec les inerties :

$$EI_{ZZ} = \iint_S E(Y, Z)(Y - Y_c)^2 dS$$

$$EI_{YZ} = \iint_S E(Y, Z)(Y - Y_c)(Z - Z_c) dS$$

$$EI_{YY} = \iint_S E(Y, Z)(Z - Z_c)^2 dS$$

Le feu peut donc faire apparaître une inertie croisée  $EI_{YZ}$ , et le repère des inerties principales peut donc être tourné d'un angle  $\beta = \frac{1}{2} \operatorname{atan}\left(\frac{2 \cdot EI_{YZ}}{I_{ZZ} + I_{YY}}\right)$

On pose les coordonnées  $(y, z)$  dans ce repère à chaud, tel que :

$$\begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta \\ \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y - Y_c \\ Z - Z_c \end{bmatrix}$$

Dans ce repère tourné, on a les moments qui s'expriment indépendamment l'un de l'autre à l'aide des inerties principales, avec des moments de précontrainte thermique à chaud :

$$M_z = EI_{zz}\theta_z - M_{th,z}$$

$$M_y = EI_{yy}\theta_y - M_{th,y}$$

Avec :

$$M_{th,z} = \iint_S E(y, z)(\varepsilon_{th}(y, z)) y dS$$

$$M_{th,y} = \iint_S E(y, z)(\varepsilon_{th}(y, z)) z dS$$

L'objectif étant aussi de calculer les caractéristiques d'une section quelconque à partir de son contour, il faut aussi être capable de calculer ses raideurs au tranchant et en torsion et utilisant le maillage constitué de fibres.

Pour estimer la raideur au tranchant  $GS_z$ , on utilise la méthode de Mindlin ainsi que proposé dans la documentation de Code\_Aster R3.08.03 « Calcul des caractéristiques d'une poutre de section transversale quelconque », en adaptant les équations au cas d'une poutre composite. Pour un essai de flexion sur une poutre encastree à une extrémité, on impose que la densité linéique d'énergie de déformation calculée localement à partir des contraintes de cisaillement  $\sigma_{xy}$  et  $\sigma_{xz}$  soit égale à la densité linéique d'énergie macroscopique de déformation associé à l'effort tranchant  $V_z$  de la poutre de Timoshenko. L'effort tranchant peut être fixé arbitrairement comme unitaire :

$$U_{tz} = \iint_S \frac{\sigma_{xz}^2(y, z) + \sigma_{xy}^2(y, z)}{G(y, z)} dS = \frac{1}{2} \frac{V_z^2}{GS_z}$$

Avec  $G(y, z)$  le module de cisaillement sécant de la fibre. Il est supposé nul pour une fibre de béton tendu. Sinon, il est calculé à partir du coefficient de Poisson du béton non fissuré.

Le déplacement lors de cet essai est recherché sous la forme :

$$\begin{aligned} u_x &= u_x(x) + z\theta_y(x) + \tilde{u}(y, z) \\ u_y &= 0 \\ u_z &= w(x) \end{aligned}$$

Le déplacement  $\tilde{u}(y, z)$  traduit un gauchissement de la section. La prise en compte de ce gauchissement correspond à un raffinement par rapport à la méthode des contours de Jouravsky. La déformation vaut :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{du_x}{dx}(x) + z\frac{d\theta_y}{dx}(x) \\ 2\varepsilon_{xy} &= \frac{d\tilde{u}}{dy}(y, z) \\ 2\varepsilon_{xz} &= \theta_y(x) + \frac{d\tilde{u}}{dz}(y, z) + \frac{dw}{dx}(x) \end{aligned}$$

On remarque que les déformations de cisaillement sont telles que :

$$\frac{d\varepsilon_{xy}}{dz} - \frac{d\varepsilon_{xz}}{dy} = 0$$

Il existe donc une fonction  $\phi_z(x, y, z)$  telle que :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xy} &= \frac{d\phi_z}{dy} \\ \varepsilon_{xz} &= \frac{d\phi_z}{dz} \end{aligned}$$

Donc les contraintes de cisaillement s'écrivent :

$$\begin{aligned} \sigma_{xy} &= 2G(y, z)\frac{d\phi_z}{dy} \\ \sigma_{xz} &= 2G(y, z)\frac{d\phi_z}{dz} \end{aligned}$$

Pour une section d'abscisse, l'équilibre selon l'axe de la poutre est analogue à une équation de diffusion stationnaire dans un milieu hétérogène, où  $\phi_z$  serait la température,  $2G(y, z)$  serait la conductivité, les deux équations précédentes donnant l'expression des flux. La variation de la contrainte axiale donne le terme source de ce problème :

$$\frac{d\sigma_{xx}}{dx} + \frac{d\sigma_{xy}}{dy} + \frac{d\sigma_{xz}}{dz} = 0$$

L'absence de cisaillement sur la limite de la section fournit des conditions aux limites de flux nul ou imposé s'il y a des efforts de freinage, ou condition de Neumann. Dans le cas de la poutre de longueur  $L$  encastée à une extrémité, le moment équilibre un effort tranchant uniforme, donc :

$$M_y(x) = -V_z(L - x)$$

On peut alors estimer la contrainte axiale comme :

$$\sigma_{xx}(x, y, z) = E(y, z)\frac{-z(L - x)}{EI_y}V_z$$

Et donc sa variation axiale, donne le terme source :

$$\frac{d\sigma_{xx}}{dx}(y, z) = E(y, z)\frac{z}{EI_y}V_z$$

On peut remarquer que ce terme source est de moyenne nulle sur la section, de par la définition de la fibre neutre. Cela assure que le problème de diffusion, avec des conditions aux limites adiabatiques a

bien au moins une solution : la fonction  $\phi_z$  solution du problème est maintenant définie à une constante près. On résout cette équation de diffusion hétérogène en fixant la valeur de  $\phi_z$  pour une fibre et en utilisant la méthode des volumes finis. Plutôt que d'utiliser la méthode explicite jusqu'au moment d'atteindre le régime stationnaire, on assemble le problème linéaire définie par les équations  $\sum_j F_{i,j} = A_i \frac{d\sigma_{xx,i}}{dx}$ , les inconnues étant les valeurs de  $\phi_{z,i}$ . Ce système linéaire est inversé à l'aide de la librairie MUMPS [5], exploitant ainsi la structure très creuse de la matrice obtenue.

Une fois la valeur de  $\phi_z$  calculée, une subtilité supplémentaire permet d'évaluer plus facilement la raideur au tranchant. L'énergie vaut :

$$U_{tz} = \iint_S \frac{\sigma_{xz}^2(y,z) + \sigma_{xy}^2(y,z)}{G(y,z)} dS = \iint_S 4G(y,z) \left( \left( \frac{d\phi_z}{dy} \right)^2 + \left( \frac{d\phi_z}{dz} \right)^2 \right) dS$$

$$= \iint_S 4G(y,z) \text{grad}\phi_z \cdot \text{grad}\phi_z dS$$

A l'aide du théorème de Green-Ostrogradski et en tenant compte du fait que le flux sortant est nul, cette intégrale devient :

$$U_{tz} = \iint_S \phi_z \text{div}(4G(y,z) \text{grad}\phi_z) dS$$

De par l'équation de diffusion, la divergence correspond au terme source :

$$U_{tz} = -2 \iint_S \phi_z E(y,z) \frac{z}{EI_y} V_z dS$$

Cette intégrande présente l'avantage de pouvoir facilement être évalué en exploitant les valeurs de  $\phi_{z,i}$  obtenue pour chaque fibre. Il est donc ainsi possible de déterminer la raideur au tranchant  $GS_z$  et on procède de la même manière pour la raideur  $GS_y$ , en introduisant une fonction  $\phi_y$ .

Le centre de torsion, on centre de cisaillement, de coordonnées  $(y_t, z_t)$  est tel que l'effort tranchant lors d'une flexion n'induit pas de moment de torsion par rapport à ce point :

$$\iint_S (y - y_t) \sigma_{xz} - (z - z_t) \sigma_{xy} dS = 0$$

Pour la flexion z, on a donc :

$$\iint_S (y - y_t) G(y,z) \frac{d\phi_z}{dz} - (z - z_t) G(y,z) \frac{d\phi_z}{dy} dS = 0$$

On peut réduire cette intégrale à une intégrale sur le contour, puis exploiter le fait que le gradient de  $\phi_z$  est tangent au contour du fait de la condition de flux nul. L'équation devient alors :

$$\oint_{ds} (Y^2 - 2YY_t + Z^2 - 2ZZ_t) G(y,z) \frac{d\phi_z}{dl} dl = 0$$

$$\oint_{ds} (Y^2 - 2YY_t + Z^2 - 2ZZ_t) G(y,z) \frac{d\phi_y}{dl} dl = 0$$

Cette équation peut être exploitée dans un code de volume fini, où on a supposé la température  $\phi_z$  uniforme sur chaque facette. Il suffit donc de sommer les sauts de  $\phi_z$  sur le périmètre, aux jonctions

entre deux facettes. Les deux équations, identiques pour  $\phi_z$  et  $\phi_y$ , définissent chacune une droite qui se coupent en un seul point : le centre de cisaillement de la section.

L'unique raideur qu'il reste à calculer est la raideur en torsion  $EJ$  de la section. On conserve une identification énergétique de la raideur en torsion, en supposant qu'il n'y a pas de contrainte axiale, les sections gauchissant librement dans la réponse à une torsion pure autour du centre de torsion.

$$U_{tx} = \iint_S \frac{\sigma_{xz}^2(y,z) + \sigma_{xy}^2(y,z)}{G(y,z)} dS = \frac{1}{2} \frac{M_x^2}{EJ} = \frac{1}{2} EJ \left( \frac{d\theta_x}{dx} \right)^2$$

Avec  $\theta_x$  l'angle de rotation autour du centre de torsion et  $M_x$  le moment de torsion par rapport à ce point. Le taux de rotation  $\frac{d\theta_x}{dx}$  peut être fixé arbitrairement comme unitaire. On reprend la démarche adoptée dans Code Aster r3.08.03 [4] pour l'adapter au cas de la torsion d'une poutre composite.

Le champ de déplacement s'écrit :

$$\begin{aligned} u_x &= \frac{d\theta_x}{dx} \tilde{u}(y, z) \\ u_y &= -\frac{d\theta_x}{dx} x(z - z_t) \\ u_z &= \frac{d\theta_x}{dx} x(y - y_t) \end{aligned}$$

Où  $\tilde{u}(y, z)$  est la fonction de gauchissement. Si on néglige les termes en  $\left(\frac{d\theta_x}{dx}\right)^2$ , on obtient une déformation locale puis une contrainte locale de la forme :

$$\begin{aligned} \sigma_{xy} &= G(y, z) \frac{d\theta_x}{dx} \left( \frac{d\tilde{u}}{dy}(y, z) - z + z_t \right) \\ \sigma_{xz} &= G(y, z) \frac{d\theta_x}{dx} \left( \frac{d\tilde{u}}{dz}(y, z) + y - y_t \right) \end{aligned}$$

On peut remarquer que le rotationnel du champ de vecteur  $[0 \quad -\sigma_{xz} \quad \sigma_{xy}]$  est nul car on néglige la contrainte axiale. Il existe donc une fonction de contrainte  $\phi(y, z)$  telle que :

$$\begin{aligned} \frac{d\phi}{dz} = \sigma_{xy} &= G(y, z) \frac{d\theta_x}{dx} \left( \frac{d\tilde{u}}{dy}(y, z) - z + z_t \right) \\ \frac{d\phi}{dy} = -\sigma_{xz} &= -G(y, z) \frac{d\theta_x}{dx} \left( \frac{d\tilde{u}}{dz}(y, z) + y - y_t \right) \end{aligned}$$

Donc :

$$\begin{aligned} \frac{1}{G(y, z)} \frac{d\phi}{dy} &= -\frac{d\theta_x}{dx} \left( \frac{d\tilde{u}}{dz}(y, z) + y - y_t \right) \\ \frac{1}{G(y, z)} \frac{d\phi}{dz} &= \frac{d\theta_x}{dx} \left( \frac{d\tilde{u}}{dy}(y, z) - z + z_t \right) \end{aligned}$$

La divergence de ce champ  $\left[ \frac{1}{G(y, z)} \frac{d\phi}{dy} \quad \frac{1}{G(y, z)} \frac{d\phi}{dz} \right]$  est donc constante, égale à  $-2 \frac{d\theta_x}{dx}$ . On reconnaît une fois de plus un problème de diffusion au travers d'un milieu hétérogène, de conductivité  $\frac{1}{G(y, z)}$  avec un terme source uniforme. Les conditions aux limites sont toujours dictées par  $0 = \sigma \cdot n = \sigma_{xy} \cdot n_y + \sigma_{xz} \cdot n_z = \frac{d\phi}{dz} \cdot n_y - \frac{d\phi}{dy} \cdot n_z$ . Donc  $\text{grad } \phi \wedge n = 0$ , Donc ce gradient est colinéaire à la normale, ce qui veut que  $\phi$  est constante sur chaque bord continu. On peut imposer une valeur de 0 sur le bord extérieur : il s'agit cette fois d'une condition aux limites de Dirichlet. Pour les vides intérieurs, on peut fixer une conductivité infinie, ou du moins très grande. De plus, on peut évaluer l'énergie de déformation comme :

$$U_{tx} = \iint_S \frac{\sigma_{xz}^2(y,z) + \sigma_{xy}^2(y,z)}{G(y,z)} dS = \iint_S \frac{1}{G(y,z)} \text{grad } \phi \cdot \text{grad } \phi dS$$

On peut à nouveau utiliser le théorème de Green-Ostrogradski, en utilisant le fait que  $\phi$  est nulle sur le bord. On voit alors apparaître le terme source et on obtient :

$$U_{tx} = -2 \frac{d\theta_x}{dx} \langle \phi \rangle$$

La moyenne de  $\phi$  sur la section est très facile à évaluer une fois que l'on connaît la valeur de  $\phi_i$  pour chaque fibre.

Ces équations permettent de calculer la raideur d'une poutre composite. Il est possible de les étendre au cas de sections variables en supposant que le module d'Young évolue linéairement sur chaque fibre, et ces équations peuvent servir à calculer les contraintes de cisaillement locale, une fois que l'on connaît les variations de contrainte axiale  $\frac{d\sigma_{xx}}{dx}$  et le taux de rotation  $\frac{d\theta_x}{dx}$ . L'actualisation de la raideur sécante et éventuellement de la précontrainte thermique pose un nouveau problème élastique linéaire dont la résolution est confiée au noyau de calcul de ST1.

L'issue du calcul peut être une raideur axiale nulle signalant la rupture totale de la section. La raideur peut aussi devenir si faible que la méthode de Newton ne parvient pas à converger, ou le problème mécanique sécant peut devenir trop mal conditionné pour être résolu.

---

## CONSEILS POUR L'UTILISATION DU CALCUL AU FEU

### A Forme des sections avec la commande perimetre et taille de maille dans la définition de la section

Dans la définition de la section intervient un paramètre décrivant la taille de maille, sa valeur par défaut étant de 0.01 (m).

```
section 1 ' dalle'  
  perimetre  
  materiau 1  
  maille 0.01  
  y -0.2      z -0.5      exposition Expo  
  y 0.2       z -0.5      exposition 5  
  y 0.2       z 0.5       exposition 5  
  y -0.2      z 0.5       exposition 5  
fin
```

Plus la taille est petite, plus le maillage est fin, plus le résultat du calcul est précis. Mais, pour limiter le temps de calcul, il convient de garder une maille assez grossière, de l'ordre de 1cm pour des sections usuelles. La taille maximale de la maille doit être choisie en fonction du dessin du périmètre : il faut une taille de maille trois fois inférieure à la dimension la plus petite du dessin. Cette dimension peut être la plus petite longueur des segments définissant le périmètre, ou la largeur de l'âme ou des ailes dans une poutre en I.

Il convient d'adapter le dessin de la section pour faciliter le calcul. Par exemple, représenter des arrondis de petit rayon par plusieurs segments courts entraîne une taille de maille trop petite.

Le maillage du périmètre consiste à placer des points le long de ce périmètre avec un espacement prescrit. Là où deux segments du périmètre se rejoignent et forment un angle, on place quatre points, trois à l'extérieur de l'angle et un à l'intérieur. Cette méthode convient bien pour des angles droits, mais elle conduit à des points très proches les uns des autres dans le cas de segments quasiment alignés. Il convient d'éviter ce cas de figure. En effet, des points très proches dans le maillage conduisent à des longueurs courtes, et la condition CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) de stabilité des itérations explicites du calcul au feu mais rendre le pas de temps très court, avec pour résultat des calculs au feu très longs.

### B Réussir un calcul au feu

Il n'est pas simple de parvenir à calculer au feu une structure, car il s'agit d'un calcul non linéaire, et la structure peut rapidement devenir instable s'il manque un acier. Voici quelques conseils pratiques pour obtenir un résultat.

- 1- Commencer par **un feu à la température isotherme à 20°C**, de courte durée, sans dilatation thermique, et en **autorisant les contraintes de traction** dans le béton.

```
materiau 1 ' beton '  
  e 34077.0 fck Fckk TRACTION OUI  
  ...  
fin  
...  
exposition feu 6 LOI_PAROI  
  0. 20.  
  30. 20.
```

```

...
feu 10
    duree 10
    temp 20.
fin
...
incendie 6
    feu 10 local charg 106
fin

```

C'est quasiment un calcul linéaire à froid, à ceci près que le béton a un comportement non linéaire en compression.

- 2- **Interdire la traction** dans le béton, et **définir les aciers**, sur toutes les faces (**les fibres tendues et aussi comprimées**).

```

matériau 1 ' beton traverse'
    e 34077.0 fck Fcck TRACTION NON
    ...
fin

```

```

cara 1 section 1 arma 1

```

En BA particulièrement, le ferrailage peut devenir absolument nécessaire pour stabiliser le calcul non linéaire dès que l'on considère les fibres de béton étirées comme rompues. Il peut être nécessaire de décrire un ferrailage minimum y compris dans des zones que l'on sait comprimées, simplement pour que le solveur ne s'égaré pas dans des faux modes de rupture. Il peut être utile d'introduire du ferrailage supplémentaire, même fictif et disproportionné, pour mieux comprendre la raison de la rupture. On regardera en particulier les raideurs sécantes obtenues : si elles sont déjà très faibles, c'est peut-être qu'il faut mieux représenter le ferrailage de la section considérée.

- 3- Implémenter ensuite la sollicitation thermique à étudier, avec un feu de 10min, sans dilatation thermique et **augmenter progressivement la durée du feu** jusqu'à la durée cible souhaitée (pas plus de 120 minutes en général).

```

feu 10
    duree 90
    temp 20.
fin

```

La solution à un feu court de 10min restera assez proche de la solution à froid. En augmentant la durée du feu, on surveillera aussi la diminution progressive de la raideur sécante de la section et l'augmentation de température dans les aciers. Pour du BA, la rupture intervient souvent quand les ferrailages atteignent 500-600°C. Pour repousser ce point de rupture de façon significative, la solution est souvent d'augmenter l'épaisseur d'enrobage, ou la protection incendie de la paroi. Augmenter le diamètre de l'armature peut avoir l'effet inverse de celui escompté, la position du centre de l'armature étant fixée, puisque cela rapproche l'armature de la paroi.

---

A ce stade, on a un calcul au feu sans dilatation thermique. Cela peut suffire pour des éléments de structures isostatiques, ou pour un calcul post-incendie, après refroidissement de la structure. Pour ce faire on peut ajouter le mot clé GARDER avant l'exécution de l'incendie.

```
ANALYSE FEU
  cara garder
fin

incendie 6
  feu 10 local charg 106
fin

exec incendie 6
...
```

- 4- **Autoriser les dilatations thermiques** en revenant à un feu de courte durée puis **augmenter progressivement la durée du feu** jusqu'à la durée cible.

```
feu 10
  duree 10
  maille 0.01
  temp 20.
Fin
...
incendie 6
  feu 10 charg 106
fin
...
```

La dilatation thermique peut drastiquement changer le profil des contraintes dans les sections : on peut passer de moments positifs à des moments négatifs, de zones de section comprimées à des zones étirées. Il convient de reprendre le calcul au feu pour des durées courtes, pour revenir à une solution proche du cas à froid. Il peut s'avérer nécessaire de rajouter du ferrailage dans des zones où il n'y en avait pas besoin, car elles étaient initialement comprimées. Il faut surveiller l'évolution des raideurs sécantes et la température dans les armatures pour comprendre où et comment la rupture intervient.

On obtient alors la réponse de la structure pendant l'incendie. On peut ajouter le mot clé GARDER dans l'idée de faire un calcul de charge critique pendant l'incendie. Mais il faut faire attention au sens des alpha critiques associés aux modes de flambement. En effet, le comportement étant non linéaire, un coefficient alpha de 2 ne veut pas dire que la structure sera stable jusqu'à deux fois la charge. On préfère augmenter la charge jusqu'à obtenir un alpha proche de 1, signalant l'apparition d'un mode d'instabilité géométrique.



# CONCEPTION

Le logiciel ST1 a été conçu au sein du CTOA au SETRA puis au DTOA du CEREMA-ITM :

La conception et les développements successifs ont suivi l'historique suivant :

- P.Peyrac (Conception originale Setra<2002)
- J. Hervé (Charges d'exploitation Eurocode -Setra<2003-2009)
- A.L. Millan (Noyau RDM de calcul Setra<2013)
- G. Bondonet (Dynamique, Eurocode, Prétension, Barre sur ressort non linéaire -Setra-Cerema ITM)(2009-2020)
- P Peyrac (DRIEA IF) et B Moreau (CETU)(2014-2019) (Principe en 2D et Calcul au feu béton armé section rectangle), G. Bondonet (intégration, précontrainte, calcul 2D en 3D) (2015-2020) (Cerema ITM), validation P Perrin (Cerema Est)(208-2019) F Lavergne (Modélisation 3D, section quelconque - Cerema ITM) (Calcul au feu)

