Opérateur DEFI_MATERIAU

1 But

Définir les paramètres ou caractéristiques physiques d'un matériau, qui serviront à l'expression des lois de comportement, ou les paramètres associés à la fatigue, au dommage, ou aux méthodes simplifiées.

Les paramètres physiques admis actuellement par cet opérateur concernent les domaines suivants : **Mécanique** et **Thermique** linéaires ou non, **Métallurgique** pour la modélisation des aciers, **Hydratation** et **Séchage** pour les bétons, **Fluide** pour l'acoustique, **Thermo-Hydro-Mécanique** pour la modélisation des milieux poreux saturés en thermo-mécanique couplée et la **Mécanique des Sols**.

Si nécessaire, un même matériau peut être défini lors d'un appel à DEFI_MATERIAU avec plusieurs séries de paramètres physiques, dans les domaines suivants : élastique, thermique, …

Produit une structure de données de type mater.

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

Table des Matières

1 But....1
2 Syntaxe générale....7
3 Caractéristiques depuis une table....12
3.1 Mot clé facteur TABLE....12
4 Caractéristiques élastiques générales....12
4.1 Mots clés facteur ELAS, ELAS_FO....12
4.2 Mot clé ELAS_VISCO....16
4.3 Mot clé facteur ELAS_FLUI....16
4.4 Mot clé facteur CABLE....18
4.5 Mots clés facteur ELAS_ORTH, ELAS_ORTH_FO, ELAS_VISCO_ORTH....18
4.6 Mots clés facteur ELAS_ISTR, ELAS_ISTR_FO, ELAS_VISCO_ISTR....23
4.7 Mot clés facteur ELAS_COQUE , ELAS_COQUE_FO....26
4.8 Mot clé facteur ELAS_MEMBRANE....28
4.9 Mot clé facteur ELAS_HYPER....29
4.10 Mot clé facteur ELAS_2NDG....30
4.11 Mot clé facteur ELAS_GLRC....30
4.12 Mot clé facteur ELAS_DHRC....31
4.13 Mots clés facteur VISC_ELAS....32
4.14 Mot clé facteur CZM_ELAS....32
5 Comportements mécaniques non linéaires généraux....34
5.1 Mot clé facteur TRACTION....34
5.2 Mots clés facteur ECRO_LINE, ECRO_LINE_FO....34
5.3 Mots clés facteur ECRO_NL....35
5.4 Mots clés facteur PRAGER, PRAGER_FO....36
5.5 Mots clés facteur ECRO_PUIS, ECRO_PUIS_FO....36
5.6 Mots clés facteur CIN1_CHAB, CIN1_CHAB_FO....37
5.7 Mots clés facteur CIN2_CHAB, CIN2_CHAB_FO....38
5.8 Mots clés facteurs VISCOCHAB, VISCOCHAB_FO....40
5.9 Mots clé facteur MEMO_ECRO....42
5.10 Mots clé facteur CIN2_NRAD....43
5.11 Mots clés facteur TAHERI, TAHERI_FO....43
5.12 Mots clés facteurs MONO_*....44
5.13 Mots clés facteur LEMAITRE, LEMAITRE_FO....48
5.14 Mots clés facteur NORTON, NORTON_FO....49
5.15 Mot clé facteur VISC_SINH....49
5.16 Mot clé LEMA_SEUIL....50
5.17 Mot clé facteur VISC_IRRA_LOG....51
5.18 Mot clé facteur GRAN_IRRA_LOG....52

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

5.19 Mots clés facteur IRRAD3M....53
5.20 Mots clés facteurs ECRO_COOK, ECRO_COOK_FO....54
5.21 Mots clés facteur KICHENIN_NL....55
5.22 Mots clés facteurs VMIS_ISOT_CUVE....55
6 Comportements liés à l'endommagement et la rupture....57
6.1 Mots clés facteur ROUSSELIER, ROUSSELIER_FO....57
6.2 Mot clé facteur GTN....60
6.3 Mots clés VENDOCHAB / VENDOCHAB_FO....62
6.4 Mots clés VISC_ENDO / VISC_ENDO_FO....63
6.5 Mots-clés HAYHURST et HAYHURST_FO....64
6.6 Mot clé facteur RUPT_FRAG, RUPT_FRAG_FO....65
6.7 Mot clé facteur NON_LOCAL....67
6.8 Mot clé facteur CZM_LAB_MIX....68
6.9 Mot clé facteur RUPT_DUCT....69
6.10 Mot clé facteur RANKINE....71
6.11 Mot clé facteur JOINT_MECA_RUPT....71
6.12 Mot clé facteur JOINT_MECA_FROT....73
6.13 Mot clé facteur JOINT_MECA_ENDO....75
6.14 Mot clé facteur CORR_ACIER....76
6.15 Mot clé facteur ENDO_HETEROGENE....77
6.16 Mot clé facteur RUPT_FM....78
7 Caractéristiques thermiques....78
7.1 Mots clés facteur THER, THER_FO....78
7.2 Mot clé facteur THER_ORTH....79
7.3 Mot clé facteur THER_NL....80
7.4 Mots clés facteur THER_COQUE, THER_COQUE_FO....80
7.5 Mot clé facteur THER_NL_ORTH....82
8 Caractéristiques spécifiques aux bétons....84
8.1 Mot clé facteur THER_HYDR....84
8.2 Mot clé facteur SECH_GRANGER....84
8.3 Mot clé facteur SECH_MENSI....85
8.4 Mot clé facteur SECH_BAZANT....86
8.5 Mot clé facteur SECH_NAPPE....87
8.6 Mot clé facteur PINTO_MENEGOTTO....87
8.7 Mots clés facteur BPEL_BETON, BPEL_ACIER....90
8.8 Mots clés facteur ETCC_BETON, ETCC_ACIER....92
8.9 Mot clé facteur BETON_DOUBLE_DP....93
8.10 Mot clé facteur BETON_GRANGER, V_BETON_GRANGER....95
8.11 Mot clé facteur MAZARS, MAZARS_FO....97
8.12 Mot clé BETON_UMLV....99

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

8.13 Mot clé facteur BETON_ECRO_LINE....101
8.14 Mot clé facteur ENDO_ORTH_BETON....102
8.15 Mots-clés facteur ENDO_SCALAIRE/ENDO_SCALAIRE_FO....103
8.16 Mot clé facteur ENDO_FISS_EXP/ENDO_FISS_EXP_FO....104
8.17 Mot-clé facteur GLRC_DM....105
8.18 Mot-clé facteur DHRC....106
8.19 Mot-clé facteur BETON_REGLE_PR....110
8.20 Mot clé JOINT_BA....111
8.21 Mot clé BETON_RAG....113
8.22 Mot clé BETON_BURGER....115
8.23 Mot clé FLUA_PORO_BETON....118
8.24 Mot clé ENDO_PORO_BETON....119
8.25 Mot clé FLUA_ENDO_PORO....121
8.26 Mot clé RGI_BETON....123
8.27 Mot clé facteur ENDO_LOCA_EXP / ENDO_LOCA_EXP_FO....127
9 Comportements métallo-mécaniques....128
9.1 Mot clé facteur META_ACIER....128
9.2 Mot clé facteur META_ZIRC....131
9.3 Mot clé facteur DURT_META....132
9.4 Mots clés facteur ELAS_META, ELAS_META_FO....133
9.5 Mot clé facteur META_ECRO_LINE....136
9.6 Mot clé facteur META_TRACTION....137
9.7 Mot clé facteur META_VISC_FO....137
9.8 Mot clé facteur META_PT....139
9.9 Mot clé facteur META_RE....140
9.10 Mot clé META_LEMA_ANI....141
10 Comportements thermo-hydro-mécaniques et des sols....145
10.1 Mot clé simple COMP_THM....145
10.2 Mot clé facteur THM_INIT....146
10.3 Mot clé facteur THM_LIQU....148
10.4 Mot clé facteur THM_GAZ....148
10.5 Mot clé facteur THM_VAPE_GAZ....149
10.6 Mot clé facteur THM_AIR_DISS....150
10.7 Mot clé facteur THM_DIFFU....150
10.8 Mot clé MOHR_COULOMB....155
10.9 Mot clé CAM_CLAY....155
10.10 Mot clé facteur CJS....156
10.11 Mot clé facteur LAIGLE....159
10.12 Mot clé facteur LETK....161
10.13 Mot clé facteur DRUCK_PRAGER....164

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

10.14 Mot clé facteur VISC_DRUC_PRAG....165
10.15 Mot clé facteur BARCELONE....167
10.16 Mot clé facteur HUJEUX....168
10.17 Mot clé facteur HOEK_BROWN....170
10.18 Mot clé facteur GONF_ELAS....172
10.19 Mot clé facteur JOINT_BANDIS....173
10.20 Mot clé facteur THM_RUPT....173
10.21 Mot clé facteur Iwan....174
10.22 Mot clé facteur LKR....175
10.23 Mot clé facteur MohrCoulombAS....176
10.24 Mot clé facteur KH_CSSM....177
11 Comportements spécifiques aux éléments 1D....179
11.1 Mot clé facteur ECRO_ASYM_LINE (cf. [R5.03.09])....179
12 Paramètres pour comportements particuliers....181
12.1 Mot clé facteur LEMAITRE_IRRA....181
12.2 Mot clé facteur DIS_GRICRA....182
12.3 Mot clé facteur DIS_CONTACT....183
12.4 Mot clé facteur DIS_CHOC_ENDO....185
12.5 Mot clé facteur DIS_ECRO_CINE....185
12.6 Mot clé facteur DIS_VISC....186
12.7 Mot clé facteur DIS_ECRO_TRAC....188
12.8 Mot clé facteur DIS_BILI_ELAS....189
12.9 Mot clé facteur ASSE_CORN....190
12.10 Mot clé facteur ARME....192
12.11 Mot clé facteur RELAX_ACIER....193
12.12 Mot clé facteur CABLE_GAINE_FROT....194
12.13 Mot clé facteur FONDA_SUPERFI....195
12.14 Mot clé facteur JONC_ENDO_PLAS....196
13 Matériau fluide....198
13.1 Mot clé facteur FLUIDE....198
14 Données matériaux associées à des post-traitements....199
14.1 Mot clé facteur FATIGUE....199
14.2 Mot clé facteur DOMMA_LEMAITRE....200
14.3 Mot clé facteur CISA_PLAN_CRIT....201
14.4 Mot clé facteur WEIBULL, WEIBULL_FO....203
14.5 Mots clés facteur RCCM, RCCM_FO....204
14.6 Mot clé facteur CRIT_RUPT....206
14.7 Mot clé facteur REST_ECRO....206
14.8 Mot clé facteur VERI_BORNE....207
14.9 Mots-clés facteurs POST_ROCHE et POST_ROCHE_FO....207

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

15 Données matériaux associées à des comportements externes....209
15.1 Mots clés facteur MFRONT, MFRONT_FO....209
15.2 Mots clés facteur UMAT, UMAT_FO....209
16 Mot clé simple MATER....209

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

2 Syntaxe générale

```
ma [mater] =      DEFI_MATERIAU     (

                  reuse = mat,            [mater]
                  MATER = mat,            [mater]

                    # Caractéristiques depuis une table
                  |     /TABLE,

                    # Caractéristiques Élastiques Générales
                  |     /ELAS,
                        /ELAS_FO,
                   |    ELAS_VISCO,
                        ELAS_FLUI,
                  |     CABLE,
                  |     /ELAS_ORTH,
                        /ELAS_ORTH_FO,
                        /ELAS_VISCO_ORTH,
                   |    /ELAS_ISTR,
                        /ELAS_ISTR_FO,
                        /ELAS_VISCO_ISTR,
                   |    /ELAS_COQUE,
                        /ELAS_COQUE_FO,
                  |     ELAS_MEMBRANE,
                  |     ELAS_HYPER,
                   |    ELAS_2NDG,
                   |    ELAS_GLRC,
                   |    ELAS_DHRC,
                   |    VISC_ELAS,

                  # Caractéristiques Mécaniques Non Linéaires Générales
                  |     TRACTION,
                  |     /     ECRO_LINE,
                        /     ECRO_LINE_FO,
                  |     /     ECRO_NL,
                  |     /     PRAGER,
                        /     PRAGER_FO,
                  |     /     ECRO_PUIS,
                        /     ECRO_PUIS_FO,
                  |     /     CIN1_CHAB,
                        /     CIN1_CHAB_FO,
                  |     /     CIN2_CHAB,
                        /     CIN2_CHAB_FO,
                  |     /     VISCOCHAB,
                        /     VISCOCHAB_FO,
                  |     /     MEMO_ECRO,
                  |     /     MEMO_ECRO_FO,
                  |     /     CIN2_NRAD,
                  |     /     TAHERI,
                        /     TAHERI_FO,
                  |           MONO_VISC1,
                  |           ECOU_VISC2,
                  |           MONO_CINE1,
                  |           MONO_CINE2,
                  |           MONO_ISOT1,
```


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

```
                |           MONO_ISOT2,
                |           MONO_DD_KR,
                     |           MONO_DD_CFC,
                     |           MONO_DD_CFC_IRRA,
                     |           MONO_DD_FAT,
                     |           MONO_DD_CC,
                     |           MONO_DD_CC_IRRA,
      |          /     LEMAITRE,
                 /     LEMAITRE_FO,
      |          /     NORTON,
                 /     NORTON_FO,
      |           /    VISC_SINH,
      |           /    VISC_SINH_FO,
             |     VISC_SINH_REG,
      |          /     LEMA_SEUIL,
                 /     LEMA_SEUIL_FO,
             |     VISC_IRRA_LOG,
             |     GRAN_IRRA_LOG,
             |     IRRAD3M,
             |     /     ECRO_COOK,
                   /     ECRO_COOK_FO,
             |     /     KICHENIN_NL,
                   /     KICHENIN_NL_FO,
             |     RAMBERG_OSGOOD,
             |     VMIS_ISOT_CUVE,

      # Paramètres liés à l'endommagement et la rupture
                   |     /     ROUSSELIER,
                         /     ROUSSELIER_FO,
                   |     GTN,
                   |     /     VENDOCHAB,
                         /     VENDOCHAB_FO,
                   |     /     VISC_ENDO,
                         /     VISC_ENDO_FO,
                   |     /     HAYHURST,
                         /     HAYHURST_FO,
                   |     /     RUPT_FRAG,
                         /     RUPT_FRAG_FO,
                   |     NON_LOCAL,
                        |CZM_LAB_MIX,
                        |RUPT_DUCT,
                        |RANKINE,
                        |JOINT_MECA_RUPT,
                        |JOINT_MECA_FROT,
                        |JOINT_MECA_ENDO,
                   |     CORR_ACIER,
                   |     ENDO_HETEROGENE,

      # Caractéristiques Thermiques
                   |     /     THER,
                         /     THER_FO,
                   |     THER_ORTH,
                   |     THER_NL,
                   |     /     THER_COQU,
                         /     THER_COQU_FO,

            # Caractéristiques spécifiques aux bétons
                    |     THER_HYDR,
```


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

```
                |     SECH_GRANGER,
                |     SECH_MENSI,
                |     SECH_BAZANT,
                |     SECH_NAPPE,
                |     PINTO_MENEGOTTO,
               |      BPEL_BETON et BPEL_ACIER,
               |      ETCC_BETON et ETCC_ACIER,
               |      BETON_DOUBLE_BP,
               |      BETON_GRANGER et V_BETON_GRANGER,
               |      /MAZARS
                      /MAZARS_FO,
               |      BETON_UMLV,
               |      BETON_ECRO_LINE,
               |      ENDO_ORTH_BETON,
               |      /ENDO_SCALAIRE,
                      /ENDO_SCALAIRE_FO,
              |       /ENDO_FISS_EXP,
                      /ENDO_FISS_EXP_FO,
               |      GLRC_DM,
               |      DHRC,
               |      BETON_REGLE_PR,
               |      JOINT_BA,
               |      BETON_RAG,
               |      BETON_BURGER,
               |      FLUA_PORO_BETON,
               |      ENDO_PORO_BETON,
               |      FLUA_ENDO_PORO,
               |      RGI_BETON,
               |      /ENDO_LOCA_EXP,
                      /ENDO_LOCA_EXP_FO,

        # Caractéristiques Métallo-Mécaniques
               |      META_ACIER,
                      META_ZIRC,
               |      DURT_META,
                |     /ELAS_META,
                      /ELAS_META_FO,
                |     META_ECRO_LINE,
               |      META_TRACTION,
               |      META_VISC_FO,
               |      META_PT,
               |      META_RE,
               |      /META_LEMA_ANI,
               |      /META_LEMA_ANI_FO,

    # Caractéristiques Thermo-Hydro-Mécaniques des milieux poreux et des sols
          |      COMP_THM    =      /'LIQU_SATU',
                                     /'LIQU_GAZ',
                                     /'GAZ',
                                     /'LIQU_GAZ_ATM',
                                     /'LIQU_VAPE_GAZ',
                                     /'LIQU_VAPE',
                                     /'LIQU_AD_GAZ_VAPE',
                                     /'LIQU_AD_GAZ',
          |      THM_INIT,
          |      THM_LIQU,
          |      THM_GAZ,
```


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

```
|      THM_VAPE_GAZ,
|      THM_AIR_DISS,
|      THM_DIFFU,
|      MOHR_COULOMB,
|      CAM_CLAY,                          #      voir[§ 10.9]
|      CJS,                               #      voir[§ 10.10]
|      LAIGLE,                            #      voir[§ 10.11]
|      LETK,                              #      voir[§ 10.12]
|      DRUCK_PRAGER,                      #      voir[§ 10.13]
|      VISC_DRUC_PRAG,                    #      voir[§ 10.14
|      BARCELONE,                         #      voir[§ 10.15]
|      HUJEUX,                            #      voir[§ 10.16]
|      HOEK_BROWN,                        #      voir[§ 10.17]
|      GONF_ELAS,                         #      voir[§ 10.18]
|      JOINT_BANDIS,                      #      voir[§ 10.19]
|      THM_RUPT,                          #      voir[§ 10.20]
|      Iwan,                              #      voir[§ 10.21]
|      LKR,                               #      voir[§ 10.22]
|      MohrCoulombAS,                     #      voir[§ 10.23]
|      KH_CSSM,                           #      voir[§ 10.24]
# Paramètres spécifiques aux éléments 1D
|      ECRO_ASYM_LINE,                    #      voir[§ 11.1]
# Paramètres pour comportements particuliers
|      LEMAITRE_IRRA,                     #      voir[§ 12.1]
|      DIS_GRICRA,                        #      voir[§ 12.2]
|      DIS_CONTACT,                       #      voir[§ 12.3]
|      DIS_CHOC_ENDO,                     #      voir[§ 12.4]
|      DIS_ECRO_CINE,                     #      voir[§ 12.5]
|      DIS_VISC,                          #      voir[§ 12.6]
|      DIS_ECRO_TRAC,                     #      voir[§ 12.7]
|      DIS_BILI_ELAS,                     #      voir[§ 12.8]
|      ASSE_CORN,                         #      voir[§ 12.9]
|      ARME,                              #      voir[§ 12.10]
|      RELAX_ACIER                        #      voir[§ 12.11]
|      CABLE_GAINE_FROT                   #      voir[§ 12.12]
|      FONDA_SUPERFI,                     #      voir[§ 12.13]
|      JONC_ENDO_PLAS,                    #      voir[§ 12.14]
# Caractéristiques de comportement fluide
|      FLUIDE,                            #      voir[§ 13.1]
# Données Matériaux associés à des post-traitements
|      FATIGUE,                           #      voir[§ 14.1]
|      DOMMA_LEMAITRE,                    #      voir[§ 14.2]
|      CISA_PLAN_CRIT,                    #      voir[§ 14.3]
|      /      WEIBULL,                    #      voir[§ 14.4]
       /      WEIBULL_FO,
|      /      RCCM,                       #      voir[§ 14.5]
       /      RCCM_FO,
|      CRIT_RUPT,                         #      voir[§ 14.6]
|      REST_ECRO,                         #      voir[§ 14.7]
|      VERI_BORNE,                        #      voir[§ 14.8]
# Données Matériaux associés à comportements externes
|      /      MFRONT,                     #      voir[§ 15.1]
       /      MFRONT_FO,
|      /      UMAT,                       #      voir[§ 15.2]
```


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

```
                    /      UMAT_FO,
                                  )
```

Remarques :

La commande DEFI_MATERIAU est ré-entrante mais chaque série de paramètres caractéristiques de comportement reste unique. On ne permet pas de remplacer une série de paramètres de comportement déjà présente dans le matériau, mais seulement d'enrichir le concept.

Pour la plupart des comportements de matériau, il est possible de définir des caractéristiques constantes ou bien des caractéristiques dépendant d'une ou plusieurs variables de commandes (voir les commandes AFFE_MATERIAU et AFFE_VARC) sous la forme d'une fonction, d'une nappe ou d'une formule. Les paramètres temps ('INST'), déformation plastique ('EPSI') et abscisse curviligne ('ABSC') peuvent être utilisés dans des cas très particuliers, les comportements pouvant dépendre de ces paramètres le précisent explicitement dans leur description.

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

3 Caractéristiques depuis une table

3.1 Mot clé facteur TABLE

Définition des caractéristiques élastiques linéaires constantes ou fonctions.

3.1.1 Syntaxe

```
|/   TABLE = _F( ♦     TABLE       =     sd_table,          [sd_table]
                ♦     NOM_PARA    =     / 'TEMP',
                                        / ' IRRA ',

                ♦     COMPOR      =     / 'ELAS_FO',
                                        / ' ELAS_ORTH_FO ',
                                        / ' ELAS_COQUE_FO ',
                                         / 'THER_FO',
                                        / ' THER_NL ',
                                        / ' THER_ NL_ ORTH ',

                ◊     INTERPOL    =     / 'LIN',           [DEFAUT]
                                        / 'LOG'
                 ◊     PROL_GAUCHE      =     / 'CONSTANT',
                                        / 'LINEAIRE',
                                        / 'EXCLU',         [DEFAUT]
                 ◊     PROL_DROITE      =     / 'CONSTANT',
                                        / 'LINEAIRE',
                                        / 'EXCLU',         [DEFAUT]
```

L e mot clé TABLE simplifie l'écriture de DEFI_MATERIAU pour certains comportements (COMPOR) en lisant les données depuis une table. La TABLE est utilisé pour créer des fonctions.
Les paramètres sont stoqués en colonne, avec une colonne supplementaire pour donne r l'abscisse des fonctions qui sont crées (NOM_PARA) . Par exemple, la table suivante permet de définir un comportement élastique.

TEMP	E	NU	RHO	ALPHA	TEMP_DEF_ALPHA
20	200	0,3	1000	1,E-5	20,0
50	190	0,3	1000	1,E-5	20,0

4 Caractéristiques élastiques générales

4.1 Mots clés facteur ELAS, ELAS_FO

Définition des caractéristiques élastiques linéaires constantes ou fonctions.

4.1.1 Syntaxe

```
|/   ELAS = _F(  ♦     E           =     yg,                [R]
                ♦     NU          =     nu,                [R]
                ◊     RHO         =     rho,         [R]
                ◊     ALPHA       =     dil   ,            [R]
                ◊     AMOR_ALPHA  =     a_alpha,     [R]
                ◊     AMOR_BETA   =     a_beta,      [R]
```


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

```
                    ◊     AMOR_HYST   =     eta          [R]
                     ◊    LONG_CARA   =      lcara ,     [R]
                    ◊     COEF_AMOR   =     /coeam,      [R]
                                            / 1.0,              [DEFAUT]
                    )
  /    ELAS_FO = _F       (     ♦      E                              =     yg,
                  [fonction]
                                       ♦      NU                             =
       nu,               [fonction]
                                       ◊      RHO                            =     rho
       ,           [fonction]
                                       ◊      ALPHA                          =
       dil   ,           [fonction]
                                       ◊      AMOR_ALPHA          =     a_alpha,
       [fonction]
                                       ◊      AMOR_BETA           =     a_beta,
       [fonction]
                                       ◊      AMOR_HYST           =     eta,
       [fonction]
                                       ◊      TEMP_DEF_ALPHA      =     Tdef,
       [R]
                                       ◊      PRECISION           =     / eps,
             [R]

       / 1.0,            [DEFAUT]
                                       ◊      K_DESSIC            =     / k,
       [R]

       / 0.0,            [DEFAUT]
                                       ◊      B_ENDOGE                  =     / e,
             [R]

       / 0.0,            [DEFAUT]
                                       ◊      FONC_DESORP         =     f
             [fonction]
                                  )
```

La plupart des fonctions peuvent dépendre des variables de commandes (voir [U4.43.03]) ou d'autres paramètres comme le temps (`'INST'` ou la géométrie `'X'`, `'Y'`, `'Z'`)
`'TEMP'`, `'HYDR'`, `'SECH'`, `'NEUT1'`, `'NEUT2'`, `'X'`, `'Y'`, `'Z'`, …
Attention ! Pour la géométrie, il y a deux cas:

- Les variables directes `'X'` , `'Y'` , `'Z'` qui ne fonctionnent que dans quelques cas particuliers;
- La variable de commande `'GEOM'` qui est plus générale;

4.1.2 Opérandes E/NU

`E = yg`
Module de Young. On vérifie que $E \geq 0$.

`NU = nu`
Coefficient de Poisson. On vérifie que $-1. \leq \nu \leq 0.5$.

4.1.3 Opérande RHO

`RHO = rho`
Masse volumique. Pas de vérification de l'ordre de grandeur. Attention pour les modélisations THM en statique, seule la masse volumique homogénéisée renseignée dans `THM_DIFFU` (cf. section 10.7.2)

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

sera prise en compte. Pour les modélisations THM en dynamique, cette valeur doit en revanche être renseignée ici et être cohérente avec celle indiquée dans THM_DIFFU.
Ce mot-clef ne peut-être fonction que de la géométrie via la variable de commande 'GEOM'.

4.1.4 Opérandes ALPHA/TEMP_DEF_ALPHA/PRECISION

ALPHA = alpha
Coefficient de dilatation thermique isotrope.
Le coefficient de dilatation thermique est un coefficient de dilatation moyen qui peut dépendre de la température T.

Les valeurs des coefficients de dilatation sont déterminées par des essais de dilatométrie qui ont lieu à la température ambiante ($0°C$ ou plus généralement $20°C$).

De ce fait, on dispose en général des valeurs du coefficient de dilatation défini par rapport à $20°C$ (température à laquelle on suppose la déformation thermique nulle).

Certaines études nécessitent de prendre une température de référence différente de la température ambiante (déformation thermique nulle pour une autre température que la température ambiante). Il faut alors effectuer un changement de repère dans le calcul de la déformation thermique [R4.08.01].

TEMP_DEF_ALPHA = Tdef [R]
C'est la valeur de la température à laquelle les valeurs du coefficient de dilatation thermique ont été déterminées, et ont été renseignées sous le mot clé ALPHA.
Ce mot clé devient obligatoire dès que l'on a renseigné ALPHA.

Pour les comportements non-THM, le calcul de la déformation thermique se fait par la formule [R4.08.01] :

$$e^{th}(T)=\hat{\alpha}(T)(T-T_{ref}) \text{ avec } \hat{\alpha}(T)=\frac{\alpha(T)(T-T_{def})-\alpha(T_{ref})(T_{ref}-T_{def})}{T-T_{ref}}$$

et

$$e^{th}(T_{ref})=0$$

Remarque :
Il n'est pas possible d'utiliser une formule ni une nappe pour ALPHA, en raison des modifications à prendre en compte décrites ci-dessus. Le paramètre ALPHA ne peut dépendre QUE de la température et à condition que ce soit une fonction. L'utilisateur, s'il désire utiliser une formule, doit d'abord la tabuler à l'aide de la commande CALC_FONC_INTERP.

PRECISION = / prec
/ 1. [DEFAUT]

Ce mot clé est utilisé lorsque le mot clé TEMP_DEF_ALPHA est spécifié.

C'est un réel qui indique avec quelle précision une température T_i (de la liste des températures servant à la définition de $\alpha(T_i)_{i=1,N}$) est proche de la température de référence T_{ref}.
Ce réel sert au calcul de la fonction $\hat{\alpha}(T_i)$. La formule mathématique permettant le calcul de $\hat{\alpha}(T_i)$ est différente selon que $T_i \neq T_{ref}$ ou $T_i = T_{ref}$.

En THM, le calcul de la déformation thermique est différent (voir [R4.08.01]). La déformation thermique s'évalue par la formule suivante:

$$e^{th}(T)=\alpha(T-T_{ini})$$

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

En particulier, on n'utilise pas TEMP_DEF_ALPHA (mais on doit le renseigner) et ALPHA ne peut pas être une fonction, c'est nécessairement une constante. De plus, la température de référence est donnée par THM_INIT/TEMP (voir §10.2).

4.1.5 Opérandes AMOR_ALPHA / AMOR_BETA / AMOR_HYST

AMOR_ALPHA = a_alpha
AMOR_BETA = a_beta
Coefficients α et β permettant de construire une matrice d'amortissement visqueux proportionnel à la rigidité et/ou à la masse $[\mathbf{C}]=\alpha[\mathbf{K}]+\beta[\mathbf{M}]$. On se reportera aux documents de modélisation de l'amortissement mécanique [U2.06.03] et [R5.05.04].

AMOR_HYST = eta
Coefficient η d'amortissement hystérétique permettant de définir le module d'Young complexe (matériau visco-élastique) à partir duquel sera créée la matrice de rigidité complexe permettant le calcul de la réponse harmonique [U2.06.03] et [R5.05.04].

Remarques :
- *La présence des mots clés AMOR_ALPHA et AMOR_BETA associés à une valeur nulle, peut conduire, dans certains algorithmes, à assembler une matrice d'amortissement et engendre ainsi des coût de calcul supplémentaires.*
- Ces mots-clefs peuvent dépendre de la géométrie via les variables directes 'X', 'Y' et 'Z' mais pas de la variable de commande 'GEOM'.

4.1.6 Opérandes COEF_AMOR / LONG_CARA

Pour la justification de l'emploi de ces opérandes, on se reportera aux documents de modélisation des éléments de frontière absorbante [R4.02.05].

COEF_AMOR = coeam
Coefficient intervenant dans l'expression du vecteur contrainte intégré le long de la frontière absorbante du domaine éléments finis et qui correspond à des amortisseurs visqueux distribués le long de cette frontière :

$$\mathbf{t_0}=coeam\left(\rho c_P \frac{\partial u_3}{\partial t}\mathbf{e_3}+\rho c_S \frac{\partial \mathbf{u}'}{\partial t}\right)$$

Ce terme est affecté au matériau constitutif de l'élément de frontière absorbante.

LONG_CARA = lcara
Coefficient correspondant à une dimension caractéristique L. Associé aux coefficients de Lamé λ et μ, ce coefficient intervient dans l'expression du terme ajouté de vecteur contrainte intégré le long de la frontière absorbante du domaine éléments finis, qui correspond à des rigidités distribuées le long de cette frontière du domaine éléments finis :

$$\mathbf{t_1}=\frac{\lambda+2\mu}{L}u_3\mathbf{e_3}+\frac{\mu}{L}\mathbf{u}'$$

Ce terme est affecté au matériau constitutif de l'élément de frontière absorbante.

Remarque :
L'absence du mot clé LONG_CARA a pour effet qu'on n'affecte pas de rigidité ajoutée sur la frontière absorbante.

4.1.7 Opérandes K_DESSIC / B_ENDOGE

K_DESSIC = k
Coefficient de retrait de dessiccation.

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

K_ENDOGE = e
Coefficient de retrait endogène.

Ces caractéristiques sont utilisées avec les comportements du béton (voir réf.[R7.01.12]).

4.1.8 Opérande FONC_DESORP

FONC_DESORP = f
courbe de sorption-désorption [R7.01.12] donnant l'hygrométrie h en fonction de la teneur en eau C .

4.2 Mot clé ELAS_VISCO

Le mot clé ELAS_VISCO permet de définir des matériaux viscoélastiques isotropes pour une fréquence donnée. Il s'agit simplement de la définition d'un matériau élastique dont les modules d'élasticités sont complexes.

4.2.1 Syntaxe

```
|/   ELAS = _F        (     ♦     G                          =     g,
                [C]
                                  ♦     NU                         =
     nu,               [C]
                                   ◊     RHO                        =
      rho ,            [R]
                              )
```

4.2.2 Opérandes G/NU

G = g
Module de cisaillement complexe.

NU = nu
Coefficient de Poisson complexe.

Remarque : Dans le fichier de commandes il faut nécessairement renseigner des nombres complexes même si la partie imaginaire est nulle, par exemple si nu est réel, il fait renseigner ' *complex(nu,0)* '

4.2.3 Opérande RHO

RHO = rho
Masse volumique. Pas de vérification de l'ordre de grandeur.

4.3 Mot clé facteur ELAS_FLUI

Le mot clé ELAS_FLUI permet de définir la masse volumique équivalente d'une structure tubulaire avec fluide interne et externe, en prenant en compte l'effet de confinement.

Cette opération s'inscrit dans le cadre de l'étude du comportement dynamique d'une configuration du type "faisceau de tubes sous écoulement transverse". L'étude du comportement du faisceau est ramenée à l'étude d'un tube unique représentatif de l'ensemble du faisceau. Cf. [U4.35.02].

La masse volumique équivalente de la structure ρ_{eq} est définie par :

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

$$\rho_{eq}=\frac{1}{(d_e^2-d_i^2)}\left[\rho_{i.}\,d_i^2+\rho_{t.}\,(d_e^2-d_i^2)+\rho_e.\,d_e^2\right]$$

$$d_{eq}^2=\frac{2.C_m.\,d_e^2}{\pi}$$

ρ_i , ρ_e , ρ_t sont respectivement la masse volumique du fluide, du fluide externe et de la structure.
d_e , d_i sont respectivement le diamètre externe et interne du tube.
C_m est un coefficient de masse ajoutée (qui définit le confinement).

4.3.1 Syntaxe

```
|     ELAS_FLUI = _F    (
                                ♦ RHO                    = rho,
                [R]
                                ♦ E                           = yg,
                [R]
                                ♦ NU                     = nu,
          [R]
                                ♦ PROF_RHO_F_INT  = rhoi,
      [fonction]
                                ♦ PROF_RHO_F_EXT  = rhoe,
      [fonction]
                                ♦ COEF_MASS_AJOU  = fonc_cm
      [fonction]
                            )
```

4.3.2 Opérandes RHO/E/NU

RHO = rho
Masse volumique du matériau.

E = yg
Module de Young.

NU = nu
Coefficient de Poisson.

4.3.3 Opérandes PROF_RHO_F_INT/PROF_RHO_F_EXIT/COEF_MASS_AJOU

PROF_RHO_F_INT = rhoi
Concept de type [fonction] définissant le profil de masse volumique du fluide interne le long du tube. Cette fonction est paramétrée par l'abscisse curviligne.

PROF_RHO_F_EXT = rhoe
Concept de type [fonction] définissant le profil de masse volumique du fluide externe le long du tube. Cette fonction est paramétrée par l'abscisse curviligne, 'ABSC'.

COEF_MASS_AJOU = fonc_cm
Concept de type [fonction] produit par l'opérateur FONC_FLUI_STRU [U4.35.02].
Cette fonction constante, paramétrée par l'abscisse curviligne, fournit la valeur du coefficient de masse ajoutée C_m .

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

4.4 Mot clé facteur CABLE

Définition de la caractéristique élastique non linéaire, constante, pour les câbles : deux comportements élastiques différents en traction et en compression, définis par les modules de Young E et EC (module en compression).
Les caractéristiques standard du matériau élastique sont à renseigner sous le mot clé facteur ELAS.

4.4.1 Syntaxe

```
|     CABLE = _F  (
                                ◊     EC_SUR_E   =            /
ecse,       [R]
                                                              /
1.D-4,            [DEFAUT]
                                )
```

4.4.2 Opérandes d'élasticité

◊ EC_SUR_E = ecse
Rapport des modules à la compression et à la traction. Si le module de compression est nul, le système linéaire global aux déplacements peut devenir singulier. C'est le cas lorsqu'un nœud n'est connecté qu'à des câbles et que ceux-ci entrent tous en compression.

4.5 Mots clés facteur ELAS_ORTH, ELAS_ORTH_FO, ELAS_VISCO_ORTH

Définition des caractéristiques élastiques orthotropes constantes ou fonctions de la température pour les éléments massifs isoparamétriques ou les couches constitutives d'un composite [R4.01.02]. Il est possible de définir des caractéristiques viscoélastiques orthotropes constantes (ELAS_VISCO_ORTH) à une fréquence donnée, les modules à renseigner sont alors complexes.

4.5.1 Syntaxe

```
| /   ELAS_ORTH = _F(
                                ♦     E_L              =     ygl   ,
                  [R]
                                ♦     E_T              =     ygt   ,
                  [R]
                                ◊     E_N              =     ygn   ,
                  [R]
                                ♦     G_LT             =     glt   ,
                  [R]
                                ◊     G_TN             =     gtn   ,
                  [R]
                                ◊     G_LN             =     gln   ,
                  [R]
                                ♦     NU_LT            =     nult,
            [R]
                                ◊     NU_TN            =     nutn,
            [R]
                                ◊     NU_LN            =     nuln,
                  [R]
                                ◊     ALPHA_L          =     / dil,
                  [R]
                                                               /
0.0,              [DEFAUT]
                                ◊     ALPHA_T          =     / dit,
                  [R]
                                                               /
0.0,              [DEFAUT]
```


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

```
                                        ◊  ALPHA_N        =  / din,
            [R]
                                                             /
    0.0,            [DEFAUT]
                                        ◊  RHO            =    / rho,
                    [R]
                                                             /
    0.0,            [DEFAUT]
                                        ◊  XT         =    / trl,
            [R]
                                                             /
    1.0,            [DEFAUT]
                                        ◊  XC         =    / col,
            [R]
                                                             /
    1.0,            [DEFAUT]
                                        ◊  YT             =    / trt,
                    [R]
                                                             /
    1.0,            [DEFAUT]
                                        ◊  YC             =    / cot,
                    [R]
                                                             /
    1.0,            [DEFAUT]
                                        ◊  S_LT           =    / cis,
                    [R]
                                                             /
    1.0,            [DEFAUT]
                                        ◊  AMOR_ALPHA  =    a_alpha,
        [R]
                                        ◊  AMOR_BETA   =    a_beta,
        [R]
                                        ◊  AMOR_HYST   =    eta
        [R]
    )
      /   ELAS_ORTH_FO =_F  (
                                        ♦  E_L                =    ygl
        ,           [fonction]
                                        ♦  E_T                =    ygt
        ,           [fonction]
                                        ♦  E_N                =    ygn
        ,           [fonction]
                                        ♦  G_LT               =    glt
        ,           [fonction]
                                        ♦  G_TN               =    gtn
        ,           [fonction]
                                        ♦  G_LN               =    gln
        ,           [fonction]
                                        ♦  NU_LT              =
        nult,       [fonction]
                                        ♦  NU_TN              =
        nutn,       [fonction]
                                        ♦  NU_LN              =
        nuln,       [fonction]
                                        ◊  ALPHA_L            =    dil
        ,           [fonction]
                                        ◊  ALPHA_T            =    dit
        ,           [fonction]
                                        ◊  ALPHA_N            =    din
        ,           [fonction]
                                        ◊  RHO                =    rho,
              [fonction]
```


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

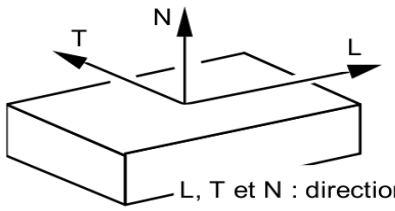
```
                                        ◊   TEMP_DEF_ALPHA    =    Tdef,
        [R]
                                        ◊   PRECISION         =    /eps,
        [R]

        /1.,          [DEFAUT]
                                        ◊   AMOR_ALPHA        =    a_alpha,
        [fonction]
                                        ◊   AMOR_BETA         =    a_beta,
        [fonction]
                                        ◊   AMOR_HYST         =    eta,
        [fonction]
          /   ELAS_VISCO_ORTH = _F(
                                        ♦   E_L               =    ygl   ,
                    [C]
                                        ♦   E_T               =    ygt   ,
                    [C]
                                        ◊   E_N               =    ygn   ,
                    [C]
                                        ♦   G_LT              =    glt   ,
                    [C]
                                        ◊   G_TN              =    gtn   ,
                    [C]
                                        ◊   G_LN              =    gln   ,
                    [C]
                                        ♦   NU_LT             =    nult,
              [C]
                                        ◊   NU_TN             =    nutn,
              [C]
                                        ◊   NU_LN             =    nuln,
                    [C]
                                        ◊   RHO               =    / rho,
                    [R]
                                                                        /
        0.0,              [DEFAUT]
                                        )
```

4.5.2 Opérandes d'élasticité

Pour définir le repère d'orthotropie (L, T, N) lié aux éléments, le lecteur se reportera :

- pour les éléments massifs isoparamétriques à la documentation [U4.42.01] AFFE_CARA_ELEM mot-clé MASSIF,
- pour les éléments de coques composites à la documentation [U4.42.01] AFFE_CARA_ELEM mot-clé COQUE ainsi qu'à la documentation [U4.42.03] DEFI_COMPOSITE mot-clé ORIENTATION.



L, T et N : directions d'orthotropie longitudinale, transversale et normale

E_L = ygl Module de Young longitudinal.

E_T = ygt Module de Young transversal.

E_N = ygn Module de Young normal.

GL_T = glt Module de cisaillement dans le plan LT.

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

G_TN = gtn Module de cisaillement dans le plan TN.

G_LN = gln Module de cisaillement dans le plan LN.

Remarque :

Pour les coques, les modules de cisaillement transversaux ne sont pas obligatoires ; dans ce cas, on calcule en coque mince en affectant une rigidité infinie au cisaillement transversal (éléments DST , DSQ et Q4G).

NU_LT = nult coefficient de Poisson dans le plan LT.

Remarques importantes :

$nult$ n'est pas égal à $nutl$. En fait, on a la relation : $nutl = \frac{ygt}{ygl}.nult$

$nult$ doit s'interpréter de la manière suivante :

si l'on exerce une traction selon l'axe L donnant lieu à une déformation selon cet axe égale à $\varepsilon_L = \frac{\sigma_L}{ygl}$, on a une déformation selon l'axe T égale à : $\varepsilon_T = -nult.\frac{\sigma_L}{ygl}$.

Les différents coefficients d'élasticité E_L, G_LN et NU_LN ne peuvent pas être choisis de façon quelconque : physiquement, il faut toujours qu'une déformation non nulle provoque une énergie de déformation strictement positive. Cela se traduit par le fait que la matrice de Hooke doit être définie positive. L'opérateur DEFI_MATERIAU calcule les valeurs propres de cette matrice et émet une alarme si cette propriété n'est pas vérifiée.
Pour les modèles 2D, comme l'utilisateur n'a pas encore choisi sa MODELISATION (D_PLAN, C_PLAN, ...), on vérifie la positivité de la matrice dans les différents cas de figure.

NU_TN = nutn Coefficient de Poisson dans le plan TN.

NU_LN = nuln Coefficient de Poisson dans le plan LN.

La remarque faite pour NU_LT est à appliquer à ces deux derniers coefficients. On a ainsi les relations :

$$nunt = \frac{ygn}{ygt}.nutn$$
$$nunl = \frac{ygn}{ygt}.nuln$$

Remarque :

Dans le fichier de commandes il faut nécessairement renseigner des nombres complexes même si la partie imaginaire est nulle, par exemple si nult est réel, il fait renseigner ' *complex(nu lt ,0)* '

4.5.3 Cas particulier de l'élasticité cubique

L'élasticité cubique correspond à une matrice d'élasticité de la forme :

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

$$\begin{matrix} y_{1111} & y_{1122} & y_{1122} & & & & \\ y_{1122} & y_{1111} & y_{1122} & & & & \\ y_{1122} & y_{1122} & y_{1111} & & & & \\ & & & y_{1212} & & & \\ & & & & y_{1212} & & \\ & & & & & y_{1212} & \end{matrix}$$

Étant donné la symétrie cubique, il reste à déterminer 3 coefficients :

$$E_L = E_N = E_T = E\,, G_{\mathrm{LT}} = G_{\mathrm{LN}} = G_{\mathrm{TN}} = G\,, \nu_{\mathrm{LN}} = \nu_{\mathrm{LT}} = \nu_{\mathrm{LN}} = \nu$$

Pour reproduire l'élasticité cubique avec ELAS_ORTH, il suffit de calculer les coefficients de l'orthotropie tels que la matrice d'élasticité obtenue soit de la forme ci-dessus :

$$y_{1111} = \frac{E(1-\nu^2)}{(1-3\nu^2-2\nu^3)}$$
$$y_{1122} = \frac{E\nu(1+\nu)}{(1-3\nu^2-2\nu^3)}$$
$$y_{1212} = G_{\mathrm{LT}} = G_{\mathrm{ln}} = G_{TN}$$

donc, tant que $(1-3\nu^2-2\nu^3)\neq 0$ (c'est à dire ν différent de 0.5).

$\frac{y_{1122}}{y_{1111}} = \frac{\nu}{1-\nu}$ ce qui fournit $\nu = \frac{1}{1+\frac{y_{1111}}{y_{1122}}}$ puis $E = y_{1111}\frac{(1-3\nu^2-2\nu^3)}{(1-\nu^2)}$

4.5.4 Opérande RHO

RHO = rho
Masse volumique.

4.5.5 Opérandes ALPHA_L / ALPHA_T / ALPHA_N

ALPHA_L = dil
Cœfficient de dilatation thermique moyen longitudinal.

ALPHA_T = dit
Coefficient de dilatation thermique moyen transversal.

ALPHA_N = din
Coefficient de dilatation thermique moyen normal.

4.5.6 Opérandes TEMP_DEF_ALPHA / PRECISION

On se reportera au paragraphe [§3.1.4]. Ce mot clé devient obligatoire dès que l'on a renseigné ALPHA_L , ou ALPHA_T ou ALPHA_N.

4.5.7 Critères de rupture

XT = trl
Critère de rupture en traction dans le sens longitudinal (première direction d'orthotropie).

XC = col

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

Critère de rupture en compression dans le sens longitudinal.

YT = trt
Critère de rupture en traction dans le sens transversal (seconde direction d'orthotropie).

YC = cot
Critère de rupture en compression dans le sens transversal.

S_LT = cis
Critère de rupture en cisaillement dans le plan LT.

4.5.8 Opérandes AMOR_ALPHA / AMOR_BETA / AMOR_HYST

Voir § 4.1.5

Remarque :
Dans le cas des coques multi-couches, (utilisation de DEFI_COMPOSITE) ces paramètres ne sont pas pris en compte.

4.6 Mots clés facteur ELAS_ISTR, ELAS_ISTR_FO, ELAS_VISCO_ISTR

Définition des caractéristiques élastiques constantes (ELAS_ISTR) ou fonctions de la température dans le cas de l'isotropie transverse pour les éléments massifs isoparamétriques (ELAS_ISTR_FO). Il est possible de définir des caractéristiques viscoélastiques isotropes transverses constantes (ELAS_VISCO_ISTR) à une fréquence donnée, les modules à renseigner sont alors complexes.
En reprenant les mêmes notations que pour l'orthotropie, l'isotropie transverse signifie ici que l'isotropie est dans le plan (L,T) et que l'orthotropie est donc portée par la direction N [R4.01.02].
On peut attirer l'attention du lecteur sur le fait que cette convention diffère d'une convention usuelle qui désigne par « direction longitudinale » la direction d'orthotropie des matériaux transverses isotropes.

4.6.1 Syntaxe

```
| /   ELAS_ISTR = _F     (
                                          ♦      E_L                    =
      ygl    ,            [R]
                                          ♦      E_N                    =
      ygn    ,            [R]
                                          ♦      G_LN                   =
      gln    ,            [R]
                                          ♦      NU_LT                  =
      nult,         [R]
                                          ♦      NU_LN                  =
      nuln,         [R]
                                          ◊      ALPHA_L                =
      / dil,              [R]

            / 0.0,                [DEFAUT]
                                          ◊      ALPHA_N                =
      / din,              [R]

            / 0.0,                [DEFAUT]
                                          ◊      RHO                    =
      / rho,              [R]

            / 0.0,                [DEFAUT]
```


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

```
                                        )
      / ELAS_ISTR_FO =_F  (
                                                ♦   E_L                 =
        ygl   ,           [fonction]
                                                ♦   E_N                 =
        ygn   ,           [fonction]
                                                ♦   G_LN                =
        gln   ,           [fonction]
                                                ♦   NU_LT               =
        nult,       [fonction]
                                                ♦   NU_LN               =
        nuln,       [fonction]
                                                ◊   ALPHA_L             =
        dil   ,           [fonction]
                                                ◊   ALPHA_N             =
        din   ,           [fonction]
                                                ◊   RHO                 =
        rho,        [fonction]
                                                ◊   TEMP_DEF_ALPHA   =
        Tdef,       [R]
                                                ◊   PRECISION        =   /
    eps,       [R]

             / 1.0       [DEFAUT]
    /   ELAS_VISCO_ISTR = _F   (
                                                ♦   E_L                 =
        ygl   ,           [C]
                                                ♦   E_N                 =
        ygn   ,           [C]
                                                ♦   G_LN                =
        gln   ,           [C]
                                                ♦   NU_LT               =
        nult,       [C]
                                                ♦   NU_LN               =
        nuln,       [C]
                                                ◊   RHO                 =
        / rho,            [R]

             / 0.0,             [DEFAUT]
                                        )
```

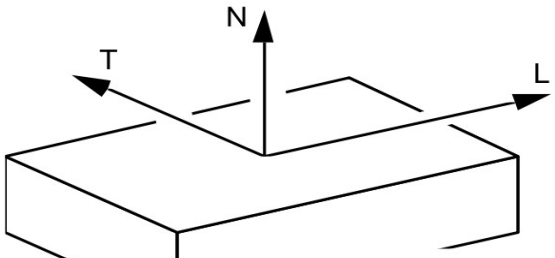
4.6.2 Opérandes d'élasticité

Pour définir un repère (L, T, N) lié aux éléments et définissant l'isotropie transverse du matériau, ce dernier étant isotrope dans le plan LT, le lecteur se reportera à la documentation [U4.42.01] AFFE_CARA_ELEM mot-clé MASSIF.

Remarque :

Les directions L et T sont arbitraires dans le plan LT.

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



L et T définissent le plan dans lequel le matériau a un caractère isotrope

E_L = ygl
Module de Young dans le plan LT.

E_N = ygn
Module de Young normal.

GL_N = gln
Module de cisaillement dans le plan LN.

Remarque :

Le module de cisaillement dans le plan LT est défini par la formule usuelle pour les matériaux isotropes : $G=\frac{E}{2(1+\nu)}$ soit ici $glt=\frac{ygl}{2(1+nult)}$.

NU_LT = nult
Coefficient de Poisson dans le plan LT.

NU_LN = nuln
Coefficient de Poisson dans le plan LN.

Remarques importantes :

$nult=nutl$ puisque le matériau a un caractère isotrope dans la plan LT, mais $nuln$ n'est pas égal à $nunl$.

On a la relation : $nunl=\frac{ygn}{ygl}.nuln$

$nunl$ doit s'interpréter de la manière suivante :

si l'on exerce une traction selon l'axe N donnant lieu à une déformation de traction selon cet axe égale à $\varepsilon_N=\frac{\sigma_N}{ygn}$, on a une compression selon l'axe L égale à : $nunl.\frac{\sigma_N}{ygn}$.

Les différents coefficients d'élasticité E_L, G_LN et NU_LN ne peuvent pas être choisis de façon quelconque : physiquement, il faut toujours qu'une déformation non nulle provoque une énergie de déformation strictement positive. Cela se traduit par le fait que la matrice de Hooke doit être définie positive. L'opérateur DEFI_MATERIAU calcule les valeurs propres de cette matrice et émet une alarme si cette propriété n'est pas vérifiée.
Pour les modèles 2D, comme l'utilisateur n'a pas encore choisi sa MODELISATION (D_PLAN, C_PLAN, ...), on vérifie la positivité de la matrice dans les différents cas de figure.

4.6.3 Opérande RHO

RHO = rho
Masse volumique.

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

4.6.4 Opérandes ALPHA_L / ALPHA_N

ALPHA_L = dil
Coefficient de dilatation thermique moyen dans le plan LT.

ALPHA_N = din
Coefficient de dilatation thermique moyen normal.

4.6.5 Opérandes TEMP_DEF_ALPHA / PRECISION

On se reportera au paragraphe [§3.1.4]. Ce mot clé devient obligatoire dès que l'on a renseigné le mot clé ALPHA_L ou ALPHA_N.

4.7 Mot clés facteur ELAS_COQUE , ELAS_COQUE_FO

ELAS_COQUE permet à l'utilisateur de fournir directement les coefficients de la matrice d'élasticité (décomposée en membrane et flexion) des coques minces orthotropes en élasticité linéaire [R3.07.03].

4.7.1 Syntaxe

```
|/    ELAS_COQUE  = _F  (
 /    ELAS_COQUE_FO     = _F
                  ◊     RHO          =     / rho ,     [R]
                                           / 0.0,      [DEFAUT]
                  ◊     ALPHA        =     / alpha ,   [R]
                                           / 0.0,      [DEFAUT]
                  ◊     MEMB_L       =     C1111 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     MEMB_LT      =     C1122 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     MEMB_T       =     C2222 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     MEMB_G_LT    =     C1212 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     FLEX_L       =     D1111 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     FLEX_LT      =     D1122 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     FLEX_T       =     D2222 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     FLEX_G_LT    =     D1212 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     CISA_L       =     G11   ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     CISA_T       =     G22   ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     M_LLLL       =     H1111 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     M_LLTT       =     H1122 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     M_LLLT       =     H1112 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     M_TTTT       =     H2222 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     M_TTLT       =     H2212 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     M_LTLT       =     H1212 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     F_LLLL       =     A1111 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     F_LLTT       =     A1122 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     F_LLLT       =     A1112 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     F_TTTT       =     A2222 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     F_TTLT       =     A2212 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     F_LTLT       =     A1212 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     MF_LLLL      =     B1111 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     MF_LLTT      =     B1122 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     MF_LLLT      =     B1112 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     MF_TTTT      =     B2222 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     MF_TTLT      =     B2212 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     MF_LTLT      =     B1212 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     MC_LLLZ      =     E1113 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     MC_LLTZ      =     E1123 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     MC_TTLZ      =     E2213 ,     [R] ou [fonction]
                  ◊     MC_TTTZ      =     E2223 ,     [R] ou [fonction]
```


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

```
◊     MC_LTLZ     =     E1213 ,     [R] ou [fonction]
◊     MC_LTTZ     =     E1223 ,     [R] ou [fonction]
◊     FC_LLLZ     =     F1113 ,     [R] ou [fonction]
◊     FC_LLTZ     =     F1123 ,     [R] ou [fonction]
◊     FC_TTLZ     =     F2213 ,     [R] ou [fonction]
◊     FC_TTTZ     =     F2223 ,     [R] ou [fonction]
◊     FC_LTLZ     =     F1213 ,     [R] ou [fonction]
◊     FC_LTTZ     =     F1223 ,     [R] ou [fonction]
◊     C_LZLZ      =     G1313 ,     [R] ou [fonction]
◊     C_LZTZ      =     G1323       [R] ou [fonction]
◊     C_TZTZ      =     G2323 ,     [R] ou [fonction]
                        )
```

L'utilisateur peut également indiquer un coefficient de dilatation thermique isotrope `alpha` et une masse par unité de surface `rho`.
En revanche, on se limite aux cas où le coefficient de dilatation thermique est homogène isotrope.

Les matrices de comportement élastique intervenant dans la matrice de rigidité en élasticité homogène isotrope sont de la forme :

Membrane :	Flexion :	Cisaillement :
$\mathbf{C}=\frac{Eh}{1-\nu^2}\begin{pmatrix}1 & \nu & 0\\ \nu & 1 & 0\\ 0 & 0 & \left(\frac{1-\nu}{2}\right)\end{pmatrix}$	$\mathbf{D}=\frac{E\,h^3}{12\left(1-\nu^2\right)}\begin{pmatrix}1 & \nu & 0\\ \nu & 1 & 0\\ 0 & 0 & \left(\frac{1-\nu}{2}\right)\end{pmatrix}$	$\mathbf{G}=\frac{5\,Eh}{12\left(1+\nu\right)}\begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{pmatrix}$

Pour les coques orthotropes dont les modules d'élasticité sont obtenus par une méthode d'homogénéisation, il n'est pas possible dans le cas général de trouver un module de Young équivalent Eeq , et une épaisseur équivalente heq pour retrouver les expressions précédentes.

Les matrices de rigidité élastique en absence de couplage reliant les efforts généralisés aux déformations généralisées sont donc données directement sous la forme :

Membrane : $\mathbf{C}=\begin{pmatrix}C1111 & C1122 & 0\\ C1122 & C2222 & 0\\ 0 & 0 & C1212\end{pmatrix}$

Flexion : $\mathbf{D}=\begin{pmatrix}D1111 & D1122 & 0\\ D1122 & D2222 & 0\\ 0 & 0 & D1212\end{pmatrix}$

Cisaillement : $\mathbf{G}=\begin{pmatrix}G11 & 0\\ 0 & G22\end{pmatrix}$

Ces coefficients sont à fournir dans le repère local de l'élément. Celui-ci est défini sous le mot-clé `COQUE` de `AFFE_CARA_ELEM` [U4.42.01].

Remarque concernant la prise en compte du cisaillement transverse suivant les modèles de coques :

Si on souhaite utiliser `ELAS_COQUE` avec du cisaillement transverse il faut nécessairement employer la modélisation `DST`. Si on utilise la modélisation `DKT`, le cisaillement transverse ne sera pas pris en compte, quelque soient les valeurs de $G11$ et $G22$. La correspondance pour un matériau isotrope est la suivante :

- *Le matériau `ELAS_COQUE`, modélisation `DST` avec $CISA_*=5/12\times(Eh/(1+nu))$ est équivalent au matériau `ELAS`, modélisation `DST`.*
- *Le matériau `ELAS_COQUE`, modélisation `DST` avec $CISA_*=5/12\times(Eh/(1+nu))\times N$, où N est un grand nombre (par exemple 10^5), est équivalent au matériau `ELAS`, modélisation `DKT`.*
- *Le matériau `ELAS_COQUE` , modélisation `DKT` est équivalent au matériau `ELAS`, modélisation `DKT`.*

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

Dans le cas où l'on doit prendre en compte les termes de couplage, les matrices de rigidité élastique reliant les efforts généralisés aux déformations généralisées pour les éléments de plaque sont définies de la façon suivante :

Membrane :

$$HM = \begin{vmatrix} H\,1111 & H\,1122 & H\,1112 \\ sym & H\,2222 & H\,2212 \\ sym & sym & H\,1212 \end{vmatrix}$$

Flexion :

$$HF = \begin{vmatrix} A\,1111 & A\,1122 & A\,1112 \\ sym & A\,2222 & A\,2212 \\ sym & sym & A\,1212 \end{vmatrix}$$

Membrane-Flexion :

$$HMF = \begin{vmatrix} B\,1111 & B\,1122 & B\,1112 \\ sym & B\,2222 & B\,2212 \\ sym & sym & B\,1212 \end{vmatrix}$$

Membrane-cisaillement :

$$HMC = \begin{vmatrix} E\,1113 & E\,1123 \\ E\,2213 & E\,2223 \\ E\,1213 & E\,1223 \end{vmatrix}$$

Flexion-cisaillement :

$$HFC = \begin{vmatrix} F\,1113 & F\,1123 \\ F\,2213 & F\,2223 \\ F\,1213 & F\,1223 \end{vmatrix}$$

Cisaillement :

$$HC = \begin{vmatrix} G\,1313 & G\,1323 \\ G\,1323 & G\,2323 \end{vmatrix}$$

4.8 Mot clé facteur ELAS_MEMBRANE

ELAS_MEMBRANE permet à l'utilisateur de fournir directement les coefficients de la matrice d'élasticité des membranes anisotropes en élasticité linéaire.

4.8.1 Syntaxe

```
|/    ELAS_MEMBRANE      = _F  (
                           ◊     RHO              =     / rho ,      [R]
                                                      / 0.0,       [DEFAUT]
                           ◊     ALPHA            =     / alpha ,    [R]
                                                      / 0.0,       [DEFAUT]
                           ♦     M_LLLL           =     H1111 ,      [R]
                           ♦     M_LLTT           =     H1122 ,      [R]
                           ♦     M_LLLT           =     H1112 ,      [R]
                           ♦     M_TTTT           =     H2222 ,      [R]
                           ♦     M_TTLT           =     H2212 ,      [R]
                           ♦     M_LTLT           =     H1212 ,      [R]
                                                )
```

La matrice de rigidité élastique reliant les contraintes membranaires aux déformations membranaires pour les éléments de membrane est définie de la façon suivante :

$$\mathbf{H_M} = \begin{pmatrix} H\,1111 & H\,1122 & H\,1112 \\ H\,1122 & H\,2222 & H\,2212 \\ H\,1112 & H\,2212 & H\,1212 \end{pmatrix}$$

D ans le cas d'une membrane élastique isotrope, on doit retrouver la matrice :

$$\frac{Eh}{1-\nu^2}\begin{pmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{1-\nu}{2}\right) \end{pmatrix}$$

Ces coefficients sont à fournir dans le repère local de l'élément, défini sous le mot-clé facteur MEMBRANE de la commande AFFE_CARA_ELEM [U4.42.01]. Ces coefficients ont la dimension d'une force par mètre. Rappelons que l'on utilise les conventions de notation suivantes pour les déformations et les contraintes membranaires, et que les coefficients de la matrice précédente doivent être adaptés en conséquence :

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \sqrt{2}\,\varepsilon_{12} \end{pmatrix} \qquad \sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sqrt{2}\,\sigma_{12} \end{pmatrix}$$

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

L'utilisateur peut également indiquer un coefficient de dilatation thermique isotrope `alpha` et une masse par unité de surface `rho`.

4.9 Mot clé facteur ELAS_HYPER

Définition des caractéristiques hyper-élastiques de type Signorini [R5.03.19]. Les contraintes de Piola Kirchhoff $\mathbf{S}$ sont reliées aux déformations de Green-Lagrange par :

$$\mathbf{S}=\frac{\partial \Psi}{\partial \mathbf{E}} \quad \text{avec :} \quad \Psi=C_{10}\left(I_1-3\right)+C_{01}\left(I_2-3\right)+C_{20}\left(I_1-3\right)^2+\frac{1}{2}K\left(J-1\right)^2 \quad \text{et}$$

$$I_1=I_c J^{-\frac{2}{3}}, I_2=II_c J^{-\frac{4}{3}}, J=III_c^{\frac{1}{2}}$$

où I_c, II_c et III_c sont les 3 invariants de tenseur de Cauchy-Green droit.

4.9.1 Syntaxe

```
|     ELAS_HYPER= _F (
                  ♦     C10          =     c10,              [R]
                  ◊     C01          =     / c01,            [R]
                                           / 0.0,            [DEFAUT]
                  ◊     C20          =     / c20,            [R]
                                           / 0.0,            [DEFAUT]
                  ◊     RHO          =     / rho,            [R]
                                           / 0.0,            [DEFAUT]
                  ◊     NU           =     nu,               [R]
                  ◊     K            =     k                 [R]
                                           )
```

4.9.2 Opérandes C01, C10 et C20

`C01 = c01 ,C10 = c10,C20 = c20`

Les trois coefficients de l'expression polynomiale du potentiel hyperélastique. L'unité est le N/m^2.

•Si C_{01} et C_{20} sont nuls, on obtient un matériau de type Néo-Hookéen.

•Si seul C_{20} est nul, on obtient un matériau de type Mooney-Rivlin.

Le matériau est élastique incompressible en petites déformations si on prend C_{10} et C_{01} tels que $6\left(C_{01}+C_{10}\right)=E$, où E est le module de Young.

4.9.3 Opérande NU et K

`NU = nu`

Coefficient de Poisson. On vérifie que $-1<nu<0.5$.

`K = k`

Module de compressibilité.

Ces deux paramètres s'excluent l'un et l'autre. Ils quantifient la presque-compressibilité du matériau On utilise le module de compressibilité K fourni par l'utilisateur, s'il existe. Sinon on calcule K par :

$$K=\frac{6\left(C_{01}+C_{10}\right)}{3\left(1-2\nu\right)}.$$

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

On peut prendre nu proche de 0.5 mais jamais strictement égal (à la précision machine près). Si nu est trop proche de 0.5, un message d'erreur invite l'utilisateur à vérifier son coefficient de Poisson ou son module de compressibilité. Plus le module de compressibilité est grand, plus le matériau est incompressible.

4.9.4 Opérande RHO

RHO = rho
Masse volumique constante réelle (on n'accepte pas de concept de type fonction). Pas de vérification de l'ordre de grandeur.

4.10 Mot clé facteur ELAS_2NDG

Définition des caractéristiques élastiques linéaires isotropes du modèle second gradient proposé par Mindlin et détaillé dans la documentation [R5.04.03]. Ce comportement est principalement conseillé pour les modélisations de régularisation « second gradient » (*_2DG) ou « second gradient » de dilatation (*_DIL).

4.10.1 Syntaxe

```
| /   ELAS_2NDG = _F(
                                    ♦     A1                  =     a1     ,
                    [R]
                                    ◊     A2                  =     a2     ,
                    [R]
                                    ◊     A3                  =     a3     ,
                    [R]
                                    ◊     A4                        =     a4
      ,                   [R]
                                    ◊     A5                        =     a5
      ,                   [R]
                                          )
```

4.10.2 Opérandes A1, A2, A3, A4 et A5

Ces paramètres définissent les caractéristiques matériaux de la loi décrite dans le document [R5.04.03].

4.11 Mot clé facteur ELAS_GLRC

Définition des caractéristiques élastiques linéaires constantes d'une plaque homogénéisée pour les lois GLRC_DM et GLRC_DAMAGE.

4.11.1 Syntaxe

```
|/    ELAS_GLRC = _F     (      ♦      E_M                              =      em,
                    [R]
                                          ♦      NU_M                     =
      num,          [R]
                                          ◊      E_F
      =      ef,                  [R]
                                          ◊      NU_F                     =
      nuf,          [R]
                                          ◊      BT1
      =      bt1,          [R]
                                          ◊      BT2
      =      bt2,          [R]
```


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

```
                                                    ◊      RHO
        =      rho,          [R]
                                                    ◊      ALPHA                    =
        dil    ,             [R]
                                                    ◊      AMOR_ALPHA       =
        a_alpha,     [R]
                                                    ◊      AMOR_BETA        =
        a_beta,      [R]
                                                    ◊      AMOR_HYST        =      eta
              [R]
                                  )
```

4.11.2 Opérandes E_M/NU_M/E_F/NU_F/BT1/BT2

E_M = em
Module de Young de membrane. On vérifie que $E_m \geq 0$.

NU_M = num
Coefficient de Poisson de membrane. On vérifie que $-1. \leq \nu_m \leq 0.5$.

E_F = ef
Module de Young de flexion. On vérifie que $E_f \geq 0$.

NU_F = nuf
Coefficient de Poisson de flexion. On vérifie que $-1. \leq \nu_f \leq 0.5$.

BT1 = bt1 et BT2 = bt2

Dans le cas où les éléments finis supportent le calcul des efforts tranchants, ces opérandes servent à définir la matrice élastique de rigidité de cisaillement transverse. Les efforts tranchants V sont reliés aux distorsions γ par :

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} BT1 & 0 \\ 0 & BT2 \end{pmatrix} \cdot \boldsymbol{\gamma}$$

Les autres opérandes sont identiques à ceux de l'élasticité linéaire, cf. § 4.1.

4.12 Mot clé facteur ELAS_DHRC

Définition des caractéristiques élastiques linéaires constantes d'une plaque homogénéisée pour la loi DHRC.

4.12.1 Syntaxe

```
|/    ELAS_DHRC = _F     (       ♦     A0                       =      a0,
            [l_R]
                                                    ◊      RHO                      =
      rho,          [R]
                                                    ◊      ALPHA            =      dil
      ,             [R]
                                                    ◊      AMOR_ALPHA  =      a_alpha,
      [R]
                                                    ◊      AMOR_BETA   =      a_beta,
      [R]
                                                     ◊      AMOR_HYST  =      eta
      [R]
                                  )
```


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

4.12.2 Opérandes A0

```
A0 = a0
```

Composantes (21 termes supra-diagonaux) du tenseur symétrique d'élasticité $\mathbf{A}^0$ membrane-flexion de la plaque avant endommagement, d'ordre 4, dans le repère des armatures (x, y), en notations de Voigt, identifiées par homogénéisation : d'abord en membrane, puis en flexion (unité de force par unité de longueur pour les termes de membrane, unité de force pour les termes couplés membrane-flexion, et unité de force fois unité de longueur pour les termes de flexion) :

$$\begin{pmatrix} A^{0\mathrm{mm}}_{xxxx} & A^{0\mathrm{mm}}_{xxyy} & A^{0\mathrm{mm}}_{xxxy} & A^{0\mathrm{mf}}_{xxxx} & A^{0\mathrm{mf}}_{xxyy} & A^{0\mathrm{mf}}_{xxxy} \\ & A^{0\mathrm{mm}}_{yyyy} & A^{0\mathrm{mm}}_{yyxy} & A^{0\mathrm{mf}}_{yyxx} & A^{0\mathrm{mf}}_{yyyy} & A^{0\mathrm{mf}}_{yyxy} \\ & & A^{0\mathrm{mm}}_{xyxy} & A^{0\mathrm{mf}}_{xyxx} & A^{0\mathrm{mf}}_{xyyy} & A^{0\mathrm{mf}}_{xyxy} \\ & & & A^{0\mathrm{ff}}_{xxxx} & A^{0\mathrm{ff}}_{xxyy} & A^{0\mathrm{ff}}_{xxxy} \\ & & & & A^{0\mathrm{ff}}_{yyyy} & A^{0\mathrm{ff}}_{yyxy} \\ & & & & & A^{0\mathrm{ff}}_{xyxy} \end{pmatrix}$$

Les autres opérandes sont identiques à ceux de l'élasticité linéaire, cf. § 4.1.

4.13 Mots clés facteur VISC_ELAS

Un mécanisme de régularisation par viscoélasticité est introduit dans la commande STAT_NON_LINE via le mot-clé REGU_VISC = 'OUI'. Le modèle de Maxwell correspondant repose sur deux paramètres, une rigidité k (Pa) et un temps caractéristique τ (s). Il est décrit dans [R5.03.34].

4.13.1 Syntaxe

```
|      VISC_ELAS = _F    (
                                ♦     K    = k,
                [R]
                                ♦     TAU = τ,
                [R]
                               )
```

4.14 Mot clé facteur CZM_ELAS

Ce mot-clé facteur permet de préciser les paramètres de la loi d'interface élastique CZM_ELAS_MIX (voir [R7.02.11]).

4.14.1 Syntaxe

```
| CZM_ELAS      =     _F     (
   ◊     RIGI_NOR          =     /kn,              [R]
                                 /0.0,             [DEFAUT]
   ◊     RIGI_TAN          =     /kn,              [R]
                                 /0.0,             [DEFAUT]
   ◊     ADHE_NOR          =     /'ELAS',          [DEFAUT]
                                 /'UNILATER',      [TXM]
                                 /'PARFAITE',      [TXM]
```


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

```
◊      ADHE_TAN          =     /'ELAS',          [DEFAUT]
                               /'PARFAITE',      [TXM]
♦      PENA_LAGR_ABSO    =     r,                [R]
)
```

4.14.2 Opérandes RIGI_NOR et RIGI_TAN

Il s'agit respectivement des rigidités normale et tangentielle à l'interface.

4.14.3 Opérande ADHE_NOR

Ce mot-clé permet de caractériser le comportement normal à l'interface. La valeur par défaut, 'ELAS', correspond à une réponse élastique ; la rigidité kn est alors définie via RIGI_NOR. La valeur 'UNILATER' renvoie à un comportement de type contact (interpénétration nulle) en fermeture et élastique en ouverture (rigidité kn). Enfin, la valeur 'PARFAITE' stipule que le saut de déplacement normal est nul, c'est-à-dire qu'il y a adhérence parfaite dans la direction normale à l'interface (équivalent à une rigidité normale infinie).

4.14.4 Opérande ADHE_TAN

Ce mot-clé permet de caractériser le comportement tangent à l'interface. La valeur par défaut, 'ELAS' , correspond à une réponse élastique ; la rigidité kt est alors définie via RIGI_TAN . La valeur 'PARFAITE' stipule que le saut de déplacement tangent (glissement) est nul, c'est-à-dire qu'il y a adhérence parfaite dans la direction tangente à l'interface (équivalent à une rigidité tangentielle infinie).

4.14.5 Opérande PENA_LAGR_ABSO

Ce mot-clé (obligatoire) permet de renseigner la valeur du coefficient d'augmentation du Lagrangien augmenté, cf. [R7.02.11]. Contrairement à d'autres modèles, il n'est pas fourni de manière relative à d'autres paramètres (car ils peuvent tous être nuls) mais bien de manière absolue. Il a comme dimension celle d'une pression par unité de longueur.

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

5 Comportements mécaniques non linéaires généraux

En général, la définition d'un comportement mécanique non linéaire nécessite d'une part la définition des propriétés élastiques et d'autre part celles relatives à l'aspect non linéaire proprement dit. Dans *Code_Aster*, ces deux types de données sont définies séparément, sauf quelques exceptions.

5.1 Mot clé facteur TRACTION

Définition d'une courbe de traction (élastoplasticité de Von Mises à écrouissage isotrope non linéaire ou élasticité non linéaire).

5.1.1 Syntaxe

```
|     TRACTION = _F     (
                                ♦     SIGM =                  sigm_f,
                [fonction]
                                )
```

5.1.2 Opérande SIGM

SIGM = sigm_f

Courbe σ en fonction de la déformation totale ε (on vérifie que le concept fonction dépend bien des seuls paramètres EPSI et éventuellement TEMP).

L'ordonnée du premier point définit la limite élastique du matériau, il est donc impératif de ne pas définir de point d'abscisse nulle [R5.03.02].

Dans le cas où sigm_f dépend des deux paramètres EPSI et TEMP (ce concept a alors été défini par DEFI_NAPPE), on interpole par rapport à la température pour trouver la courbe de traction à une température θ donnée. Il est vivement recommandé de se reporter au document [R5.03.02] où la méthode d'interpolation est expliquée. On notera que, pour éviter de générer des erreurs d'approximation importantes ou même d'obtenir par extrapolation de mauvaises courbes de traction, il vaut mieux ne pas utiliser de prolongement linéaire dans DEFI_NAPPE.

Remarque :

Pour les matériaux multiphasés, avec phases métallurgiques, les caractéristiques d'écrouissage se définissent par META_ECRO_LINE ou META_TRACTION [R4.04.04].

5.2 Mots clés facteur ECRO_LINE, ECRO_LINE_FO

Définition d'une courbe d'écrouissage linéaire ou d'un ensemble de courbes dépendant de la température.

5.2.1 Syntaxe

```
| / ECRO_LINE = _F(
              ♦ D_SIGM_EPSI        = dsde                    [R]
              ♦ SY                 = sigmm                   [R]
              ◊ SIGM_LIM           = sglim                   [R]
              ◊ EPSI_LIM           = eplim                   [R]
              )
  / ECRO_LINE_FO = _F(
              ♦ D_SIGM_EPSI        = dsde
              [fonction]
              ♦ SY                 = sigm
              [fonction]
)
```

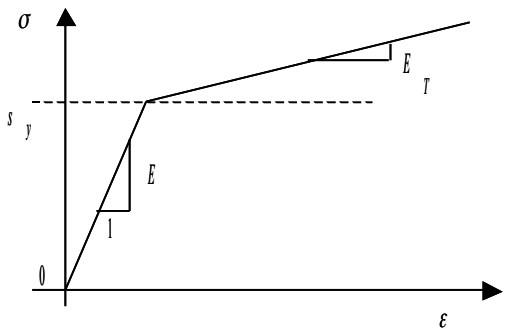

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Les fonctions peuvent dépendre des variables de commandes suivantes : 'TEMP', 'EPSI', 'HYDR', 'SECH'.

5.2.2 Opérandes

♦ D_SIGM_EPSI = dsde (ET)
Pente de la courbe de traction E_T en régime plastique.

♦ SY = sigm
Limite d'élasticité s_y.



La courbe d'écrouissage utilisée dans les modèles de comportement est alors :

$$R(p) = s_y + H.p$$

avec $H = \frac{E.E_T}{E - E_T}$

Il faut donc respecter : $E_T < E$

(voir par exemple [R5.03.02]).

Le module de Young E est à préciser par les mots-clés ELAS ou ELAS_FO.

◊ SIGM_LIM = sglim
Définition de la contrainte limite.

◊ EPSI_LIM = eplim
Définition de la déformation limite.

Les opérandes SIGM_LIM et ESPI_LIM permettent de définir les bornes en contrainte et en déformation des matériaux, qui correspondent aux états limites de service et ultime, classiquement utilisées lors d'étude en génie civil. Ces bornes sont obligatoires lorsque l'on utilise le comportement VMIS_CINE_GC (confer [U4.42.07] DEFI_MATER_GC). Dans les autres cas elles ne sont pas prises en compte.

5.3 Mots clés facteur ECRO_NL

Définition d'une courbe d'écrouissage non linéaire. Cette fonctionnalité est disponible pour les lois de comportement 'VMIS_ISOT_NL', 'VISC_ISOT_NL' et 'GTN'.

5.3.1 Syntaxe

```
| ECRO_NL = _F(
                ♦ R0                = R0                          [R]
                ◊  RH               = /0,0                  [DEFAUT]
                                      / RH                      [R]
                ◊  R1               = /0,0                  [DEFAUT]
                       / R1         [R]
                ◊  GAMMA_1          = /0,0                  [DEFAUT]
                       / γ1         [R]
                ◊  R2               = /0,0                  [DEFAUT]
                       / R2         [R]
                ◊  GAMMA_2          = /0,0                  [DEFAUT]
                       / γ2         [R]
```


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

```
  ◊  RK                = /0,0                    [DEFAUT]
        / R_K          [R]
  ◊  P0                = /0,0                    [DEFAUT]
        / p_0          [R]
  ◊  GAMMA_M           = /1,0                    [DEFAUT]
        / γ_m          [R]
)
```

5.3.2 Opérandes

Les coefficients introduits au paragraphe précédent paramètrent la courbe d'écrouissage comme suit :

$$R(p)=R_0+R_H p+R_1\left(1-e^{-\gamma_1 p}\right)+R_2\left(1-e^{-\gamma_2 p}\right)+R_K\left(p+p_0\right)^{\gamma_m}$$

Les termes paramétrés par R_1 , R_2 et R_K sont facultatifs. Ils sont nuls par défaut. Cette fonction non linéaire est suffisamment générale pour permettre de recaler bon nombre de réponses expérimentales (croissantes).

5.4 Mots clés facteur PRAGER, PRAGER_FO

Lorsque le trajet de chargement n'est plus monotone, les écrouissages isotrope et cinématique ne sont plus équivalents. En particulier, on peut s'attendre à avoir simultanément une part cinématique et une part isotrope. Si on cherche à décrire précisément les effets d'un chargement cyclique, il est souhaitable d'adopter des modélisations sophistiquées (mais simples d'emploi) telles que le modèle de Taheri, par exemple, confer [R5.03.05]. En revanche, pour des trajets de chargement moins complexes, on peut souhaiter n'inclure qu'un écrouissage cinématique linéaire, toutes les non linéarités de l'écrouissage étant portées par le terme isotrope. Cela permet de décrire précisément une courbe de traction, tout en représentant quand même des phénomènes tels que l'effet Bauschinger [R5.03.16].

Les caractéristiques de l'écrouissage sont alors données par une courbe de traction et une constante, dite de Prager, pour le terme d'écrouissage cinématique linéaire. Le mot clé PRAGER permet de définir la constante de PRAGER, utilisée dans les modèles à écrouissage mixte (cinématique linéaire combiné avec isotrope) VMIS_ECMI_LINE ou VMIS_ECMI_TRAC.

5.4.1 Syntaxe

```
|      / PRAGER     = _F  (
                                ♦    C      =      C,
                     [R]
                               )
       / PRAGER_FO = _F  (
                                ♦    C      =      C,
                     [fonction]
                               )
```

L'identification de C est décrite dans [R5.03.16].

5.5 Mots clés facteur ECRO_PUIS, ECRO_PUIS_FO

Paramètres de plasticité à critère de Von Mises et à écrouissage isotrope suivant une loi puissance.

5.5.1 Syntaxe

```
|      / ECRO_PUIS =_F   (
```


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

```
                                    ♦  SY     =          sigy,
[R]
                                    ♦  A_PUIS      =     a,
          [R]
                                    ♦  N_PUIS      =     n,
          [R]
                                    )
      / ECRO_PUIS_FO =  _F     (
                                    ♦  SY          = sigy,
      [fonction]
                                    ♦  A_PUIS      =     a,
            [fonction]
                                    ♦  N_PUIS      =     n,
            [fonction]
                                     )
```

5.5.2 Opérandes

SY	=	sigy	Limite d'élasticité
A_PUIS	=	a	Coefficient de la loi puissance
N_PUIS	=	n	Exposant

La courbe d'écrouissage est déduite de la courbe uni-axiale reliant les déformations aux contraintes, dont l'expression est (cf. [R5.03.02]) :

$$\varepsilon=\frac{\sigma}{E}+a\frac{\sigma_y}{E}\left(\frac{(\sigma-\sigma_y)}{\sigma_y}\right)^n$$

5.6 Mots clés facteur CIN1_CHAB, CIN1_CHAB_FO

Paramètres du modèle de Chaboche (à une seule variable cinématique) décrit dans le document [R5.03.04].

Brièvement, ces relations sont :

$$F(\sigma,R,X)=(\tilde{\sigma}-X)_{eq}-R(p)$$

$$\dot{\varepsilon}^p=\dot{\lambda}\frac{\partial F}{\partial\sigma}=\frac{3}{2}\dot{\lambda}\frac{\tilde{\sigma}-X}{(\tilde{\sigma}-X)_{eq}}$$

$$\dot{p}=\dot{\lambda}=\sqrt{\frac{2}{3}\dot{\varepsilon}^p:\dot{\varepsilon}^p} \qquad \text{éq 4.5-1}$$

$$\begin{cases}\text{si } F<0 \text{ ou } \dot{F}<0 & \dot{\lambda}=0\\ \text{si } F=0 \text{ et } \dot{F}=0 & \dot{\lambda}\geqslant 0\end{cases} \qquad \text{éq 4.5-2}$$

$$X=\frac{2}{3}C(p)\alpha \qquad \text{éq 4.5-3}$$

$$\dot{\alpha}=\dot{\varepsilon}^p-\gamma(p)\alpha\dot{p}$$

Les fonctions $C(p)$, $\gamma(p)$ et $R(p)$ sont définies par :

$$R(p)=R_\infty+(R_0-R_\infty)e^{-bp}$$

$$C(p)=C^\infty\left(1+(k-1)e^{-wp}\right)$$

$$\gamma_1(p)=\gamma^0\left(\alpha_\infty+(1-\alpha_\infty)e^{-bp}\right)$$

Remarque :

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

$\tilde{\sigma}$ représente le déviateur des contraintes et $(\ )_{eq}$ l'équivalent au sens de von Mises.

La définition de X sous la forme [éq. 4.5-3] permet de garder une formulation qui prend en compte les variations des paramètres avec la température. Ces termes sont nécessaires car leur non prise en compte conduirait à des résultats inexacts.

5.6.1 Syntaxe

```
|     / CIN1_CHAB
      / CIN1_CHAB_FO    = _F(
                                ♦      R_0   =     R_0,
            [R] ou [fonction]
                                ◊      R_I   =     R_I, (inutile si B=0)
      [R] ou [fonction]
                                ◊      B     =     / b   ,
                        [R] ou [fonction]
                                                   / 0.,
                  [DEFAUT]
                                ♦      C_I   =     C_I,
            [R] ou [fonction]
                                ◊      K     =     / k   ,
                        [R] ou [fonction]
                                                   / 1.,
                  [DEFAUT]
                                ◊      W     =     /     w,
                        [R] ou [fonction]
                                                   / 0.,
                  [DEFAUT]
                                ♦      G_0   =     G_0,
            [R] ou [fonction]
                                ◊      A_I   =     / A_I,
                  [R] ou [fonction]
                                                         / 1.,
                  [DEFAUT]
                                )
```

Remarque :

Une version viscoplastique du modèle de Chaboche est également disponible (confer [R5.03.04]). Elle nécessite de définir des caractéristiques visqueuses à l'aide du mot-clé facteur `LEMAITRE` *ou* `LEMAITRE_FO`*, en mettant obligatoirement le paramètre* `UN_SUR_M` *à zéro.*

5.7 Mots clés facteur CIN2_CHAB, CIN2_CHAB_FO

Paramètres du modèle de Chaboche (à deux variables cinématiques) décrit dans le document [R5.03.04].

Brièvement ces relations sont :

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

$$F(\sigma, R, X) = (\tilde{\sigma} - X_1 - X_2)_{eq} - R(p)$$

$$\dot{\varepsilon}^p = \dot{\lambda}\frac{\partial F}{\partial \sigma} = \frac{3}{2}\dot{\lambda}\frac{\tilde{\sigma} - X_1 - X_2}{(\tilde{\sigma} - X_1 - X_2)_{eq}}$$

$$\dot{p} = \dot{\lambda} = \sqrt{\frac{2}{3}\dot{\varepsilon}^p : \dot{\varepsilon}^p} \qquad \text{éq 4.6-1}$$

$$\begin{cases} \text{si } F < 0 \text{ ou } \dot{F} < 0 & \dot{\lambda} = 0 \\ \text{si } F = 0 \text{ et } \dot{F} = 0 & \dot{\lambda} \geqslant 0 \end{cases} \qquad \text{éq 4.6-2}$$

$$X_1 = \frac{2}{3}C_1(p)\alpha_1$$

$$X_2 = \frac{2}{3}C_2(p)\alpha_2 \qquad \text{éq 4.6-3}$$

$$\dot{\alpha}_1 = \dot{\varepsilon}^p - \gamma_1(p)\alpha_1\dot{p}$$

$$\dot{\alpha}_2 = \dot{\varepsilon}^p - \gamma_2(p)\alpha_2\dot{p}$$

Les fonctions $C_1(p)$, $C_2(p)$, $\gamma_1(p)$, $\gamma_2(p)$ et $R(p)$ sont définies par :

$$R(p) = R_\infty + (R_0 - R_\infty)e^{-bp}$$

$$C_1(p) = C_1^\infty(1 + (k-1)e^{-wp})$$

$$C_2(p) = C_2^\infty(1 + (k-1)e^{-wp})$$

$$\gamma_1(p) = \gamma_1^0(\alpha_\infty + (1-\alpha_\infty)e^{-bp})$$

$$\gamma_2(p) = \gamma_2^0(\alpha_\infty + (1-\alpha_\infty)e^{-bp})$$

Remarque :

$\tilde{\sigma}$ *représente le déviateur des contraintes et* $(\ )_{eq}$ *l'équivalent au sens de von Mises.*

La définition de X_1 *et* X_2 *sous la forme [éq. 4.6-3] permet de garder une formulation qui prend en compte les variations des paramètres avec la température. Ces termes sont nécessaires car leur non prise en compte conduirait à des résultats inexacts.*

5.7.1 Syntaxe

```
|     / CIN2_CHAB
      / CIN2_CHAB_FO    = _F(
                                ♦     R_0          = R_0,
                    [R] ou [fonction]
                                ◊      R_I  = R_I, (inutile si B=0)  [R] ou
[fonction]
                                ◊      B            = / b ,
             [R] ou [fonction]
                                                     / 0.,
             [DEFAUT]
                                ♦      C1_I = C1_I,
      [R] ou [fonction]
                                ♦      C2_I = C2_I,
      [R] ou [fonction]
                                ◊      K            = / k ,
             [R] ou [fonction]
                                                     / 1.,
             [DEFAUT]
                                ◊      W            = / w,
                    [R] ou [fonction]
```


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

```
                                                    / 0.,
      [DEFAUT]
                          ♦       G1_0 = G1_0,
[R] ou [fonction]
                          ♦       G2_0 = G2_0,
[R] ou [fonction]
                          ◊       A_I  =     / A_I,
      [R] ou [fonction]
                                                / 1.,
      [DEFAUT]
                                  )
```

Remarque :

Une version viscoplastique du modèle de Chaboche à deux variables cinématiques est également disponible (cf. [R5.03.04]). Elle nécessite de définir des caractéristiques visqueuses à l'aide du mot-clé facteur `LEMAITRE` *ou* `LEMAITRE_FO`*, en mettant obligatoirement le paramètre* `UN_SUR_M` *à zéro.*

5.8 Mots clés facteurs VISCOCHAB, VISCOCHAB_FO

Définition des coefficients du modèle élasto-viscoplastique de Chaboche [R5.03.12].
Brièvement, les équations constitutives du modèle sont :

Contrainte visqueuse $\sigma_v = J_2(\tilde{\sigma} - X) - \alpha_R - k$

Taux de déformation viscoplastique

$$\dot{\varepsilon}^p = \frac{3}{2}\dot{p}\frac{\tilde{\sigma} - X}{J_2(\tilde{\sigma} - X)}$$

$$\dot{p} = \left\langle \frac{\sigma_v}{K_0 + \alpha_k R} \right\rangle \times exp\left[\alpha \left\langle \frac{\sigma_v}{K_0 + \alpha_k R} \right\rangle^{n+1} \right]$$

Écrouissage isotrope :

$$\dot{R} = b(Q - R)\,\dot{p} + \gamma_r (Q_\gamma - R)^m sgn(Q_\gamma - R)$$

$$Q = Q_0 + (Q_m - Q_0)\left(1 - e^{-2\mu q}\right)$$

$$F(\varepsilon^p, \xi, q) = \frac{2}{3} J_2\left(\varepsilon^p - \xi\right) - q \le 0$$

$$\begin{cases} \dot{q} = \eta \times H(F) \times \langle n : n \rangle \dot{p} \\ \dot{\xi} = \sqrt{3/2}(1-\eta) \times H(F) \times \langle n : n \rangle \dot{p}\, n^* \end{cases} \text{ avec : } n = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sigma - X}{J_2(\sigma - X)} \; ; \; n^* = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\varepsilon^p - \xi}{J_2(\varepsilon^p - \xi)}$$

$$Q_r = Q - Q_r^* \left(1 - \left(\frac{Q_m - Q}{Q_m} \right)^2 \right)$$

Écrouissage cinématique $X = X_1 + X_2$

$$\dot{X}_i = \frac{2}{3} C_i \dot{\varepsilon}^p - \gamma_i \left[\delta_i X_i + (1 - \delta_i)(X_i : n) n \right] \dot{p} - \gamma_{X_i} \left[J_2(X_i) \right]^{m_i - 1} X_i + \frac{1}{C_i} \frac{\partial C_i}{\partial T} X_i \dot{T}$$

$$\gamma_i = \gamma_i^0 \left[a_\infty + (1 - a_\infty) e^{-bp} \right]$$

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

Remarques :

$\tilde{\sigma}$ *représente le déviateur des contraintes,* $J_2(Y)=\sqrt{3/2(Y:Y)}$ *le deuxième invariant du tenseur* Y*,*
$H(F)$ *la fonction d'Heavyside et* $\langle..\rangle$ *les crochets de Mc Cawley (*$\langle x\rangle=x$ *si* $x\geq 0$*,* 0 *sinon).*
Les variables q *et* ξ *permettent de prendre en compte l'effet de mémoire de l'écrouissage sous chargement cyclique. Si* $\eta=1$*, l'effet de mémoire n'est pas modélisé et les variables* q *et* ξ *ne sont pas considérées dans la résolution du système* $(q=0)$*. Sinon, on a la condition suivante sur* η *:* $0<\eta\leq 1/2$*.*
D'un point de vue thermodynamique, la variable d'écrouissage X_i *est associée à sa variable duale* α_i *pour la relation* $X_i=\frac{2}{3}C_i\alpha_i$*. Le terme en* $\dot{T}$ *intervenant dans l'équation donnant* $\dot{X}_i$ *permet de traiter les cas de chargements anisothermes pour* C_i *fonction de la température.*

5.8.1 Syntaxe

```
|     /     VISCOCHAB =
      /     VISCOCHAB_FO =    _F(
                                ♦   K           = k,
[R] ou [fonction]
                                ♦   A_K         = alphak,
[R] ou [fonction]
                                ♦   A_R         = alphar,
[R] ou [fonction]
                                ♦   K_0         = K0,
[R] ou [fonction]
                                ♦   N           = n,
[R] ou [fonction]
                                ♦   ALP         = alpha,
[R] ou [fonction]
                                ♦   B           = b,
[R] ou [fonction]
                                ♦   M_R         = mr,
[R] ou [fonction]
                                ♦   G_R         = gamar,
[R] ou [fonction]
                                ♦   MU          = mu,
[R] ou [fonction]
                                ♦   Q_0         = Q0,
[R] ou [fonction]
                                ♦   Q_M         = Qm,
[R] ou [fonction]
                                ♦   QR_0  = Qr*,
[R] ou [fonction]
                                ♦   ETA         = eta,
      [R] ou [fonction]
                                ♦   C1          = C1,
[R] ou [fonction]
                                ♦   M_1         = m1,
[R] ou [fonction]
                                ♦   D1          = d1,
[R] ou [fonction]
                                ♦   G_X1  = gx1,
[R] ou [fonction]
```


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

```
                                        ♦     G1_0   = g10,
              [R] ou [fonction]
                                        ♦     C2           = C2,
              [R] ou [fonction]
                                        ♦     M_2          = m2,
              [R] ou [fonction]
                                        ♦     D2           = d2,
              [R] ou [fonction]
                                        ♦     G_X2   = gx2,
              [R] ou [fonction]
                                        ♦     G2_0   = g20,
              [R] ou [fonction]
                                        ♦     A_I          = ainfi,
              [R] ou [fonction]
                                  )
```

5.9 Mots clé facteur MEMO_ECRO

Ce mot clé permet de définir les paramètres associés à l'effet de mémoire maximale d'écrouissage dans les comportements élastoplastiques ou élasto-visco-plastiques de Chaboche (cf. [R5.03.04]). Ce mot-clé est utilisable, conjointement aux mots-clés CIN1_CHAB ou CIN2_CHAB, pour définir les paramètres nécessaires au comportement VMIS_CIN2_MEMO. De plus, en définissant les paramètres de viscosité sous LEMAITRE, il est possible d'utiliser un comportement visco_plastique à effet de mémoire maximale d'écrouissage par VISC_CIN2_MEMO.

Les équations du modèle s'écrivent via un domaine représentant les déformations plastiques maximales atteintes :

$$F\left(\varepsilon^p,\xi,q\right)=\frac{2}{3}J_2\left(\varepsilon^p-\xi\right)-q\leq 0$$ avec la loi d'évolution $$\dot{\xi}=\frac{\left(1-\eta\right)}{\eta}\dot{q}\,n^*$$

q permet de calculer l'évolution de la loi l'écrouissage $R(p)$ par :

$$\dot{R}=b\left(Q-R\right)\dot{p} \quad , \quad Q=Q_0+\left(Q_m-Q_0\right)\left(1-e^{-2\mu q}\right)$$

le critère de plasticité s'écrivant : $$f\left(\sigma,R,X\right)=\left(\tilde{\sigma}-X_1-X_2\right)_{eq}-R_0-R\left(p\right)$$

5.9.1 Syntaxe

```
|     MEMO_ECRO=_F(
                      ♦     MU          =     mu
[R]
                      ♦     Q_M   =     qm                                    [R]
                      ♦     Q_0   =     q0                                    [R]
                      ◊     ETA   =     / eta                                 [R]
                                                          / 0.5,
                    [DEFAUT]
                                              )
```

5.9.2 Opérandes

Mu = mu
Cœfficient de la loi exponentielle

Q_M = Qm
Valeur de saturation du paramètre Q représentant l'écrouissage isotrope

Q_0 = Q0
Valeur intiale du paramètre Q représentant l'écrouissage isotrope

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

ETA = eta
Valeur permettant de modifier la prise en compte de la mémoire de la déformation plastique maximale : la valeur $eta = 1/2$ correspond à une prise en compte totale.

5.10 Mots clé facteur CIN2_NRAD

Ce mot clé permet de définir les paramètres associés à l'effet de non proportionnalité du modèle de Chaboche (cf. [R5.03.04]).

5.10.1 Syntaxe

```
|      CIN2_NRAD=_F(
                     ♦    DELTA1     =     delta1
[R]
                     ♦    DELTA2     =     delta2
[R]
                     )
```

5.10.2 Opérandes

DELTA1, DELTA2 : coefficients compris entre 0 et 1 permettant de prendre en compte la non proportionnalité éventuelle du chargement. La valeur par défaut de 1 annule cet effet.

5.11 Mots clés facteur TAHERI, TAHERI_FO

Définition des coefficients du modèle de comportement d'élasto-plasticité cyclique de Saïd Taheri [R5.03.05]. Brièvement, nous avons à résoudre, pour un incrément élasto-plastique :

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}^p = \frac{3}{2}\dot{p}\frac{\widetilde{\sigma}-X}{(\widetilde{\sigma}-X)_{eq}} \quad \text{avec} \quad (x)_{eq} = \left(\frac{3}{2}x^t x\right)^{1/2} \\ \sigma = \Lambda(\varepsilon-\varepsilon_p) \qquad R = D\left(A\|\varepsilon\|^{\alpha}+R_0\right) \\ (\sigma-X)_{eq}-R=0 \qquad X = C\left(S\,\varepsilon_p-\sigma_p\varepsilon_p^n\right) \\ \dot{\sigma}_p-\dot{R}-\dot{\widetilde{(X)}}_{eq}=0 \qquad \sigma_p = \mathrm{Max}_t\left(X_{eq}+R\right) \\ \dot{\varepsilon}_p^n=0 \qquad D = 1-me^{-bp\left(1-\frac{\sigma_p}{S}\right)} \\ \qquad\qquad C = C_{\infty}+C_1 e^{-bp\left(1-\frac{\sigma_p}{S}\right)} \end{cases}$$

où les différents paramètres du matériau sont $S, C_{\infty}, C_1, b, m, A, \alpha, R_0$.

Les différents paramètres peuvent dépendre de la température, dans ce cas on emploiera le mot clé TAHERI_FO.

5.11.1 Syntaxe

```
      |      /      TAHERI
             /      TAHERI_FO = _F(
                                  ♦    R_0          =     R,           [R]
ou [fonction]
                                  ♦    ALPHA =     a ,          [R] ou
[fonction]
```


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

```
                                    ♦ M          =  m,          [R]
ou [fonction]
                                    ♦ A          =  A,          [R]
ou [fonction]
                                    ♦ B          =  B,          [R]
ou [fonction]
                                    ♦ C1         =  C1,         [R]
ou [fonction]
                                    ♦ C_INF =  Cinfi,     [R] ou
[fonction]
                                    ♦ S          =  S,          [R]
ou [fonction]
                                  )
```

Remarque :

Une version viscoplastique du modèle de TAHERI est également disponible (cf. [R5.03.05]). Elle nécessite de définir des caractéristiques visqueuses à l'aide du mot clé facteur LEMAITRE ou LEMAITRE_FO .

5.12 Mots clés facteurs MONO_*

Définition des coefficients des modèles de comportement monocristallin ou polycristallin [R5.03.11]. En plus de ces caractéristiques, les constantes élastiques doivent être définies sous le mot clé ELAS ou ELAS_ORTH .

Le comportement lié à chaque système de glissement d'un monocristal ou d'une phase d'un polycristal est (dans l'ensemble des comportements envisagés) de type élasto-visco-plastique.

Les comportements cristallins (autres que ceux définis à partir de la dynamique des dislocations) peuvent se décomposer en 3 types d'équations :

- relation d'écoulement : $\Delta\gamma_s = g(\tau_s, \alpha_s, \gamma_s, p_s)$
- évolutions de l'écrouissage cinématique : $\Delta\alpha_s = h(\tau_s, \alpha_s, \gamma_s, p_s)$
- évolution de l'écrouissage isotrope : $R_s(p_s)$, avec $\Delta p_s = |\Delta\gamma_s|$

La relation d'écoulement MONO_VISC1 est :

$$\Delta\gamma_s = g(\tau_s, \alpha_s, \gamma_s, p_s) = \left(\frac{\langle |\tau_s - c\alpha_s| - R(p_s) \rangle}{K} \right)^n \cdot \frac{\tau_s - c\alpha_s}{|\tau_s - c\alpha_s|}$$, les paramètres sont : c , K , n

La relation d'écoulement MONO_VISC2 est :

$$\Delta\gamma_s = g(\tau_s, \alpha_s, \gamma_s, p_s) = \left(\frac{\langle |\tau_s - c\alpha_s - a\gamma_s| - R(p_s) + \frac{c}{2} d(c\alpha_s)^2 \rangle}{K} \right)^n \cdot \frac{\tau_s - c\alpha_s - a\gamma_s}{|\tau_s - c\alpha_s - a\gamma_s|}$$

les paramètres sont alors : c , K , n , a , d

L'écrouissage cinématique peut être de la forme MONO_CINE1 :
$\Delta\alpha_s = h(\tau_s, \alpha_s, \gamma_s, p_s) = \Delta\gamma_s - d \cdot \alpha_s \cdot \Delta p_s$ avec pour paramètre: d .

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

ou bien MONO_CINE2 :

$\Delta\alpha_s = h(\tau_s, \alpha_s, \gamma_s, p_s) = \Delta\gamma_s - d.\alpha_s.\Delta p_s - \left(\frac{|c\alpha_s|}{M}\right)^m \frac{\alpha_s}{|\alpha_s|}$, les paramètres étant alors : d , M et m .

L'écrouissage isotrope peut par exemple être de la forme MONO_ISOT1 :

$R_s(p_s) = R_0 + Q\left(\sum_{r=1}^{N} h_{sr}\left(1 - e^{-bp_r}\right)\right)$ avec h_{sr} matrices d'interaction, les paramètres sont h , Q , R_0 , b .

Ou encore MONO_ISOT2 :

$R_s(p_s) = R_0 + Q_1\left(\sum_{sg} h_{sr} q^{ls}\right) + Q_2 q^{2s}$, avec $dq^{is} = b_i\left(1 - q^{is}\right).dp$ les paramètres sont h , Q_1 , Q_2 , b_1 , b_2 , R_0 .

Les équations relatives aux lois cristallines MONO_DD_KR, MONO_DD_CFC, MONO_DD_CFC_IRRA, MONO_DD_FAT, MONO_DD_CC, MONO_DD_CC_IRRA issues de la dynamique des dislocations sont décrites dans le document [R4.03.11].

5.12.1 Syntaxe

Ces relations sont accessibles dans *Code_Aster* en 3D, déformations planes (D_PLAN), contraintes planes (C_PLAN) (via l'algorithme de de Borst) et axisymétrique (AXIS) à partir du mot-clé COMPORTEMENT de la commande STAT_NON_LINE. Le choix des relations permettant de bâtir le modèle de comportement de monocristal est effectué via l'opérateur DEFI_COMPOR [U4.43.05].

```
|     MONO_VISC1 = _F   (
    ♦       C     =     C,                  [R]
    ♦       K     =     K,                  [R]
    ♦       N     =     n                   [R] )

 |    MONO_VISC2 = _F   (
    ♦       C     =     C,                  [R]
    ♦       K     =     K,                  [R]
    ♦       N     =     n,                  [R]
    ♦ A     =     a,                [R]
    ♦       D     =     d                   [R] )

 |    MONO_ISOT1 = _F   (
      ♦    R_0   = R   ,      [R]
      ♦    Q           = Q,   [R]
      ♦    B           = b,   [R]
     /     ◊    H      = h,          [R]
     /     ◊    H1     = h1,         [R]
           ◊    H2     = h2,         [R]
           ◊    H3     = h3,         [R]
           ◊    H4     = h4,               [R]
           ◊    H5     = h5,         [R]
           ◊    H6     = h6          [R] )

|     MONO_ISOT2 = _F (
      ♦    R_0   = R0, [R]
      ♦    Q1    = Q1,               [R]
```


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

```
            ♦      B1     = b1,                [R]
            ♦      Q2     = Q2,          [R]
          ♦     B2     = b2          [R]
        /       ◊      H      = h,           [R]
        /       ◊      H1     = h1,          [R]
                ◊      H2     = h2,          [R]
                ◊      H3     = h3,          [R]
                ◊      H4     = h4,                [R]
                ◊      H5     = h5,          [R]
                ◊      H6     = h6           [R] )

|       MONO_CINE1 = _F (
            ♦ D = D,                  [R]    )

 |      MONO_CINE2 = _F(
        ♦ D = D,                  [R]
            ♦      GM = M,              [R]
            ♦      PM = m,              [R]
            ♦      C = C                [R])
```

comportement de Kocks-Rauch spécifique aux matériaux CC, familles CUBIQUE1 et CUBIQUE2 (interaction entre les 24 systèmes de glissement)

```
 |    MONO_DD_KR = _F(
            ♦  K   = k,                 [R] Constante de Boltzmann, en eV / K
            ♦  TAUR      = taur,        [R] Contrainte de cisaillement à T = 0K
            ♦  TAU0      = tau0,        [R] Contrainte critique initiale de cisaillement
            ♦  GAMMA0    = gammap0,[R] Vitesse d ecoulement initiale
            ♦  DELTAG0= deltaG0,[R] Gain d'énergie au franchissement d'obstacle
             ♦   BSD      = BsurD       [R] fonction de la taille du grain B / Dc
            ♦  GCB       = GCsurB      [R] distance critique d'annihilation GC / Bc
            ♦  KDCS      = K,          [R] relatif à la direction de dislocation
            ♦  P   = p,                [R] dépendant de la forme de l'obstacle
            ♦  Q   = q,                [R] dépendant de la forme de l'obstacle
```

Définition de la matrice d'interaction spécifique (cf. [R5.03.11])

```
        /       ◊      H      = h,           [R]
        /       ◊      H1     = h1,          [R]
                ◊      H2     = h2,          [R]
                ◊      H3     = h3,          [R]
                ◊      H4     = h4,                [R]
                ◊      H5     = h5,          [R]
```

paramètres spécifiques aux matériaux CFC, famille OCTAEDRIQUE (interaction entre les 12 systèmes de glissement)

```
 |    MONO_DD_CFC = _F(
            ◊  GAMMA0= gammap0         [R]   Vitesse initiale, par défaut 0,001 s^-1
            ♦  TAU_F = tauf            [R]   Seuil, en unité de contraintes
            ◊  A= A                          [R]   paramètre A , sans unité, par défaut
0.13
            ◊  B = B                         [R]   paramètre B , sans unité, par défaut
0.005
        ◊  N =N                          [R]   exposant n , doit être grand ( >50 ), par
        défaut 200
        ♦    Y =Y                        [R]    paramètre Y ,en unité de longueur
```


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

◊ ALPHA=a [R] paramètre d'écrouissage $alpha$, par défaut 0.35
◊ BETA =b [R] paramètre d'écrouissage b , par défaut 0.35
♦ RHO_REF = rho_ref,[R] paramètre rho_ref , en unité de longueur m^{-2}

Définition de la matrice d'interaction spécifique (cf. [R5.03.11])
/ ◊ H = h, [R]
/ ◊ H1 = a*, [R] par défaut 0.124
◊ H2 = a_colinéaire [R] par défaut 0.625
◊ H3 = a_glissile , [R] par défaut 0.137
◊ H4 = a_Lomer [R] par défaut 0.122
◊ H5 = a_Hirth [R] par défaut 0.07

| MONO_DD_CFC_IRRA = _F(mêmes mot-clés que MONO_DD_CFC, sauf :

♦ DZ_IRRA = $\zeta \geq 0$ [R] paramètre gérant l'évolution de Φ_s^{voids}
♦ XI_IRRA = $\xi \geq 0$ [R] paramètre gérant l'évolution de ρ_s^{loops}
♦ ALP_VOID = α_{voids} [R] paramètre gérant l'évolution de τ_s^{forest}
♦ ALP_LOOP = α_{loops} [R] paramètre gérant l'évolution de τ_s^{forest}
♦ RHO_SAT = $\rho_{sat} b^2 = \omega_{sat}$ [R] limite à saturation de $\omega_s^{loops} = b^2 \times \rho_s^{loops}$
♦ PHI_SAT = Φ_{sat} [R] limite à saturation de Φ_{voids}

| MONO_DD_FAT = _F(
♦ GAMMA0= gammap0 [R] Vitesse d'écoulement initiale en s-1
♦ TAU_F = tauf [R] Seuil, en unité de contraintes
♦ BETA= b [R] Constante de Burgers b , en unité de longueur
♦ N =N [R] exposant n , doit être grand (>50)
♦ UN_SUR_D = 1/d [R] paramètre fonction de la taille de grain, en unité de 1/longueur
♦ GC0=gc0 [R] distance critique d'annihilation, en unité de longueur
♦ K = K [R] paramètre relatif au libre parcours moyen des dislocations, sans unité

Définition de la matrice d'interaction spécifique (cf. [R5.03.11])
/ ◊ H = h, [R]
/ ◊ H1 = a*, [R] par défaut 0.124
◊ H2 = a_colinéaire [R] par défaut 0.625
◊ H3 = a_glissile , [R] par défaut 0.137
◊ H4 = a_Lomer [R] par défaut 0.122
◊ H5 = a_Hirth [R] par défaut 0.07

paramètres spécifiques aux matériaux CC à basse et à haute température, famille CUBIQUE1 (interaction entre les 12 systèmes de glissement)
| MONO_DD_CC = _F(
♦ B = b [R] paramètre B , en unité de longueur
♦ GH= H [R] paramètre H , en unité de 1/temps
♦ DELTAG0 = ΔG_0 [R] énergie d'activation
♦ TAU_0 = τ_0 [R] seuil ultime, en unité de contraintes
♦ TAU_F = τ_F [R] seuil initial, en unité de contraintes
♦ GAMMA0= $\dot{\gamma}_0$ [R] Vitesse d'écoulement initiale,
♦ N =N [R] exposant n ,

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

♦ RHO_MOB= ρ_{mob} [R] densité de dislocations mobiles, en unité de longueur $^{-2}$

♦ D [R] paramètre D , en unité de longueur

♦ D_LAT [R] paramètre D_{LAT} ,lié à la taille de grain, en unité de longueur

♦ Y_AT [R] paramètre Y_AT en unité de longueur

♦ K_F [R] paramètre K_F en unité de longueur

♦ K_SELF [R] paramètre K_SELF en unité de longueur

♦ K_BOLTZ [R] Constante de Boltzmann, en énergie/ K , ex : eV/K

♦ DEPDT [R] paramètre $dEps/dT$ pour le calcul de ΔG

Définition de la matrice d'interaction spécifique (cf. [R5.03.11])

/ ◊ H = h, [R]
/ ◊ H1 = h0 [R]
◊ H2 = h1 [R]
◊ H3 = h2 , [R]
◊ H4 = h3 [R]
◊ H5 = h4 [R]
◊ H6 = h5 [R]

paramètres spécifiques aux matériaux CC à basse et à haute température, famille CUBIQUE1 (interaction entre les 12 systèmes de glissement) avec influence de 'irradiation (densités de dislocation spécifiques) :

| MONO_DD_CC_IRRA = _F(mêmes mot-clés que MONO_DD_CC, sauf :

♦ A_IRRA = a_{irr} [R] paramètre permettant la variation de α_{AT} avec ρ_{irr}

♦ XI_IRRA = ξ [R] paramètre permettant la variation de ρ_{irr} avec Δp

5.13 Mots clés facteur LEMAITRE, LEMAITRE_FO

Définition des coefficients de la relation de viscoplasticité non-linéaire de Lemaitre [R5.03.08].
Les équations sont les suivantes :

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_{ij}^{v} = \frac{3}{2}\dot{p}\frac{\widetilde{\sigma}_{ij}}{\sigma_{eq}} \\ \dot{p} = \left[\frac{1}{K}\frac{\sigma_{eq}}{p^{1/m}}\right]^{n} \\ \sigma = \Lambda\left(\varepsilon - \varepsilon^{v}\right) \end{cases}$$

Les coefficients à introduire sont : $n>0$, $\frac{1}{K}$ et $\frac{1}{m}\geq 0.$.

5.13.1 Syntaxe

| / LEMAITRE= _F (
♦ N = n,
[R]

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

```
                                ♦   UN_SUR_K     =     1/K    ,
          [R]
                                ◊   UN_SUR_M     =     / 1/m,
          [R]
                                                         / 0.0,
                [DEFAUT]
                              )

    / LEMAITRE_FO = _F (
                                ♦   N                  =     n,
                [fonction]
                                ♦   UN_SUR_K     =     1/K    ,
          [fonction]
                                ♦   UN_SUR_M     =     1/m,
    [fonction]
                                    )
```

Remarque :

En prenant $\frac{1}{m}=0$ (soit $m=+\infty$), c'est-à-dire en mettant 0 derrière l'opérande UN_SUR_M, on obtient une relation de visco-élasticité non-linéaire de Norton.

5.14 Mots clés facteur NORTON, NORTON_FO

Définition des coefficients de la relation de viscoplasticité non-linéaire de Norton disponible avec le modèle de comportement VISC_ECRO_NL [R5.03.33].
En appelant $F(\boldsymbol{\sigma},\kappa)$ la fonction seuil de viscoplasticité, l'évolution de la variable d'écrouissage κ est gouvernée par l'équation suivante :

$$\dot{\kappa}=\left(\frac{\langle F\rangle}{K}\right)^{n}$$

Les coefficients à introduire sont : $n>1$, $K\geq 0$.

5.14.1 Syntaxe

```
|     / NORTON= _F (
                                ♦   N                  =     n,
                  [R]
                                ♦ K                    =     K     ,
          [R]
                                )

    / NORTON_FO = _F (
                                ♦   N                  =     n,
                  [fonction]
                                ♦   K                  =     K      ,
                  [fonction]
                                    )
```

5.15 Mot clé facteur VISC_SINH

Définition des coefficients de la loi de viscosité définie par le potentiel viscoplastique suivant :

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

$$\Phi^{vp}=\Phi^{p}-\sigma_0\sinh^{-1}\left[\left(\frac{\dot{p}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^{\frac{1}{m}}\right]$$

L'équation définissant le taux de déformation plastique cumulée est donc la suivante :

$$\dot{p}=\dot{\varepsilon}_0\left[\sinh\left(\frac{\langle\Phi_p\rangle}{\sigma_0}\right)\right]^m$$

expression dans laquelle $\langle x\rangle$ désigne la partie positive de x et Φ_p le seuil plastique.

Ce modèle de viscosité peut être associé :
- Au mot clé ROUSSELIER pour définir la loi de comportement ROUSS_VISC
- Aux mots clés VMIS_ISOT_TRAC et VMIS_ISOT_LINE version SIMO_MIEHE : pour définir les lois de comportement VISC_ISOT_TRAC et VISC_ISOT_LINE.

Les coefficients à introduire sont : m , $\dot{\varepsilon}_0$ et $\sigma_0>0$.

5.15.1 Syntaxe

```
|      / VISC_SINH = _F  (
                                ♦      M            =      m ,
            [R]
                                ♦      EPSI_0       =      ε̇0 ,
        [R]
                                ♦      SIGM_0       =      σ0
        [R]
                                )

            / VISC_SINH_FO = _F      (
                                ♦      M            =      m ,
            [fonction]
                                ♦      EPSI_0       =      ε̇0 ,
        [fonction]
                                ♦      SIGM_0       =      σ0
        [fonction]
                                )
```

5.16 Mot clé LEMA_SEUIL

Définition des coefficients de la relation de viscoplasticité non linéaire de Lemaitre avec seuil [R5.03.08]. On se place dans l'hypothèse des petites perturbations et on scinde le tenseur des déformations en une partie élastique, une partie thermique, une partie anélastique (connue) et une partie visqueuse. Les équations sont alors :

$$\varepsilon_{tot}=\varepsilon_e+\varepsilon_{th}+\varepsilon_a+\varepsilon_v$$
$$\sigma=\mathbf{A}(T)\,\varepsilon_e$$
$$\dot{\varepsilon}_v=g(\sigma_{eq},\lambda,T)\frac{3}{2}\frac{\tilde{\sigma}}{\sigma_{eq}}$$

avec :

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

λ : déformation visqueuse cumulée $\dot{\lambda}=\sqrt{\frac{2}{3}\dot{\varepsilon}_v:\dot{\varepsilon}_v}$

$\widetilde{\sigma}$: déviateur des contraintes $\widetilde{\sigma}=\sigma-\frac{1}{3}Tr(\sigma)\mathbf{Id}$

σ_{eq} : contrainte équivalente $\sigma_{eq}=\sqrt{\frac{3}{2}\widetilde{\sigma}:\widetilde{\sigma}}$

$\mathbf{A}(T)$: tenseur d'élasticité

et :

si $D\leq 1$ alors $g(\sigma,\lambda,T)=0$ (comportement purement élastique)

si $D>1$ alors $g(\sigma,\lambda,T)=A\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma\right)\Phi$ avec $A\geq 0,\Phi\geq 0$

Avec : $D=\frac{1}{S}\int_0^t \sigma_{eq}(u)\,du$

Les données matériaux à renseigner par l'utilisateur sont A et S.

Quant au paramètre Φ, il s'agit du flux de neutrons qui bombarde le matériau (quotient de l'incrément de fluence, définie par le mot clé AFFE_VARC de AFFE_MATERIAU, par l'incrément de temps).

Le module de Young E et le coefficient de Poisson ν sont ceux fournis sous les mots clés facteurs ELAS ou ELAS_FO.

5.16.1 Syntaxe

```
| / LEMA_SEUIL = _F(
                                    ♦      A = A,
                          [R]
                                    ♦      S = S
                  [R]
                                    )
        / LEMA_SEUIL_FO =_F(
                                    ♦      A = A,
                  [fonction]
                                    ♦      S = S
                  [fonction]
                                    )
```

5.17 Mot clé facteur VISC_IRRA_LOG

Définition des paramètres d'une loi de fluage sous irradiation des tubes guides. Cette loi est constituée d'une loi de type primaire et d'une loi secondaire en logarithme de la fluence (cf. [R5.03.08]).

La formulation est la suivante (en uni-axial) :

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

$$\varepsilon_f = A.\exp\left(-\frac{Q}{T}\right).\sigma.\ln(1+\omega.\Phi.t) + B.\exp\left(-\frac{Q}{T}\right).\sigma.\Phi.t$$

ε_f déformation axiale de fluage
Q énergie d'activation
T température
σ contrainte axiale appliquée au tube guide en MPa
$\Phi.t = \Phi_t$ Fluence ($10^{24} neutrons/m^2$) = produit du flux Φ par le temps t , donnée par la variable de commande IRRA dans AFFE_MATERIAU
t temps, exprimé en heures
ω Constante de temps, exprimée telle que $\omega.\Phi.t$ soit sans unité
A Constante, exprimée de telle sorte que $A.\sigma$ soit homogène à une déformation
B Constante, exprimée de telle sorte que $B.\sigma.\Phi.t$ soit homogène à une déformation
C Constante, homogène à une déformation

Remarque: dans la programmation, le rapport Q/T est en fait pris comme $Q/(T+273,15)$, ce qui signifie que le champ de température (variable de commande) doit être en $°C$ et Q en $°K$.

5.17.1 Syntaxe

```
|    VISC_IRRA_LOG =_F (
                                ♦   A                =     a,
                        [R]
                                ♦   B                =     b,
                        [R]
                                ♦   CSTE_TPS     =     w,
                [R]
                                ♦   ENER_ACT     =     q ,
                [R]
                              )
```

5.18 Mot clé facteur GRAN_IRRA_LOG

Définition des paramètres d'une loi de fluage sous irradiation avec grandissement des tubes guides. Par rapport à VISC_IRRA_LOG, un terme de grandissement est ajouté (cf. [R5.03.08]) :

$$\varepsilon_f = A.\exp\left(-\frac{Q}{T}\right).\sigma.\ln(1+\omega.\Phi.t) + B.\exp\left(-\frac{Q}{T}\right).\sigma.\Phi.t + C.\exp(-\omega.\Phi.t)$$

$\varepsilon_g = f(T, \Phi_t)$ où f est une fonction de la température T exprimée en $°C$ et de la fluence Φ_t exprimée en $10^{24} neutrons/m^2$ (donnée par la variable de commande IRRA dans AFFE_MATERIAU).

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

5.18.1 Syntaxe

```
| GRAN_IRRA_LOG =_F     (
                                    ♦     A                 =     a,
                      [R]
                                    ♦     B                 =     b,
                      [R]
                                    ♦  C                =     c,
                [R]
                                    ♦     CSTE_TPS    =     w,
                [R]
                                    ♦     ENER_ACT    =     q ,
          [R]
                                    ◊     GRAN_FO     = Fct_g,
          [fonction]
                                    )
```

5.19 Mots clés facteur IRRAD3M

Loi de comportement des aciers sous irradiation (cf. [R5.03.23]).
La loi plastique devant se décrire sous la forme $K^*(p+p_0)^n$, il est nécessaire de calculer ces paramètres à partir de $R02$, RM, $EPSILON_U$ et $KAPPA$ via une méthode de dichotomie.

5.19.1 Syntaxe

```
| IRRAD3M = _F    (
                [fonction]
                                    ♦     R02               = R02,
                [fonction]
                                    ♦     EPSI_U            = eps i,
                [fonction]
                                    ♦     RM                = RM
                [R]
                                    ♦     AI0               = AIO
                [fonction]
                                    ◊     ZETA_F            = y0
                [R]
                                    ♦     ETAI_S            = etai,
                [fonction]
                                    ♦     RG0               = R   ,
                [R]
                                    ♦     ALHA        = ALPHA,
          [R]
                                    ♦     PHI0        = PHI0,
          [R]
                                    ◊     KAPPA       = /   KAPPA
                      [DEFAUT]                                /   0.8
                                          ◊    ZETA_G            = z0,
                [fonction]
                                          ◊    TOLER_ET    = /   inc
          [R]                                                     /   0.15
                      [DEFAUT]
                                    )
```

5.19.2 Opérandes R02/RM/EPSI_U/KAPPA

```
R02        = R02
EPSI_U     = eps i _u
RM         = RM
KAPPA= KAPPA
```


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

Paramètres intervenant dans la partie plastique de la loi. R02 est la limite d'élasticité à 0.2% de déformation plastique, Rm est la contrainte ultime, et epsi_u est l'allongement réparti.

TOLER_ET = inc
Ce mot clef correspond à l'erreur que l'on autorise sur le dépassement du seuil du fluage d'irradiation lors de l'intégration numérique. Si au cours du calcul le critère n'est pas respecté, Code_Aster subdivise les pas de temps, à condition que la subdivision des pas de temps soit autorisée, sinon le code s'arrête.

5.19.3 Opérandes AI02/ZETA_F/ETAI_S

AI0 = AIO,
ZETA_F = y0 .
ETAI_S = etai,
Paramètres liés à l'irradiation. y0 est une fonction de la température.

5.19.4 Opérandes RG0/ALPHA/PHI0/ZETA_G

ALPHA = ALPHA,
PHI0 = PHI0,
RG0 = R,
ZETA_G = z0
Paramètres liés au gonflement.

5.20 Mots clés facteurs ECRO_COOK, ECRO_COOK_FO

Paramètres d'une loi de plasticité à critère de Von Mises et à écrouissage isotrope suivant une relation de Johnson-Cook.

5.20.1 Syntaxe

```
| / ECRO_COOK =_F  (
♦     A           =     A,                                    [R]
♦     B           =     B,                                    [R]
                                    ◊     C           =     C,
                          [R]
                                    ♦     N_PUIS      =     n,
                    [R]
                                    ◊     M_PUIS      =     m,
                    [R]
                                    ◊     EPSP0 =     epsp0,
              [R]
                                    ◊     TROOM =     troom,
              [R]
                                    ◊     TMELT =     tmelt,
              [R]
                                     )
|     / ECRO_COOK_FO =_F(
                                          ♦     A           =     A,
                          [fonction]
                                          ♦     B           =     B,
                          [fonction]
                                          ◊     C           =     C,
                          [R]
                                          ♦     N_PUIS      =     n,
                    [R]
                                          ◊     M_PUIS      =     m,
                    [R]
```


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

```
                                        ◊      EPSP0 =      epsp0,
                    [R]
                                        ◊      TROOM =      troom,
                    [R]
                                        ◊      TMELT =      tmelt,
                    [R]
                                    )
```

5.21 Mots clés facteur KICHENIN_NL

On définit ici les paramètres du modèle de comportement élastoplastique / viscoélastique 'KICHENIN_NL' , en complément de ceux définis sous le mot-clé facteur ELAS .

5.21.1 Syntaxe

```
| KICHENIN_NL = _F(
                ♦ S IGC          = σ^c                    [R]
                ♦ PRAGER         = C                      [R]
                ♦ E_VISC         = E^v                    [R]
                ♦ NU_VISC        = ν^v                    [R]
                ♦ NU_AMOR        = ν^d                    [R]
                ♦ ETA_AMOR       = η                      [R]
                ♦ N_AMOR         = n                      [R]
               )
```

5.21.2 Opérandes

Les coefficients introduits au paragraphe précédent correspondent à ceux décrits dans [R5.03.36].

Les deux premiers, S IGC et PRAGER , renvoient à la branche élastoplastique du modèle. Ils caractérisent respectivement la limite d'élasticité et la constante de Prager qui lie la contrainte de rappel à la déformation plastique selon $X = C\,\varepsilon^p$. Le module de Young E^p et le coefficient de Poisson ν^p propres à la branche élastoplastique sont quant à eux définis sous le mot-clé facteur ELAS , via les mots-clés E et NU . Il en va de même du coefficient de dilatation thermique ALPHA le cas échéant.

Les cinq autres paramètres du mot-clé facteur KICHENIN _ NL caractérisent la branche viscoélastique, de type Maxwell et dans laquelle l'amortisseur est non linéaire selon une loi de Norton. Ainsi E_VISC et NU_VISC caractérisent respectivement le module de Young et le coefficient de Poisson de la branche viscoélastique. Enfin, NU_AMOR est le coefficient de Poisson propre à l'amortisseur, ETA_AMOR sa viscosité et N_AMOR l'exposant de sa non-linéarité tel que $\sigma^v = \eta\left(\dot{\varepsilon}^v\right)^n$.

Remarquons bien que les caractéristiques élastiques de la branche élastoplastique sont définies sous ELAS alors que les caractéristiques élastiques de la branche viscoélastique le sont sous KICHENIN _ NL . Et cela même si la rigidité globale du modèle de comportement tient compte de l'ensemble de ces valeurs.

5.22 Mots clés facteurs VMIS_ISOT_CUVE

Loi de comportement élastoplastique isotrope pour l'acier de cuve irradié dont les paramètres d'entrée sont les données de la microstructure avant et après irradiation. La contribution de la viscosité de l'acier de cuve, qui ne peut pas être négligée (surtout à basse température), est prise en compte implicitement via le paramètre VITE_DEFO , représentant la vitesse de déformation estimée.
La loi a été implémentée *via* MFront avec le Domain Specific Language @DSL IsotropicPlasticMisesFlow. Dans ce DSL, le calcul des grandeurs équivalentes et du vecteur d'écoulement est réalisé par le générateur MFront et non pas par le développeur de la loi. Par

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

conséquent, la loi exprime directement la contrainte d'écoulement en fonction de la déformation plastique cumulée.

5.22.1 Syntaxe

```
| VMIS_ISOT_CUVE = _F(
                ♦ TAILLE_GRAIN    = d                [R]
                ♦ VITE_DEFO       = ϵ̇_0              [R]
                ♦ RHO_DISLO       = ρ_0              [R]
                ♦ SIGMA_DM        = σ_DM             [R]
                ♦ C_AS            = C_AS             [R]
              )
```

5.22.2 Opérandes

- TAILLE_GRAIN d : Taille moyenne des paquets de lattes ferritiques (en m). La valeur caractéristique pour le métal de base est de 7.7E-6 m ;
- VITE_DEFO $\dot{\epsilon}_0$: vitesse de déformation estimée en s^{-1} ;
- RHO_DISLO ρ_0 : densité moyenne de dislocations en m^{-2} avec une valeur typique de 1.5e14 m^{-2}. Si elle n'est pas connue expérimentalement, elle peut être ajustée pour reproduire la courbe de traction à une température donnée ;
- SIGMA_DM σ_{DM} : contribution du dommage de la matrice (la valeur typique est 0) ;
- C_AS C_{AS} : densité d'amas de solutés induits par l'irradiation (0 pour le non irradié et typiquement 10.E23 m^{-3} après 40 ans d'exploitation).

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

6 Comportements liés à l'endommagement et la rupture

6.1 Mots clés facteur ROUSSELIER, ROUSSELIER_FO

Définition des coefficients du modèle de comportement de rupture ductile de Rousselier (cf.[R5.03.06] et [R5.03.07]). Ce modèle peut être utilisé en petites déformations, en grandes déformations et en viscoplasticité (mot clé VISC_SINH)

Brièvement, on résout pour un incrément élastoplastique :

$$\begin{cases} \frac{\sigma_{eq}}{\rho} - R(p) + D\sigma_1 f \exp\left(\frac{\sigma_H}{\sigma_1}\rho\right) = 0 \quad \text{éq 5.1-1} \\ \sigma = \rho\,\Lambda(\varepsilon - \varepsilon^p) \\ \dot{\varepsilon}_p = \dot{p}\,\rho\frac{\partial f}{\partial \sigma} \\ \dot{f} = 3(1-f)\,\varepsilon_H^p \end{cases}$$

avec

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial \sigma} = \frac{1}{\rho}\left(\frac{3}{2}\frac{\tilde{\sigma}}{\sigma_{eq}} + \frac{Df}{3}\exp\left(\frac{\sigma_H}{\sigma_1\rho}\right)\right) \\ \rho = \frac{1-f}{1-f_0} \end{cases} \quad \text{éq 5.1-2}$$

$R(p)$ entrée par l'intermédiaire de la courbe de traction (mot clé TRACTION).

Avec les coefficients matériaux D, σ_1, f_0 spécifiques au modèle de ROUSSELIER.

Ces différents paramètres peuvent dépendre de la température, dans ce cas on emploiera le mot clé ROUSSELIER_FO.

Il est possible de compléter le modèle en faisant intervenir les quantités suivantes:

- la porosité critique f_c au-delà de laquelle la croissance des cavités est accélérée :

  $$\dot{f} = 3A(1-f)\,\varepsilon_H^p \quad si\ f > f_c$$

  deux caractéristiques supplémentaires sont alors nécessaires : f_c et A .

- la porosité limite f_l au-delà de laquelle le matériau est considéré cassé. Le comportement est alors remplacé par une chute imposée des contraintes :

  $$\dot{\sigma} = -\lambda E \frac{\sigma}{|\sigma|}|\dot{\varepsilon}| \quad si\ f = f_l$$ (avec E défini sous ELAS).

  deux caractéristiques supplémentaires sont alors nécessaires : f_1 et λ .

- le taux de germination volumique de fissures de clivages A_n , modifiant comme suit les équations [éq 5.1-1] et [éq 5.1-2].

  $$\begin{cases} \frac{\sigma_{eq}}{\rho} - R(p) + D\sigma_1(f + A_n p)\exp\left(\frac{\sigma_H}{\sigma_1\rho}\right) = 0 \\ \rho = \frac{1-f-A_n p}{1-f_0} \end{cases}$$

Ces cinq derniers paramètres sont indépendants de la température.

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

Le tableau suivant de correspondance doit être utilisé:

Modélisation	Mots-clés
D	D
σ_1	SIGM_1
f_0	PORO_INIT
f_c	PORO_CRIT dp
A	PORO_ACCE
A_n	AN
f_l	PORO_LIMI
λ	D_SIGM_EPSI_NORM

Dans la version SIMO_MIEHE la loi de comportement demande un redécoupage quand l'incrément de déformation plastique est supérieur à la valeur dp fournie derrière le mot clé DP_MAXI.
Le mot clé BETA est à renseigner avec les comportements ROUSS_PR ou ROUSS_VISC pour prendre en compte l'échauffement adiabatique : il fixe la proportion d'énergie plastique qui est effectivement transformée en chaleur.

Le choix est donné à l'utilisateur par l'intermédiaire du mot clé PORO_TYPE de changer la formulation de la porosité en fonction de la déformation plastique ou de la déformation totale. Il a été remarqué que pour une porosité initiale f_0 faible, le comportement au début d'évolution change fortement en fonction de ce paramètre. Ainsi PORO_TYPE est affecté de 1 (porosité en déformation plastique), 2 (porosité en déformation totale).

6.1.1 Syntaxe

```
| /   ROUSSELIER =
  /   ROUSSELIER_FO=_F  (
                                ♦     D                                =
      D,                        [R] ou [fonction]
                                ♦     SIGM_1                     =
sigma1,                 [R] ou [fonction]
                                ♦     PORO_INIT          =     f0,
            [R] ou [fonction]
                                ◊     PORO_CRIT          =     /
1.D0,             [DEFAUT]

/     fc,               [R]
                                ◊     PORO_ACCE          =     /
1.D0,             [DEFAUT]
                                                                 /
A,                        [R]
                                ◊     AN                                 =
/     0.D0,               [DEFAUT]

/     An,
                                ◊     PORO_LIMI          =     /
0.999,            [DEFAUT]

/     fl,               [R]
```


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

```
                                ◊      D_SIGM_EPSI_NORM=/      1.D0,
        [DEFAUT]

/       lambda,             [R]
                                ◊      DP_MAXI                 =       /
0.1,                [DEFAUT]

/       dp,                 [R]
                                ◊      BETA                    =       /
0.85,               [DEFAUT]

/       beta                [R]
                                ◊      PORO_TYPE               =       /
1             [DEFAUT]

        /       2           [R]
                        )
```

6.1.2 Aide à l'utilisation

Le modèle de Rousselier a fait l'objet de nombreux développements et dispose de plusieurs variantes nommées ROUSSELIER, ROUSS_PR et ROUSS_VISC (ces modèles sont disponibles dans la commande STAT_NON_LINE par l'intermédiaire du mot clé RELATION). Ainsi chacun de ses modèles nécessite une connaissance particulière du point de vue « utilisateur ». Afin de clarifier cela, un tableau récapitulatif est exposé ci-dessous, accompagné de diverses remarques.

		ROUSSELIER [R5.03.06]	ROUSS_PR [R5.03.07]	ROUSS_VISC [R5.03.07]
COMPORTEMENT	SIMO_MIEHE	X		
	GDEF_LOG	X		
	PETIT_REAC		X	X
MODELISATION	3D	X	X	X
	Axisymétrique	X	X	X
	CP		X	X
	DP	X	X	X
	INCOMPRESSIBLE (xxx_inco_ugp)	X		

Remarques :

Lorsque l'on utilise les éléments incompressibles (se reporter à la doc [R3.06.08]), le mot clé C_GONF doit être renseigné dans DEFI_MATERIAU sous l'opérande NON_LOCAL (se reporter au §5.6 et au cas-test ssnp122a).

Pour une formulation à trois champs UPG , il est préférable d'utiliser le solveur MUMPS pour résoudre les systèmes linéaires. De plus, l'utilisateur doit être averti qu'il est conseillé de considérer comme critère de convergence, un critère de convergence par contrainte de référence s ous le mot clé RESI_REFE_RELA .

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

6.2 Mot clé facteur GTN

Ce mot-clé permet de définir les coefficients du modèle de GTN (relations de comportement GTN et VISC_GTN) pour la partie liée à l'évolution de la porosité, cf. [R5.03.29]. Il couvre les trois aspects de la rupture ductile, à savoir les phases de germination, de croissance et de coalescence de cavités.

6.2.1 Syntaxe

```
 | GTN = _F (       ◊    NUCL_GAUSS_PORO   = /0,0
[DEFAUT]

        / f_N                       [R]
                                    ◊    NUCL_GAUSS_PLAS   = /0,1
      [DEFAUT]

  / κ_N                     [R]
                                    ◊    NUCL_GAUSS_DEV    = /0,05
      [DEFAUT]

  / s_N                     [R]
                                    ◊    NUCL_CRAN_PORO    = /0,0
      [DEFAUT]

      / c_0                 [R]
                                    ◊    NUCL_CRAN_INIT    = /0,05
[DEFAUT]

            / κ_i           [R]
                                    ◊    NUCL_CRAN_FIN          = /0,15
            [DEFAUT]

            / κ_f           [R]
                                    ◊    NUCL_EPSI_PENTE   = /0,0
      [DEFAUT]

            / b_0           [R]
                                    ◊    NUCL_EPSI_INIT    =     /0,80
            [DEFAUT]

      / E_c^p                   [R]
```


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

♦ PORO_INIT = f_0 [R]

♦ Q1 = q_1 [R]

♦ Q2 = q_2 [R]

◊ COAL_PORO = /0,0 [DEFAUT]

/ f_c [R]

◊ COAL_ACCE = /1,0 [DEFAUT]

/ δ_c [R]

)

Opérandes

La phase de germination de cavités (*nucleation* en anglais, d'où le préfixe NUCL dans les mots-clés) est modélisée par une contribution à la porosité, notée f^{nuc}, l'autre contribution étant liée à la croissance des cavités f^{growth} :

$$\dot{f} = \dot{f}^{growth} + \dot{f}^{nuc} \quad ; \quad \dot{f}^{growth} = (1-f)\,\mathrm{tr}\,\dot{\mathbf{E}}^{\mathbf{p}} \quad \text{avec} \quad f(0) = f_0$$

L'évolution de la porosité de germination est fonction de la variable d'écrouissage κ et de la déformation plastique cumulée selon le modèle incrémental suivant :

$$\dot{f}^{nuc} = B_n(\kappa)\dot{\kappa} + b_0 \dot{E}^p_{eq} H\left(E^p_{eq} - E^p_c\right) \quad ; \quad B_n(\kappa) = \frac{f_N}{s_N\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\kappa-\kappa_N}{s_N}\right)^2\right] + \frac{c_0}{\kappa_f - \kappa_i}\chi_{[\kappa_i\,;\,\kappa_f]}$$

où H désigne la fonction de Heaviside (nulle pour un argument strictement négatif, égale à 1 pour un argument positif) et χ_I la fonction caractéristique d'un ensemble I (égale à 1 dans I, nulle ailleurs).

En l'absence de déclaration des paramètres de germination, la fonction B et b_0 sont nuls si bien qu'il n'y a alors pas de germination.

La croissance de cavité est décrite par l'évolution de la plasticité, gouvernée par une fonction seuil qui s'appuie sur une contrainte équivalente T_*. Cette dernière est définie implicitement par l'équation suivante, dans laquelle $\mathbf{T}$ désigne le tenseur contrainte propre à la cinématique GDEF_LOG :

$$\left(\frac{T_{eq}}{T_*}\right)^2 + 2\,q_1 f_* \cosh\left(q_2 \frac{3}{2}\frac{T_H}{T_*}\right) - 1 - q_1 f_* = 0$$

où T_{eq} désigne la contrainte équivalente de von Mises et T_H le tiers de la trace de $\boldsymbol{T}$.

Enfin, la coalescence se traduit par une accélération de l'évolution de la porosité effective f_* selon la relation suivante :

$$\begin{cases} \text{si } f \le f_c & f_* = f \\ \text{si } f > f_c & f_* = f_c + \delta_c(f - f_c) \end{cases}$$

Là encore, il n'y aura pas de mécanisme de coalescence ($f_* = f$) si les paramètres correspondants ne sont pas renseignés.

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

6.3 Mots clés VENDOCHAB / VENDOCHAB_FO

Définition des coefficients du modèle viscoplastique avec endommagement scalaire de Chaboche confer [R5.03.15]). C'est un comportement à écrouissage-viscosité multiplicatif couplé à de l'endommagement isotrope. Brièvement, les relations sont :

$$\begin{cases} \sigma=(1-D)\,A\,\varepsilon^{e} \text{ et } \varepsilon^{e}=\varepsilon-\varepsilon^{th}-\varepsilon^{p} \\ \dot{\varepsilon}^{p}=\frac{3}{2}\,\dot{p}\,\frac{\tilde{\sigma}}{\sigma_{eq}} \text{ avec } \dot{p}=\frac{\dot{r}}{(1-D)} \\ \dot{r}=\left(\frac{\sigma_{eq}-S(1-D)}{(1-D)\,Kr^{1/M}}\right)^{N} \\ \dot{D}=\left(\frac{\chi(\sigma)}{A}\right)^{R}(1-D)^{-k(\chi(\sigma))} \end{cases}$$

avec D , la variable scalaire d'endommagement isotrope et :

$$\chi(\sigma)=\alpha J_0(\sigma)+\beta J_1(\sigma)+(1-\alpha-\beta)J_2(\sigma)$$

où :

$J_0(\sigma)$ est la contrainte principale maximale

$J_1(\sigma)=Tr(\sigma)$

$J_2(\sigma)=\sigma_{eq}$

$\langle x\rangle$: partie positive de x , $\tilde{\sigma}$ déviateur des contraintes et σ_{eq} la contrainte de Von Mises.

6.3.1 Syntaxe

```
| / VENDOCHAB           =
  / VENDOCHAB_FO  = _F  (
                              ♦    SY                =     SY,
                    [R]   ou [fonction]
                              ♦    ALPHA_D     =     alpha,
              [R]   ou    [fonction]
                              ♦    BETA_D            =     beta,
              [R]   ou    [fonction]
                              ♦    A_D               =     ad,
              [R]   ou    [fonction]
                              ♦    R_D               =     rd,
              [R]   ou    [fonction]
                              ♦    K_D               =     kd
                    [R]   ou    [fonction]
                              )
```

Le tableau ci-dessous résume les correspondances entre les symboles des équations et les mots clés d'*Aster*.

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

Paramètre matériau	Symbole dans les équations	Mot clé dans *Aster*
Seuil de viscoplasticité	S	'SY'
Coefficient 1 de la contrainte équivalente de fluage	α	'ALPHA_D'
Coefficient 2 de la contrainte équivalente de fluage	β	'BETA_D'
Coefficient de la loi d'endommagement	A	'A_D'
Premier exposant de la loi d'endommagement	R	'R_D'
Deuxième exposant de la loi d'endommagement	$k[\chi[\sigma]]$	'K_D'

Remarque :

*Le paramètre K_D peut être défini comme une constante, une fonction d'un paramètre 'TEMP' ou une nappe (variable de température et de contrainte $\chi(\sigma)$). Dans ce cas, utiliser DEFI_NAPPE avec comme premier paramètre 'TEMP' pour la température en $°C$ et comme second paramètre 'X' (**obligatoire**) pour les contraintes en MPa. Si K_D ne dépend que de $\chi(\sigma)$, il faut utiliser DEFI_NAPPE de toute façon en introduisant par exemple deux fois le même jeu de données en contrainte pour deux valeurs différentes de la température.*

6.4 Mots clés VISC_ENDO / VISC_ENDO_FO

Définition des coefficients du modèle visco-plastique de Lemaître avec endommagement scalaire VISC_ENDO_LEMA cf. [R5.03.15]), qui correspond à une version simplifiée et optimisée du modèle VENDOCHAB (cf. [U4,51,11]).

$$\begin{cases} \sigma=(1-D)\,A\,\varepsilon^{e} \text{ et } \varepsilon^{e}=\varepsilon-\varepsilon^{th}-\varepsilon^{p} \\ \dot{\varepsilon}^{p}=\frac{3}{2}\,\dot{p}\,\frac{\widetilde{\sigma}}{\sigma_{eq}} \text{ avec } \dot{p}=\frac{\dot{r}}{(1-D)} \\ \dot{r}=\left(\frac{\frac{\sigma_{eq}}{(1-D)}-\sigma_{y}}{Kr^{1/M}}\right)^{N} \qquad \dot{D}=\left(\frac{\sigma_{eq}}{A(1-D)}\right)^{R} \end{cases}$$

Syntaxe

```
      | / VISC_ENDO           =
        / VISC_ENDO_FO  = _F  (
                                    ♦    SY                =     sy
                                  [R]   ou [fonction]
                                    ♦    A_D               =     ad,
                  [R]   ou    [fonction]
                                    ♦    R_D               =     rd,
                  [R]   ou    [fonction]
                                    )
```

Le tableau ci-dessous résume les correspondances entre les symboles des équations et les mots clés d'*Aster*.

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

Paramètre matériau	Symbole dans les équations	Mot clé dans *Aster*
Seuil de viscoplasticité	σ_y	'SY'
Coefficient de la loi d'endommagement	A	'A_D'
Premier exposant de la loi d'endommagement	R	'R_D'

6.5 Mots-clés HAYHURST et HAYHURST_FO

Définition des coefficients du modèle visco-plastique de Hayhurst, pour décrire le comportement élasto-viscoplastique des aciers austénitiques, avec un endommagement scalaire en sinus hyperbolique, fonction de la contrainte principale maximale, un écrouissage isotrope et une loi visqueuse en sinus hyperbolique :

$$\begin{cases} \sigma=(1-D)\,\boldsymbol{C}\,\varepsilon^e \text{ et } \varepsilon^e=\varepsilon-\varepsilon^{th}-\varepsilon^p \\ \dot{\varepsilon}^p=\frac{3}{2}\,\dot{p}\,\frac{\widetilde{\sigma}}{\sigma_{eq}} \text{ avec } \dot{p}=\dot{\varepsilon}_0 \sinh\left(\frac{\sigma_{eq}(1-H)}{K(1-D)(1-\varphi)}\right) \text{ avec } \dot{\varphi}=\frac{k_c}{3}(1-\varphi)^4 \\ \text{si S_EQUI_D}=0 \quad \dot{D}=\dot{A}_0 \sinh\left(\frac{\alpha<\sigma_I>_+ +\sigma_{eq}(1-\alpha)}{\sigma_0}\right) \\ \text{si S_EQUI_D}=1 \quad \dot{D}=\dot{A}_0 \sinh\left(\frac{\alpha<tr(\sigma)>_+ +\sigma_{eq}(1-\alpha)}{\sigma_0}\right) \\ H=H_1+H_2 \\ \dot{H}_i=\frac{h_i}{\sigma_{eq}}\left(H_i^*-\delta_i H_i\right)\dot{p} \quad i=1,2 \end{cases}$$

6.5.1 Syntaxe

```
| / HAYHURST      = _F  (
                    ♦   EPS0   =    ε̇0                          [R]
                    ♦   K      =    K ,                         [R]
                    ♦   H1     =    h1 ,                        [R]
                    ♦   H2     =    h2 ,                        [R]
                    ♦   DELTA1 =    δ1 ,          [R]
                    ♦   DELTA2 =    δ2 ,          [R]
                    ♦   H1ST   =    H1* ,         [R]
                    ♦   H2ST   =    H2* ,         [R]
                    ♦   BIGA   =    Ȧ0 ,          [R]
                    ♦   SIG0   =    σ0 ,          [R]
                    ◊   ALPHAD =    /   0                       [DEFAUT]
                                    /   α
[R]
                    ◊   KC     =    /   0
[DEFAUT]
                                    /   kc ,                    [R]
                    ◊   S_EQUI_D =  /   0                       [DEFAUT]
```


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

```
                                                        /     1
            [R]
                          )

| / HAYHURST_FO   = _F  (
                          ♦    EPS0  =    ε̇0                    [fonction]
                          ♦    K     =    K ,                   [fonction]
                          ♦    H1    =    h1 ,                  [fonction]
                          ♦    H2    =    h2 ,                  [fonction]
                          ♦    DELTA1     =    δ1 ,            [fonction]
                          ♦    DELTA2     =    δ2 ,            [fonction]
                          ♦    H1ST  =    H1* ,                 [fonction]
                          ♦    H2ST  =    H2* ,                 [fonction]
                          ♦    BIGA  =    Ȧ0 ,                  [[fonction]
                          ♦    SIG0  =    σ0 ,                  [fonction]
                          ♦    ALPHAD     =    α ,
            [fonction]
                          ♦    KC    =    kc ,                  [fonction]
                          ◊    S_EQUI_D   =    /     0           [DEFAUT]
                                                        /     1           [R]
                          )
```

6.6 Mot clé facteur RUPT_FRAG, RUPT_FRAG_FO

La théorie de la rupture de Francfort et Marigo permet de modéliser l'apparition et la propagation de fissures en rupture fragile. Elle s'appuie sur le critère de Griffith qui compare la restitution d'énergie élastique et l'énergie dissipée lors de la création d'une surface fissurée, fournie par le mot clé GC. Ce sont les notions qui sont utilisées pour décrire la rupture dans les modèles de zones cohésives, moyennant la définition d'autres notions spécifiques à certaines lois. RUPT_FRAG est le mot clé utilisé pour définir les paramètres matériaux des lois de comportement cohésives, CZM_* (à l'exception de CZM_TRA_MIX et CZM_LAB_MIX) (voir [R7.02.11]).

6.6.1 Syntaxe

```
◊     |  / RUPT_FRAG     =     _F     (
                                       ♦    GC                          =
      gc,                        [R]
                                       ◊    SIGM_C                      =
      sigm,              [R]
                                       ◊    PENA_ADHERENCE    =     pad,
                  [R]
                                       ◊    PENA_CONTACT                =
      /pco,              [R]

      /1.,                           [DEFAUT]
                                       ◊    PENA_LAGR                   =     /pla
                  [R]

      /100.,                         [DEFAUT]
                                       ◊    RIGI_GLIS                   =
      /pgl,              [R]
```


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

```
/10.,                          [DEFAUT]
                                ◊    CINEMATIQUE       =
/'UNILATER',      [DEFAUT]

/'GLIS_2D',             [TXM]

/'GLIS_1D',             [TXM]
                               )
      / RUPT_FRAG_FO    =_F   (
                                ♦    GC                              =
gc,                        [fonction]
                                ◊    SIGM_C                          =
sigm,             [fonction]
                                ◊    PENA_ADHERENCE    =     pad,
            [fonction]
                                     PENA_CONTACT            =     pco,
                  [fonction]
                                ◊    PENA_LAGR               =     /pla
            [R]

/100.,                         [DEFAUT]
                                ◊    RIGI_GLIS               =
/pgl,             [R]

/10.,                          [DEFAUT]
                                ◊    CINEMATIQUE       =
/'UNILATER',      [DEFAUT]

/'GLIS_2D',             [TXM]

/'GLIS_1D',             [TXM]
                               )
```

Opérande G_C

L'énergie dissipée est proportionnelle à la surface de fissure créée, le coefficient de proportionnalité étant la densité d'énergie critique du matériau G_c .

6.6.2 Opérande SIGM_C

Contrainte critique à l'origine à partir de laquelle la fissure va s'ouvrir et la contrainte entre les lèvres décroître.

6.6.3 Opérande PENA_ADHERENCE

Petit paramètre de régularisation de la contrainte en zéro (pour plus de détails voir [R7.02.11]).

Remarque :

Les paramètres SIGM_C et PENA_ADHERENCE sont uniquement obligatoires dans le cas des modélisations xxx_JOINT . Ils ne sont pas utilisés pour le critère de Griffith, c'est pourquoi ils apparaissent comme facultatifs au niveau du catalogue.

6.6.4 Opérande PENA_CONTACT

Petit paramètre de régularisation du contact.

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

6.6.5 Opérandes PENA_LAGR et RIGI_GLIS

Paramètre de pénalisation du lagrangien ($pla \geq 1.01$) et rigidité en mode de glissement.

Opérande CINEMATIQUE

Détermine les modes d'ouverture autorisés par la loi d'interface pour la loi CZM_TAC_MIX . 'UNILATER' signifie que les deux volumes de part et d'autre de l'interface ne peuvent s'interpénétrer, 'GLIS_2D' que les deux volumes ne peuvent que coulisser dans le plan tangent à l'interface, et 'GLIS_1D' qu'il ne peuvent coulisser que dans une seule direction.

Le repère tangent considéré est défini via le mot-clé facteur MASSIF de AFFE_CARA_ELEM [U4.42.01]. Dans le cas d'un glissement unidimensionnel, la seule direction de glissement possible est définie par le second vecteur du repère pivoté (Oy).

6.7 Mot clé facteur NON_LOCAL

Ce mot clé facteur permet de renseigner les caractéristiques nécessaires à l'emploi de modèles de comportement non locaux pour lesquels la réponse du matériau ne se définit plus à l'échelle du point matériel mais à celle de la structure, voir également AFFE_MODELE [U4.41.01] et [R5.04].

Syntaxe

```
| NON_LOCAL      =      _F     (
                                ◊     LONG_CARA                =
      long,                     [R]
                                ◊     C_GRAD_VARI       =      long,
                          [R]
                                ◊     COEF_RIGI_MINI    =
coef,                           [R]
                                ◊      C_GONF
=     gonf,                     [R]
                                ◊      PENA_LAGR              =
pena,                     [R]
                                ◊      PENA_LAGR_ INCO        =
pena_ inco ,[R]
                                )
```

6.7.1 Opérandes LONG_CARA/C_GRAD_VARI/COEF_RIGI_MINI/C_GONF/PENA_LAGR

LONG_CARA = long

Détermine la longueur caractéristique ou échelle de longueur interne au matériau. A ne pas utiliser avec les lois d'endommagement non local à gradient de d'endommagement GRAD_VARI.

C_GRAD_VARI = long

Paramétre de non localité pour la formulation à gradient de variable interne, présent dans l'énergie libre sous la forme $c/2\left(\nabla a\right)^2$. Il détermine la longueur caractéristique de la zone d'endommagement. À utiliser exclusivement avec les lois d'endommagement non local à gradient de d'endommagement GRAD_VARI.

COEF_RIGI_MINI = coef

A quant à lui un rôle algorithmique puisqu'il fixe, pour les modèles d'endommagement qui dégradent la rigidité du matériau, la proportion de la rigidité initiale (module de Young) définit sous ELAS (0,1 % par exemple) en deçà de laquelle on stoppe le mécanisme d'endommagement : cette rigidité résiduelle permet de préserver le caractère bien posé du problème élastique.

C_GONF = gonf

Dans le modèle de Rousselier, le caractère adoucissant est porté par la porosité qui a un effet purement hydrostatique. Pour contrôler la localisation, l'idée est de régulariser le problème

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

uniquement sur cette partie et donc de régulariser la variable de gonflement si on utilise la modélisation INCO_UPG.

PENA_LAGR = pena
Paramètre de pénalisation utilisé pour les modélisations à gradients de variables internes (_GRAD_VARI) et second gradient (_DIL), qui permet de contrôler la coïncidence entre un champ aux nœuds (degrés de liberté spécifiques au non local) et un champ aux points de Gauss (variable interne ou déformation).
Une valeur par défaut de 1000 est implantée. Pour la modélisation _DIL il est déconseillé de diminuer cette valeur (perte de précision pour la résolution). Pour la modélisation GRAD_VARI ce paramètre correspond au multiplicateur r du terme quadratique de pénalisation dans l'énergie libre: $r/2\left(\alpha-a\right)^2$. C'est à utilisateur d'ajuster sa valeur en fonction de la loi utilisée.

PENA_LAGR_INCO = pena_inco
Paramètre de pénalisation utilisé pour les modélisations à gradients de variables internes en grandes déformations (_GRAD_INCO), qui permet de renforcer la relation cinématique entre le degré de liberté de gonflement et le changement de volume vu de la déformation. Des tests numériques dans le cas d'un problème de rupture ductile conduisent à recommander une valeur de l'ordre de dix fois la limite d'élasticité initiale. Une valeur trop faible (ou nulle) peut entraîner l'apparition de bandes de localisation plastiques. Une valeur trop forte conduit au verrouillage numérique en incompressibilité que cherche justement à limiter cette cinématique enrichie.

6.8 Mot clé facteur CZM_LAB_MIX

Ce mot-clé facteur permet de préciser les paramètres de la loi d'interface acier-béton CZM_LAB_MIX (voir [R7.02.11]).

6.8.1 Syntaxe

```
| CZM_LAB_MIX   =     _F    (
   ♦     SIGM_C      =     sigm,                  [R]
   ♦     GLIS_C      =     glis,                  [R]
   ◊     ALPHA       =     /alpha,                [R]
                           /0.5,                  [DEFAUT]
   ◊     BETA        =     /beta,                 [R]
                           /1.,                   [DEFAUT]
   ◊     PENA_LAGR   =     /pla                   [R]
                           /100.,                 [DEFAUT]
   ◊     CINEMATIQUE =     /'GLIS_1D',            [DEFAUT]
                           /'GLIS_2D',            [TXM]
                           /'UNILATER',           [TXM]
                                 )
```

6.8.2 Opérande SIGM_C

Contrainte maximale supportable par l'interface acier-béton.

6.8.3 Opérande GLIS_C

Glissement pour lequel la contrainte à l'interface est maximale.

6.8.4 Opérande ALPHA et BETA

Paramètres de forme de la loi d'adhérence acier-béton. alpha varie typiquement entre 0 et 1, tandis que beta est positif.

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

6.8.5 Opérandes PENA_LAGR

Paramètre de pénalisation du lagrangien ($pla \geq 1.01$).

6.8.6 Opérande CINEMATIQUE

Détermine les modes de glissement autorisés par la loi d'interface. 'UNILATER' signifie que les deux volumes de part et d'autre de l'interface ne peuvent s'interpénétrer, 'GLIS_2D' que les deux volumes ne peuvent que coulisser dans le plan tangent à l'interface, et 'GLIS_1D' qu'il ne peuvent coulisser que dans une seule direction.

Le repère tangent considéré est défini via le mot-clé facteur MASSIF de AFFE_CARA_ELEM [U4.42.01]. Dans le cas d'un glissement unidimensionnel, la seule direction de glissement possible est définie par le second vecteur du repère pivoté (Oy).

6.9 Mot clé facteur RUPT_DUCT

Ces caractéristiques de matériau sont destinées à définir le comportement d'une fissure cohésive ductile avec la loi de comportement CZM_TRA_MIX voir [R7.02.11].

6.9.1 Syntaxe

```
◊     |  / RUPT_DUCT     =      _F     (
                                        ♦     GC                              =
      gc,                [R]
                                        ♦     SIGM_C                          =
      sigm,        [R]
                                        ♦     COEF_EXTR                =
      coee,        [R]
                                        ♦     COEF_PLAS                =
      coep,        [R]
                                        ◊     PENA_LAGR                =     /pla
            [R]

      /100.,                    [DEFAUT]
                                        ◊     RIGI_GLIS                =
      /pgl,        [R]

      /10.,                     [DEFAUT]
                                        )
```

6.9.2 Opérande G_C

L'énergie dissipée est proportionnelle à la surface de fissure créée, le coefficient de proportionnalité étant la densité d'énergie critique du matériau G_c .

6.9.3 Opérande SIGM_C

Contrainte critique à l'origine à partir de laquelle la fissure va s'ouvrir.

6.9.4 Opérandes COEF_EXTR et COEF_PLAS

Paramètres de forme de la loi cohésive CZM_TRA_MIX voir [R7.02.11].

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

6.9.5 Opérandes PENA_LAGR et RIGI_GLIS

Paramètre de pénalisation du lagrangien ($pla \geq .01$) et rigidité en mode de glissement.

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

6.10 Mot clé facteur RANKINE

La modélisation simplifiée de joints des barrages en béton s'appuie sur ce matériau [R7.01.39]. Il s'agit d'un critère de plasticité parfaite en traction portant sur les composantes des contraintes principales : $\sigma_{i=1,2,3} \leq \sigma_t$. Quand une contrainte principale atteint la valeur seuil σ_t , le joint s'ouvre dans cette direction. Il est à noter que la déformation plastique ainsi créée n'est pas réversible, le modèle ne permet donc pas de représenter la refermeture du joint et n'est valable que sur un trajet de chargement monotone.

6.10.1 Syntaxe

```
◊      | RANKINE  =     _F     (
                                        ♦     SIGMA_T
      =     sigm,              [R]
)
```

6.10.2 Opérande SIGMA_T

Seuil en traction (valeur positive).

6.11 Mot clé facteur JOINT_MECA_RUPT

La modélisation de joints des barrages s'appuie sur ces caractéristiques de matériau, cf. [R7.01.25]. La pression hydrostatique due à l'éventuelle présence de fluide dans le joint est prise en compte. Deux procédures industrielles sont aussi implémentées : le clavage - l'injection du béton sous pression entre les plots de l'ouvrage et le sciage – le sciage de barrage afin de relâcher les contraintes de compression. Ce mot clé matériau est utilisé par la loi de comportement du même nom : JOINT_MECA_RUPT.

6.11.1 Syntaxe

```
◊      | JOINT_MECA_RUPT      =      _F    (
       ♦    K_N                     =     kn,                    [R]
       ◊    K_T                     =     kt,                    [R]
       ♦    SIGM_MAX                =     sigm,                  [R]
       ◊    ALPHA                   =     /alpha,                [R]
                                          /1.,                   [DEFAUT]
       ◊    PENA_RUPTURE            =      pru,                  [R]
       ◊    PENA_CONTACT            =     /pco,                  [R]
                                          /1.,                   [DEFAUT]
       ◊    PRES_FLUID              =     pflu                   [fonction]
       ◊    PRES_CLAVAGE            =     pcla,                  [fonction]
       ◊    SCIAGE                  =     scia,                  [fonction]
       ◊    RHO_FLUIDE              =     rho,                   [R]
       ◊    VISC_FLUIDE             =     vflu                   [R]
       ◊    OUV_MIN                 =     oumi,                  [R]
)
```

6.11.2 Opérande K_N

Rigidité normale en traction.

6.11.3 Opérande K_T

Rigidité tangentielle.

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

6.11.4 Opérande SIGM_MAX

Contrainte critique maximale à partir de laquelle la fissure s'ouvre et la contrainte entre les lèvres décroît. Cette contrainte est souvent appelée résistance à la traction.

6.11.5 Opérande ALPHA

Paramètre de régularisation de l'endommagement tangentiel. La longueur d'ouverture critique à partir de laquelle la rigidité tangentielle tombe vers zéro est définie ainsi:

$$L_{CT} = L_C \tan\left(ALPHA\,\pi/4\right)$$

Opérande PENA_RUPTURE
Paramètre de lissage de rupture fragile. L'ouverture maximale avant la rupture complète est donnée par $L_C = SIGM_MAX\,(1 + PENA_RUPTURE)/K_N$

6.11.6 Opérande PENA_CONTACT

Rapport entre la rigidité normale en compression et en traction.

6.11.7 Opérande PRES_FLUIDE

Pression sur les lèvres de la fissure due à la présence de fluide (fonction qui peut dépendre de coordonnées géométriques ou de l'instant). Uniquement valable avec les modélisations joint mécanique : *_JOINT, et incompatible avec RHO_FLUIDE, VISC_FLUIDE et OUV_MIN.

6.11.8 Opérande PRES_CLAVAGE

Pression de béton injecté dans le joint pendant la phase de clavage (fonction qui peut dépendre de coordonnées géométriques ou de l'instant). Uniquement valable avec les modélisations joint mécanique : *_JOINT, et incompatible avec RHO_FLUIDE, VISC_FLUIDE et OUV_MIN.

6.11.9 Opérande SCIAGE

La taille de scie utilisée pendant la phase de sciage. Uniquement valable avec les modélisations joint mécanique : *_JOINT, et incompatible avec RHO_FLUIDE, VISC_FLUIDE et OUV_MIN.

6.11.10 Opérande RHO_FLUIDE

Masse volumique du fluide (réel positif [masse]/[volume]), uniquement valable pour les modélisations couplées hydro-mécaniques : *_JOINT_HYME et incompatible avec PRES_FLUIDE et PRES_CLAVAGE

6.11.11 Opérande VISC_FLUIDE

Viscosité dynamique du fluide (réel strictement positif [pression].[temps]), uniquement valable pour les modélisations couplées hydro-mécaniques : *_JOINT_HYME et incompatible avec PRES_FLUIDE et PRES_CLAVAGE.

Opérande OUV_MIN
Ouverture de régularisation en pointe de fissure (réel strictement positif [longueur]), uniquement valable pour les modélisations couplées hydro-mécaniques : *_JOINT_HYME et incompatible avec PRES_FLUIDE et PRES_CLAVAGE .

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

6.12 Mot clé facteur JOINT_MECA_FROT

La modélisation de frottement entre les joints des barrages s'appuie sur ce matériau [R7.01.25]. La pression hydrostatique due à l'éventuelle présence de fluide dans le joint est prise en compte. C'est une version élastoplastique de la loi Mohr-Coulomb, qui dépend de cinq paramètres. Deux paramètres élastiques : la raideur tangentielle et la raideur normale. Deux paramètres caractérisant la fonction seuil : adhérence et le coefficient de frottement. Plus un paramètre de régularisation de la matrice tangente en glissement. Une procédure industrielles est aussi implémentée : le sciage de barrage afin de relâcher les contraintes de compression. Ce mot clé matériau est utilisé par la loi de comportement du même nom : JOINT_MECA_FROT.

6.12.1 Syntaxe

```
◊      | JOINT_MECA_FROT      =     _F    (
       ♦    K_N               =     kn,               [R]
       ◊    K_T               =     kt,               [R]
       ♦    MU                =     mu,               [R]
       ◊    ADHESION          =     /c,               [R]
                                    /0.,              [DEFAUT]
       ◊    AMOR_NOR          =     an,               [R]
       ◊    AMOR_TAN          =     at,               [R]
       ◊    COEF_AMOR         =     ca,               [R]
       ◊    PENA_TANG         =     /pta,             [R]
                                    /kt*1E-6,         [DEFAUT]
       ◊    SCIAGE            =     scia,             [fonction]
       ◊    PRES_FLUID        =     pflu              [fonction]
       ◊    RHO_FLUIDE        =     rho,              [R]
       ◊    VISC_FLUIDE       =     vflu              [R]
       ◊    OUV_MIN           =     oumi,             [R]
)
```

6.12.2 Opérande K_N

Rigidité normale.

6.12.3 Opérande K_T

Rigidité tangentielle dans le domaine élastique.

6.12.4 Opérande MU

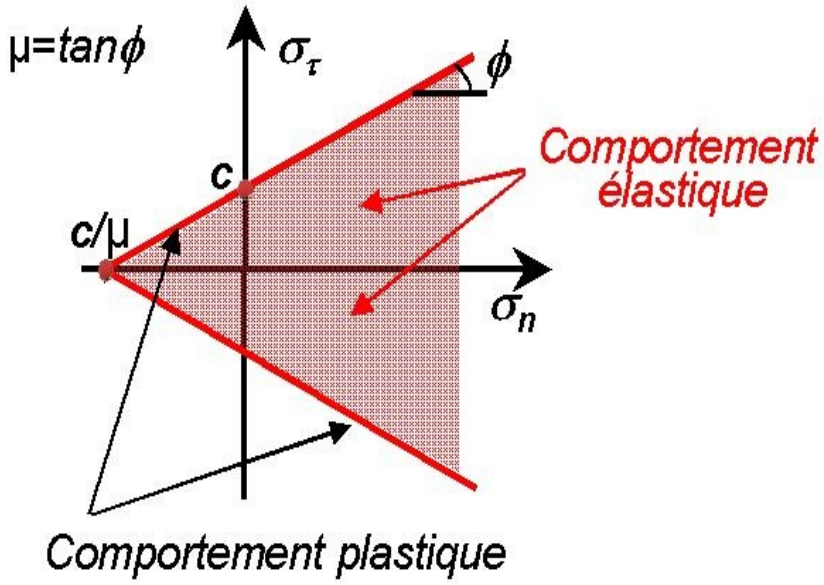
Coefficient de frottement.

6.12.5 Opérande ADHESION

Contrainte de frottement à contrainte normale nulle. Résistance à la traction est donnée alors par :

$$R_T = C / \mu$$

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



6.12.6 Opérande AMOR_NOR

Densité surfacique d'amortissement normal intégrée sur la surface d'une face d'élément 3D_JOINT puis répartie comme caractéristique de discret sur chaque segment joignant chaque couple de nœuds sommets en vis-à-vis d'une face à l'autre de l'élément. Ces caractéristiques sont affectées avec leur pleine valeur seulement si l'élément de joint est en compression : soit si la septième composante de variable interne du comportement JOINT_MECA_FROT est négative.
L'unité est donc (en SI) : Pa.s.m-1

6.12.7 Opérande AMOR_TAN

Densité surfacique d'amortissement tangentiel intégrée sur la surface d'une face d'élément 3D_JOINT puis répartie comme caractéristique de discret sur chaque segment joignant chaque couple de nœuds sommets en vis-à-vis d'une face à l'autre de l'élément. Ces caractéristiques sont affectées avec leur pleine valeur seulement si l'élément de joint est en compression : soit si la septième composante de variable interne du comportement JOINT_MECA_FROT est négative.
L'unité est donc (en SI) : Pa.s.m-1

6.12.8 Opérande COEF_AMOR

Si l'élément de joint n'est pas en compression quand la septième composante de variable interne du comportement JOINT_MECA_FROT n'est pas négative, les caractéristiques précédentes d'amortissement normal ou tangentiel ne sont pas affectées avec leur pleine valeur mais avec un coefficient renseigné par le mot clé COEF_NOR.

6.12.9 Opérande PENA_TANG

Paramètre de régularisation de la matrice tangente en glissement, est introduit pour rendre la matrice tangente élémentaire inversible. On le fixe par défaut à une valeur petite par rapport à la rigidité tangente. Si la structure est soumis à des glissements très importants, il faut vérifier que le calcul n'est pas sensible à la valeur de ce paramètre.

6.12.10 Opérande SCIAGE

La taille de scie utilisée pendant la phase de sciage. Uniquement valable avec les modélisations joint mécanique : *_JOINT, et incompatible avec RHO_FLUIDE, VISC_FLUIDE et OUV_MIN.

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

6.12.11 Opérande PRES_FLUIDE

Pression sur les lèvres de la fissure due à la présence de fluide (fonction qui peut dépendre de coordonnées géométriques ou de l'instant). Uniquement valable avec les modélisations joint mécanique : *_JOINT, et incompatible avec RHO_FLUIDE, VISC_FLUIDE et OUV_MIN.

6.12.12 Opérande RHO_FLUIDE

Masse volumique du fluide (réel positif [masse]/[volume]), uniquement valable pour les modélisations couplées hydro-mécaniques : *_JOINT_HYME et incompatible avec PRES_FLUIDE .

6.12.13 Opérande VISC_FLUIDE

Viscosité dynamique du fluide (réel strictement positif en unités de [pression].[temps]), uniquement valable pour les modélisations couplées hydro-mécaniques : *_JOINT_HYME et incompatible avec PRES_FLUIDE .

6.12.14 Opérande OUV_MIN

Ouverture de régularisation en pointe de fissure (réel strictement positif [longueur]), uniquement valable pour les modélisations couplées hydro-mécaniques : *_JOINT_HYME et incompatible avec PRES_FLUIDE.

6.13 Mot clé facteur JOINT_MECA_ENDO

La loi JOINT_MECA_ENDO est un modèle de comportement unifié pour les joints (application principale pour les barrages) [R7.01.25]. Cette dernière permet de modéliser à la fois la rupture et le frottement entre les lèvres des joints. Le matériau environnant a un comportement mécanique pur. Le frottement est géré par la variable interne de plasticité et la rupture par la variable d'endommagement. Le couplage se fait à travers le terme d'écrouissage cinématique. La loi est écrite dans le formalisme standard généralisé, elle admet un couplage hydro-mécanique similaire à celui des précédentes lois JOINT_MECA_FROT et JOINT_MECA_RUPT. Les procédures de clavage et de sciage ne sont pas activées.

6.13.1 Syntaxe

```
◊      | JOINT_MECA_ENDO      =     _F    (
       ♦    K_N               =     kn,              [R]
       ◊    K_T               =     kt,              [R]
       ♦    MU                =     mu,              [R]
       ♦     Bn               =      Bn ,                  [R]
       ♦     Bt               =      Bt ,                  [R]
       ♦     ALPHA            =      alpha ,          [R]
       ◊    PENA_RUPTURE      =     pru,             [R]
       ◊    PRES_FLUID        =     pflu             [fonction]
       ◊    RHO_FLUIDE        =     rho,             [R]
       ◊    VISC_FLUIDE       =     vflu             [R]
       ◊    OUV_MIN           =     oumi,            [R]
)
```

6.13.2 Opérande K_N

Rigidité normale en traction.

6.13.3 Opérande K_T

Rigidité tangentielle.

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

6.13.4 Opérande MU

Coefficient de frottement.

6.13.5 Opérande Bn

Résistance à la traction pure.

6.13.6 Opérande Bt

Résistance au cisaillement pur.

6.13.7 Opérande ALPHA

Paramètre d'endommagement initial. Ce paramètre permet d'étendre la zone élastique dans la zone d'endommagement pour favoriser la transition entre zone élastique et endommagente si des difficultés de convergence sont rencontrées. Par défaut, on recommande une valeur de 1e-7.

6.13.8 Opérande PENA_RUPTURE

Paramètre de régularisation en rupture.

6.13.9 Opérande PRES_FLUIDE

Pression sur les lèvres de la fissure due à la présence de fluide (fonction qui peut dépendre de coordonnées géométriques ou de l'instant). Uniquement valable avec les modélisations joint mécanique : *_JOINT, et incompatible avec RHO_FLUIDE, VISC_FLUIDE et OUV_MIN.

6.13.10 Opérande RHO_FLUIDE

Masse volumique du fluide (réel positif [masse]/[volume]), uniquement valable pour les modélisations couplées hydro-mécaniques : *_JOINT_HYME et incompatible avec PRES_FLUIDE .

6.13.11 Opérande VISC_FLUIDE

Viscosité dynamique du fluide (réel strictement positif en unités de [pression].[temps]), uniquement valable pour les modélisations couplées hydro-mécaniques : *_JOINT_HYME et incompatible avec PRES_FLUIDE .

6.13.12 Opérande OUV_MIN

Ouverture de régularisation en pointe de fissure (réel strictement positif [longueur]), uniquement valable pour les modélisations couplées hydro-mécaniques : *_JOINT_HYME et incompatible avec PRES_FLUIDE .

6.14 Mot clé facteur CORR_ACIER

La loi CORR_ACIER est un modèle de comportement de l'acier, soumis à la corrosion dans les structures en béton armé. Ce modèle est développé en 1D et 3D élasto-plastique endommageable à écrouissage isotrope et s'appuie sur le modèle de Lemaître, cf. [R7.01.20].

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

$$\begin{cases} \dfrac{\sigma_{eq}}{1-D} - R(p) - \sigma_y > 0 \\ \dot{\varepsilon}^p = \dfrac{3}{2}\dfrac{\dot{\lambda}}{1-D}\dfrac{\widetilde{\sigma}}{\sigma_{eq}} \\ \dot{r} = \dot{\lambda} = \dot{p}(1-D) \\ R = kp^{1/m} \end{cases}$$. Dans le domaine plastique $D=0$, sinon $D=\dfrac{Dc}{p_R - p_D}(p - p_D)$

6.14.1 Syntaxe

```
◊   |   CORR_ACIER = _F (
                          ♦ D_CORR          =   dc,
                [R]
                          ♦ ECRO_K          =   k,
                      [R]
                          ♦ ECRO_M          =   m,
                      [R]
                            ♦ SY                =
sy                        [R]
                          )
```

6.14.2 Opérande D_CORR

Coefficient d'endommagement critique.

Opérandes ECRO_K, ECRO_M

Coefficients de la loi d'écrouissage $R=kp^{1/m}$.

6.14.3 Opérande SY

Limite d'élasticité initiale, notée σ_y dans les équations.

6.15 Mot clé facteur ENDO_HETEROGENE

Les caractéristiques de la loi ENDO_HETEROGENE qui est un modèle d'endommagement isotrope représentant la formation et la propagation des fissures sont décrites dans [R5.03.24]. La présence de fissure dans la structure est modélisée par des lignes d'éléments cassés ($d=1$). La rupture des éléments peut être causée soit par l'amorçage d'une nouvelle fissure, soit par propagation. Cette loi est adaptée aux matériaux hétérogènes (par exemple l'argile).

6.15.1 Syntaxe

```
◊   | ENDO_HETEROGENE   =   _F (
                          ♦ WEIBULL         =   w,
                      [R]
                          ♦ SY              =
    sy,               [R]
                          ♦ KI              =
    ki,               [R]
                          ♦ EPAI            =   ep,
                [R]
                          ◊ GR              =
    /gr,              [R]

          /1.,            [DEFAUT]
                          )
```


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

6.15.2 Opérande WEIBULL

Paramètre associé au modèle de Weibull.

6.15.3 Opérande SY

Limite d'élasticité initiale, notée σ_y dans les équations.

6.15.4 Opérande KI

Ténacité K_{IC}.

6.15.1 Opérande EPAI

Épaisseur de l'échantillon représenté. Attention, si cette valeur est purement géométrique, elle est nécessaire pour cette loi de comportement.

6.15.2 Opérande GR

Graine du tirage aléatoire définissant les défauts initiaux. Permet d'obtenir un résultat unique pour chaque fichier de commande. Si la graine est nulle, le tirage sera réellement aléatoire et différera à chaque lancement. Par défaut, la valeur est égale à 1.

6.16 Mot clé facteur RUPT_FM

La loi RUPT_FM permet de définir la tenacité critique d'un matériau comme critère dépendant de la température

6.16.1 Syntaxe

```
◊      | RUPT_FM  =     _F    (
                                   ♦    KIC              =     kic,
           [fonction_sdaster]
                                  )
```

6.16.2 Opérande KIC

Fonction de ténacité critique dépendant de la température, exprimée généralement en $MPa\sqrt{(m)}$. L'utilisateur devra faire attention à la cohérence des unités utilisés par cette fonction. Par exemple en unités SI (Pa , m) il faudra rentrer une fonction en $Pa\sqrt{(m)}$, ou pour des unités ingénieur (MPa , mm), il faudra rentrer une fonction en $MPa\sqrt{(mm)}$.

7 Caractéristiques thermiques

Les divers comportements thermiques s'excluent mutuellement.

7.1 Mots clés facteur THER, THER_FO

Définition des caractéristiques thermiques linéaires constantes ou fonction définie par un concept du type fonction du paramètre 'INST'.

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

7.1.1 Syntaxe

```
/     THER =       _F     (
                                  ◊     RHO_CP =     cp,
              [R]
                                  ♦     LAMBDA =     lambda
              [R]
                                )
/     THER_FO = _F       (
                                  ◊     RHO_CP =     cp,
              [fonction]
                                  ♦     LAMBDA =     lambda
              [fonction]
                                        )
```

7.1.2 Opérandes LAMBDA / RHO_CP

LAMBDA = lambda
Conductivité thermique isotrope.

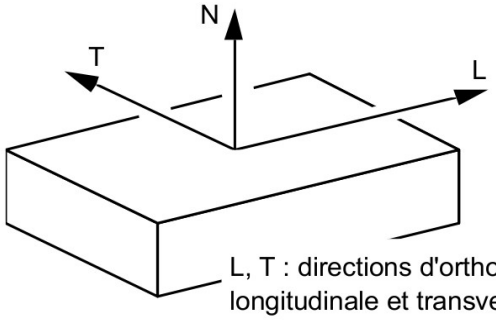
RHO_CP = cp
Chaleur volumique à pression constante (produit de la masse volumique et de la chaleur spécifique). C'est le coefficient apparaissant dans l'équation :

$$cp\dot{T} - \text{div}(\lambda . grad\, T) = f$$

7.2 Mot clé facteur THER_ORTH

Définition des caractéristiques thermiques pour un matériau orthotrope.

Le lecteur pourra se reporter aux documentations suivantes :
[U4.42.03] DEFI_COMPOSITE
[U4.42.01] AFFE_CARA_ELEM
pour définir la direction longitudinale associée aux coques ou au 3D non isotrope.



L, T : directions d'orthotropie longitudinale et transversale

Syntaxe

```
|     THER_ORTH = _F     (
                                  ◊      RHO_CP   = cp,
      [R]
                                  ♦     LAMBDA_L =  lal,
[R]
                                  ♦     LAMBDA_T =  lat,
[R]
                                  ◊     LAMBDA_N =  lan,
[R]
                                )
```


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

7.2.1 Opérandes LAMBDA / RHO_CP

LAMBDA_L = lal
Conductivité thermique dans le sens longitudinal.

LAMBDA_T = lat
Conductivité thermique dans le sens transversal.

LAMBDA_N = lan
Conductivité thermique dans le sens normal.

RHO_CP = cp
Chaleur volumique.

7.3 Mot clé facteur THER_NL

Permet de décrire les caractéristiques thermiques dépendant de la température. La formulation fait intervenir l'enthalpie volumique (cf. [R5.02.02]).

$$\dot{\beta} - \mathrm{div}\left(\lambda(T).\,grad\,T\right) = f$$

7.3.1 Syntaxe

```
/     THER_NL = _F      (
                                / ◊   BETA  =     beta,
[fonction]
                                /           RHO_CP      =     cp    ,
            [fonction]
                                  ♦         LAMBDA      =     lambda,
[fonction]
                                )
```

7.3.2 Opérandes BETA / LAMBDA / RHO_CP

BETA = beta
Enthalpie volumique fonction de la température. Pour l'enthalpie, les prolongements de la fonction sont nécessairement linéaires.

RHO_CP = cp
Chaleur volumique.
Si l'enthalpie n'est pas fournie par l'utilisateur, elle sera calculée par intégration de RHO_CP et ne sera pas prolongée à gauche. RHO_CP doit donc être défini sur toute la plage de calcul ce qui signifie que le prolongement à gauche de RHO_CP est ignoré pour l'estimation de l'enthalpie.

LAMBDA = lambda
Conductivité thermique isotrope fonction de la température.

Remarque:
Il n'est pas possible d'utiliser une formule pour ces trois paramètres du matériau car l'algorithme a besoin d'en calculer de nombreuses fois la dérivée, ce qui est plus facilement accessible pour une fonction linéaire par morceaux. Ainsi, l'utilisateur, s'il désire utiliser une formule plutôt qu'une fonction, doit d'abord la tabuler à l'aide la commande CALC_FONC_INTERP.

7.4 Mots clés facteur THER_COQUE, THER_COQUE_FO

Permet de définir les conductivités membranaires et transverses et la capacité thermique pour des coques thermiques hétérogènes homogénéisées.

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

Les directions 1 et 2 désignent celles du plan de la plaque, la direction 3 est perpendiculaire. On admet que le tenseur de conductivité en chaque point est diagonal et que ses valeurs propres sont l1, l2 et l3. Les coefficients sont donc définis par l'utilisateur dans le repère d'orthotropie de la plaque.

Le code fait ensuite le changement de repère pour retrouver les valeurs correctes dans le repère de l'élément.

7.4.1 Syntaxe

```
/ THER_COQUE
/ THER_COQUE_FO = _F    (
                  ♦  COND_LMM = a1111,            [R] ou [fonction]
                  ♦  COND_TMM = a2211,            [R] ou [fonction]
                  ♦  COND_LMP = a1111,            [R] ou [fonction]
                  ♦  COND_TMP = a2211,            [R] ou [fonction]
                  ♦  COND_LPP = a1111,            [R] ou [fonction]
                  ♦  COND_TPP = a2211,            [R] ou [fonction]
                  ♦  COND_LSI = a1111,            [R] ou [fonction]
                  ♦  COND_TSI = a2211,            [R] ou [fonction]
                  ♦  COND_NMM = b1,                     [R] ou
               [fonction]
                  ♦  COND_NMP = b12,                    [R] ou
               [fonction]
                  ♦  COND_NPP = b22,                    [R] ou
               [fonction]
                  ♦  COND_NSI = b23,                    [R] ou
               [fonction]
                  ◊  CMAS_MM  = c11,                    [R] ou
               [fonction]
                  ◊  CMAS_MP  = c12,                    [R] ou
               [fonction]
                  ◊  CMAS_PP  = c22,                    [R] ou
               [fonction]
                  ◊  CMAS_SI  = c23,                    [R] ou
               [fonction]
                                                  )
```

7.4.2 Opérandes COND_LMM / COND_LMP / COND_LPP / COND_LSI / COND_TMM / COND_TMP / COND_TPP / COND_TSI

P1, P2, P3 désignent les fonctions d'interpolation de la température dans l'épaisseur.
Si a est la matrice de conductivité moyenne surfacique définie dans la note [R3.11.01], on a alors pour le tenseur de conductivité membranaire.

COND_LMM = a1111
terme lié à l'intégrale de l1*P1*P1
COND_LMP = a1112
terme lié à l'intégrale de l1*P1*P2
COND_LPP = a1122
terme lié à l'intégrale de l1*P2*P2
COND_LSI = a1123
terme lié à l'intégrale de l1*P2*P3
COND_TMM = a2211
terme lié à l'intégrale de l2*P1*P1
COND_TMP = a2212
terme lié à l'intégrale de l2*P1*P2
COND_TPP = a2222
terme lié à l'intégrale de l2*P2*P2

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

COND_TSI = a2223
terme lié à l'intégrale de l2*P2*P3

Opérandes COND_NMM / COND_NMP / COND_NPP / COND_NSI
Si b est le tenseur qui décrit la conduction transversale et les échanges sur les surfaces ω_+ et ω_-, défini dans la note [R3.11.01], on a pour le tenseur de conductivité transverse :
COND_NMM = b11
terme lié à l'intégrale de l3*P1*P1
COND_NMP = b12
terme lié à l'intégrale de l3*P1*P2
COND_NPP = b22
terme lié à l'intégrale de l3*P2*P2
COND_NSI = b23
terme lié à l'intégrale de l3*P2*P3

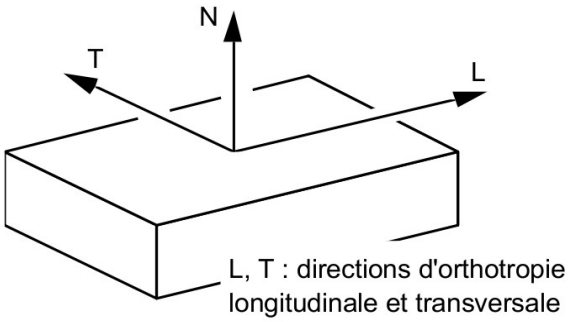
7.4.3 Opérandes CMAS_MM / CMAS_MP / CMAS_PP / CMAS_SI

On a enfin pour le tenseur de capacité thermique.
CMAS_MM = c11
terme lié à l'intégrale de RHOCP*P1*P1
CMAS_MP = c12
terme lié à l'intégrale de RHOCP*P1*P2
CMAS_PP = c22
terme lié à l'intégrale de RHOCP*P2*P2
CMAS_SI = c23
terme lié à l'intégrale de RHOCP*P2*P3

7.5 Mot clé facteur THER_NL_ORTH

Identique à THER_NL, permettant de décrire les caractéristiques thermiques dépendant de la température, ce matériau autorise en plus la définition de caractéristiques thermiques pour un matériau orthotrope, pouvant elles-mêmes dépendre de la température.

Le lecteur pourra se reporter aux documentations suivantes :
[U4.42.03] DEFI_COMPOSITE
[U4.42.01] AFFE_CARA_ELEM
pour définir la direction longitudinale associée aux coques ou au 3D non isotrope.



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

7.5.1 Syntaxe

```
|     THER_NL_ORTH = _F (
                                  / ◊   BETA  =     beta,
      [fonction]
                                  /           RHO_CP      =     cp    ,
            [fonction]
                                   ♦    LAMBDA_L =  lal,        [fonction]
                                   ♦    LAMBDA_T =  lat,        [fonction]
                                   ◊    LAMBDA_N =  lan,        [fonction]
                                  )
```

7.5.2 Opérandes **BETA / LAMBDA / RHO_CP**

BETA = beta
Enthalpie volumique fonction de la température. Pour l'enthalpie, les prolongements de la fonction sont nécessairement linéaires.

RHO_CP = cp
Chaleur volumique.
Si l'enthalpie n'est pas fournie par l'utilisateur, elle sera calculée par intégration de RHO_CP et ne sera pas prolongée à gauche. RHO_CP doit donc être défini sur toute la plage de calcul ce qui signifie que le prolongement à gauche de RHO_CP est ignoré pour l'estimation de l'enthalpie.

LAMBDA_L = lal
Conductivité thermique dans le sens longitudinal.

LAMBDA_T = lat
Conductivité thermique dans le sens transversal.

LAMBDA_N = lan
Conductivité thermique dans le sens normal.

Remarque:
Il n'est pas possible d'utiliser une formule pour ces paramètres du matériau car l'algorithme a besoin d'en calculer de nombreuses fois la dérivée, ce qui est plus facilement accessible pour une fonction linéaire par morceaux. Ainsi, l'utilisateur, s'il désire utiliser une formule plutôt qu'une fonction, doit d'abord la tabuler à l'aide la commande CALC_FONC_INTERP.

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

8 Caractéristiques spécifiques aux bétons

8.1 Mot clé facteur THER_HYDR

Permet de définir le comportement associé à l'hydratation du béton.
L'hydratation du béton est un phénomène qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur dépendant de la température [R7.01.12].

$$\left.\begin{aligned} \frac{d\beta}{dt} + div\, q = Q\frac{d\xi(T)}{dt} + s \\ q = -\lambda\, grad\, T \end{aligned}\right\} \quad \text{éq 7.1-1}$$

$$\frac{d\xi}{dt} = AFF(\xi, T) \quad \text{éq 7.1-2}$$

8.1.1 Syntaxe

```
| THER_HYDR =      _F     (
                                    ♦    LAMBDA            =
lambda,           [fonction]
                                    ◊    BETA        =     beta,
            [fonction]
                                    ♦    AFFINITE    =     AFF,
            [fonction]
                                    ♦    CHALHYDR    =     Q,
                  [R]
                                  )
```

8.1.2 Opérandes LAMBDA / BETA

LAMBDA = lambda
Conductivité thermique isotrope fonction de la température.

BETA = beta
Enthalpie volumique fonction de la température. Les prolongements sont a minima linéaires, l'enthalpie volumique pouvant se définir comme l'intégrale de la chaleur volumique.

8.1.3 Opérande AFFINITE

AFFINITE = AFF
Fonction du degré d'hydratation et de la température. En général, on utilise :

$\mathrm{AFF}(\xi, T) = A(\xi)\, exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$ avec $\mathrm{QSR_K} = \frac{E_a}{R}$ la constante d'Arrhénius exprimée en degré Kelvin, et A déterminée par un essai calorimétrique du béton (fonction de la grandeur HYDR).

8.1.4 Opérande CHAL_HYDR

CHAL_HYDR = Q
Chaleur dégagée par unité d'hydratation (supposée constante), cette fonction dépend du type de béton.

8.2 Mot clé facteur SECH_GRANGER

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

Définition des paramètres caractérisant le coefficient de diffusion $D(C,T)$ intervenant dans l'équation non linéaire du séchage proposée par Granger (cf. [R7.01.12]). Ces caractéristiques sont des constantes, tandis que le coefficient de diffusion dépend de la variable de calcul, c'est-à-dire la concentration C courante en eau, (comme la conductivité thermique dépendait de la température).

8.2.1 Syntaxe

```
| SECH_GRANGER =_F       (
                              ♦    A                =     a,
                         [R]
                              ♦    B                =     b,
                         [R]
                              ♦    QSR_K       =    QsR   ,
                    [R]
                              ♦    TEMP_0_C    =    T0,
                    [R]
                                  )
```

8.2.2 Opérandes A / B / QSR_K / TEMP_0_C

Ces coefficients permettent d'exprimer le coefficient de diffusion sous sa forme la plus couramment utilisée dans la littérature et proposée par Granger :

$$D(C,T)=a.e^{(b.C)}\frac{T}{T_0}e^{\left[-\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)\right]}$$

A= a
Coefficient de diffusion variant de $0.5\,10^{-13}$ et $2.10^{-13}m^2/s$ pour le béton.

B= b
Coefficient de l'ordre de 0.05 pour le béton.

QSR_K= QsR
QsR vaut en général $4700.K$. (R est la constante des gaz parfaits).

TEMP_0_C= T0
Température de référence dans la loi d'Arrhénius. La température de référence $T0$ est **en degrés Celsius**, et convertie en Kelvin lors de la résolution.

8.3 Mot clé facteur SECH_MENSI

Définition des paramètres caractérisant le coefficient de diffusion intervenant dans l'équation non linéaire du séchage proposée par Mensi (cf. [R7.01.12]). Ces caractéristiques sont des constantes, tandis que le coefficient de diffusion dépend de la variable de calcul, c'est-à-dire la concentration C courante en eau, (comme la conductivité thermique dépendait de la température). C'est une formulation simplifié du cas général, constituant la loi de Mensi.

8.3.1 Syntaxe

```
| SECH_MENSI = _F       (
                              ♦    A =          a,
                    [R]
                              ♦    B =          b,
                    [R]
```


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

)

Opérandes A / B

Ces coefficients permettent d'exprimer le coefficient de diffusion selon la loi de Mensi :

$$\xi = \frac{\varepsilon_r^{n-1} - \varepsilon_y^{n-1}}{\varepsilon_y^{n} - \varepsilon_r^{n-1}}$$

$$D(C) = a.e^{(b.C)}$$

A= a

Coefficient de diffusion variant de $0.5.10^{-13}$ et $2.10^{-13} m^2/s$ pour le béton.

B= b

Coefficient de l'ordre de 0.05 pour le béton.

8.4 Mot clé facteur SECH_BAZANT

Définition des paramètres caractérisant le coefficient de diffusion intervenant dans l'équation non linéaire du séchage proposée par Bazant (confer [R7.01.12]). Ces caractéristiques sont des constantes, tandis que le coefficient de diffusion dépend de la variable de calcul, c'est à dire la concentration C courante en eau, (comme la conductivité thermique dépendait de la température). Cette formulation constitue la loi de Bazant.

8.4.1 Syntaxe

```
| SECH_BAZANT = _F      (
                              ♦   D1            =   d1,
[R]
                              ♦   ALPHA_BAZANT  =   alpha,
      [R]
                              ♦   N             =   n,
      [R]
                              ♦   FONC_DESORP   =   desorp      ,
      [fonction]
                            )
```

8.4.2 Opérandes D1 / ALPHA_BAZANT / N / FONC_DESORP

Ces coefficients permettent d'exprimer le coefficient de diffusion selon la loi de Bazant :

$$D(h) = d_1\left(\alpha + \frac{1-\alpha}{1+\left(\frac{1-h}{1-0.75}\right)^n}\right)$$

où h est le degré d'hydratation, lié à la concentration en eau par la courbe de désorption.

D1 = d1

Coefficient de diffusion qui est de l'ordre de $3.10^{-13} m^2/s$ pour le béton.

ALPHA_BAZANT = alpha

Coefficient variant de 0.025 à 0.1 pour le béton.

N = n

Exposant de l'ordre de 6 pour le béton.

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

FONC_DESORP = desorp
Courbe de désorption, permettant de passer de la concentration en eau au degré d'hydratation h .

Remarque importante :

desorp *est une fonction de la variable de calcul,* C *, la concentration en eau, qui est assimilée pour la résolution à une température, de type* 'TEMP' .

8.5 Mot clé facteur SECH_NAPPE

Le coefficient de diffusion, caractérisant l'équation non linéaire du séchage, est exprimé à l'aide d'une nappe, fonction tabulée de la concentration en eau, variable de calcul, et de la température, variable auxiliaire de calcul, donnée sous la forme d'une structure de donnée de type evol_ther. Pour la résolution du séchage par l'opérateur THER_NON_LINE, la concentration en eau est assimilée à une température, de type 'TEMP'.

Pour la cohérence des données, les paramètres de la nappe, c'est à dire la variable de calcul et la variable auxiliaire ne peuvent pas être du même type. Un nouveau type de variable a été ajouté dans DEFI_NAPPE, le "type de la température calculée préalablement au séchage", 'TSEC', qui correspond effectivement à une température.

8.5.1 Syntaxe

```
| SECH_NAPPE = _F (
                                    ♦    FONCTION =  nom_fonc,
[fonction]
                                   )
```

8.5.2 Opérande FONCTION

Le coefficient de diffusion est exprimé à l'aide d'une fonction tabulée des paramètres C et T .

FONCTION = nom_fonc
Nom de la nappe.

8.6 Mot clé facteur PINTO_MENEGOTTO

Définitions des coefficients de la relation de comportement d'élastoplasticité cyclique des armatures en acier dans le béton armé selon le modèle de Pinto-Menegotto (cf. [R5.03.09]).

La courbe de traction initiale (début du chargement) est définie par :

- $\sigma = E.\varepsilon$ tant que $\sigma \leq \sigma_y$; E défini sous ELAS
- $\sigma = \sigma_y$ pour $\frac{\sigma_y}{E} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_h$
- $\sigma = \sigma_u - (\sigma_u - \sigma_y)\left(\frac{\varepsilon_u - \varepsilon}{\varepsilon_u - \varepsilon_h}\right)^4$ pour $\varepsilon_h \leq \varepsilon < \varepsilon_u$

  (ε ne peut pas dépasser ε_u)

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

La courbe $s=f(e)$ au $n^{ième}$ cycle est définie par :

$$\sigma_L^* = b\,\varepsilon_L^* + \left(\frac{1-b}{\left(1+\left(\varepsilon_L^*\right)^R\right)^{1/R}}\right)\varepsilon_L^* \text{ avec } R = R_0 - \frac{a_1\,\xi}{a_2+\xi}$$

et $b=\frac{E_h}{E}$, E_h : pente d'écrouissage asymptotique

où ε^* est défini par : $\varepsilon^* = \frac{\varepsilon-\varepsilon_r^{n-1}}{\varepsilon_y^n-\varepsilon_r^{n-1}}$.

où σ^* est défini par : $\sigma^* = \frac{\sigma-\sigma_r^{n-1}}{\sigma_y^n-\sigma_r^{n-1}}$.

La quantité ε_y^n est déduite du cycle $n-1$ par :

$$\varepsilon_y^n = \varepsilon_r^{n-1} + \frac{\sigma_y^n-\sigma_r^{n-1}}{E}$$
$$\sigma_y^n = \sigma_y^{n-1}.sign\left(\varepsilon_y^{n-1}-\varepsilon_r^{n-1}\right) + \varepsilon_H\left(\varepsilon_r^{n-1}-\varepsilon_y^{n-1}\right)$$

La variable ξ est définie par :

où ε_r^{n-1} représente la déformation atteinte à la fin du $n-1$ ème demi-cycle

et $\varepsilon_y^{n-1}, \varepsilon_y^n$ représentent les déformations de fin de linéarité des demi-cycles et n.

b représente soit la valeur fournie par l'utilisateur (mot clé `EP_SUR_E`) soit, à défaut :

$$b=\frac{E_H}{E} \text{ avec } E_H = \frac{\sigma_u-\sigma_y}{\varepsilon_u-\frac{\sigma_y}{E}}$$

En cas de flambage, (si $L/D>5$) :

- en compression on remplace b par $b_c = a\left(5.0-L/D\right)e^{\left(b\,\xi'\frac{E}{\sigma_y-\sigma_\infty}\right)}$
- en traction, on calcule une nouvelle pente $E_r = E\left(a_5+\left(1.0-a_5\right)e^{\left(-a_6\left(\varepsilon_r^{n-1}-\varepsilon_y^{n-1}\right)\right)}\right)$ avec $a_5 = 1+\frac{5-L/D}{7.5}$.

ξ' représente la plus grande « excursion plastique » au cours du chargement: $\xi' = \max_n\left(\varepsilon_r^n-\varepsilon_y^n\right)$ et $\sigma_\infty = 4\frac{\sigma_y}{L/D}$

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

Dans le cas du flambage, on ajoute à σ_y^n la valeur $\sigma_s^* = \gamma_s b E \frac{b-b_c}{1-b_c}$ avec $\gamma_s = \frac{11 - L/D}{10\left(e^{\frac{cL}{D}} - 1\right)}$.

8.6.1 Syntaxe

```
      | PINTO_MENEGOTTO = _F(
                                          ♦  SY                =
           sigm,              [R]
                                          ♦  EPSI_ULTM    =
      epsu,              [R]
                                          ♦  SIGM_ULTM    =
      sigmu,             [R]
                                          ◊  ELAN              =     /
      L/D   ,            [R]

            /     4.,                [DEFAUT]
                                          ♦  EPSP_HARD    =
      epsh,              [R]
                                          ◊  R_PM              =     /
      R0,                [R]

            /     20.   ,            [DEFAUT]
                                          ◊  EP_SUR_E     =
      b,                       [R]
                                          ◊  A1_PM        =          /
      a1    ,                  [R]

            /     18.5,              [DEFAUT]
                                          ◊  A2_PM        =          /
a2    ,                  [R]

            /     0.15,              [DEFAUT]
                                          ◊  A6_PM        =          /
      a6    ,                  [R]

            /     620.,              [DEFAUT]
                                          ◊  C_PM         =          /
      c,                       [R]

            /     0.5,         [DEFAUT]
                                          ◊  A_PM              =     /
      a,                 [R]

            /     0.006        [DEFAUT]
                                    )
```

8.6.2 Opérandes

SY = sigm

Limite d'élasticité initiale, notée σ_y dans les équations.

EPSI_ULTM = epsu, notée ε_u dans les équations. Déformation ultime.

SIGM_ULTM = sigmu, notée σ_u dans les équations. Contrainte ultime.

◊ ELAN = L/D

Élancement de la barre (>5 : flambage).

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

EPSP_HARD = epsh , notée ε_h dans les équations.
Déformation correspondant à la fin du palier plastique.

◊ EP_SUR_E = b

Ratio pente d'écrouissage/module de Young (si aucune valeur n'est donnée, on prend $b=\frac{E_H}{E}$).

A1_PM = a1
Coefficient définissant la courbe de traction du modèle.

A2_PM = a2
Coefficient définissant la courbe de traction du modèle.

A6_PM = a6
Coefficient définissant la courbe de traction du modèle en cas de flambage.

C_PM = c utilisé dans γ_s
Coefficient définissant la courbe de traction du modèle en cas de flambage.

A_PM = a
Coefficient définissant la courbe de traction du modèle en cas de flambage.

R_PM =
Coefficient R_O (20. par défaut).

Le module de Young E et le coefficient de dilatation thermique ALPHA sont à préciser par les mots-clés ELAS ou ELAS_FO.

8.7 Mots clés facteur BPEL_BETON, BPEL_ACIER

Définition des caractéristiques intervenant dans le modèle de comportement des câbles de précontrainte dans le cadre réglementaire du BPEL [R7.01.02].

Les caractéristiques élastiques linéaires du matériau béton et du matériau acier doivent être simultanément définies sous le mot clé ELAS.

8.7.1 Syntaxe

```
      | /  BPEL_BETON  = _F  (
                                  ◊    PERT_FLUA   =           /
xflu,             [R]

      /     0.,               [DEFAUT]
                                  ◊    PERT_RETR         =     /
xret,             [R]

      /     0.                [DEFAUT]
                                 )
  /   BPEL_ACIER  = _F  (
                                  ◊    RELAX_1000  =           /
rh1000,           [R]

      /     0.,               [DEFAUT]
                                  ◊    MU0_RELAX         =     /     mu0,
            [R]

      /     0.,               [DEFAUT]
```


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

```
                                    ◊     F_PRG              =
fprg,              [R]
                                    ◊     FROT_COURB   =           /     f,
                   [R]

      /     0.,                 [DEFAUT]
                                    ◊     FROT_LINE          =     /     phi
,          [R]

      /     0.                  [DEFAUT]
                                   )
```

8.7.2 Opérandes

Comportement : BPEL_BETON
Mot-clé facteur pour la définition des paramètres caractéristiques du matériau béton qui interviennent dans l'estimation des pertes de tension le long des câbles de précontrainte. Ce mot-clé facteur ne peut être utilisé que conjointement avec le mot-clé facteur ELAS.

PERT_FLUA = xflu
Taux forfaitaire de perte de tension par fluage du béton, par rapport à la tension initiale.
$\Delta F_{flu} = x_{flu}.F_0$ où F_0 désigne la tension initiale définit par DEFI_CABLE_BP. [U4.42.04]
La valeur par défaut est 0 : dans ce cas, on ne tient pas compte des pertes de tension par fluage du béton.
Attention, cette valeur ne sera pas affectée par le renseignement du coefficient de relaxation R_J dans DEFI_CABLE_BP. La valeur xflu doit donc tenir compte de cet effet (multiplication par $r(t) = \frac{t}{t+9r_m}$, t correspondant à la date à laquelle on veut estimer l'état de la structure et r_m le rayon moyen).

PERT_RETR = xret
Taux forfaitaire de perte de tension par retrait du béton, par rapport à la tension initiale.
$\Delta F_{ret} = x_{ret}.F_0$ où F_0 désigne la tension initiale.
La valeur par défaut est 0 : dans ce cas, on ne tient pas compte des pertes de tension par retrait du béton.
Attention, cette valeur ne sera pas affectée par le renseignement du coefficient de relaxation R_J dans DEFI_CABLE_BP. La valeur xret doit donc tenir compte de cet effet (multiplication par $r(t) = \frac{t}{t+9r_m}$, t correspondant à la date à laquelle on veut estimer l'état de la structure et r_m le rayon moyen).

Comportement : BPEL_ACIER
Mot-clé facteur pour la définition des paramètres caractéristiques du matériau acier qui interviennent dans l'estimation des pertes de tension le long des câbles de précontrainte. Ce mot-clé facteur ne peut être utilisé que conjointement avec le mot-clé facteur ELAS.

RELAX_1000 = rh1000
Relaxation de l'acier à 1000 heures, exprimée en %.
La valeur par défaut est 0 : dans ce cas, on ne tient pas compte des pertes de tension par relaxation de l'acier.

MU0_RELAX = mu0
Coefficient adimensionnel de relaxation de l'acier précontraint. La valeur par défaut est 0.

F_PRG = fprg

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

Contrainte garantie de la charge maximale à rupture (suivant le BPEL)
Si on tient compte des pertes de tension par relaxation de l'acier (RELAX_1000 renseignée par une valeur non nulle), il faut obligatoirement renseigner l'opérande F_PRG, par une valeur non nulle.

FROT_COURB = f
Coefficient de frottement entre le câble et la gaine, en partie courbe, en rad^{-1}. La valeur par défaut est 0.

FROT_LINE = phi
Coefficient de frottement par unité de longueur m^{-1}, en partie droite. La valeur par défaut est 0.
Remarque :

*FROT_LINE=FROT_COURB*PERT_LIGNE.*

8.8 Mots clés facteur ETCC_BETON, ETCC_ACIER

Définition des caractéristiques intervenant dans le modèle de comportement des câbles de précontrainte, dans le cadre réglementaire de l'ETCC [R7.01.02].
Les caractéristiques élastiques linéaires du matériau béton et du matériau acier doivent être simultanément définies sous le mot clé ELAS.

8.8.1 Syntaxe

```
|     /     ETCC_BETON  = _F  (
                              )
      /     ETCC_ACIER  = _F  (
                                        ◊    RELAX_1000  =     /
rh1000,           [R]

      /     0.,               [DEFAUT]
                                        ◊    F_PRG             =
fprg,             [R]
                                        ◊    COEF_FROT   =     /     f,
                  [R]

      /     0.,               [DEFAUT]
                                        ◊    PERT_LIGNE  =     /     phi
,           [R]

      /     0.                [DEFAUT]
                              )
```

8.8.2 Opérandes

Comportement : ETCC_BETON
Mot-clé facteur à indiquer pour pouvoir calculer la tension dans les câbles selon les formules de l'ETCC. Aucune information n'est requise. Ce mot-clé facteur ne peut être utilisé que conjointement avec le mot-clé facteur ELAS.

Comportement : ETCC_ACIER
Mot-clé facteur pour la définition des paramètres caractéristiques du matériau acier qui interviennent dans l'estimation des pertes de tension le long des câbles de précontrainte. Ce mot-clé facteur ne peut être utilisé que conjointement avec le mot-clé facteur ELAS.

RELAX_1000 = rh1000
Relaxation de l'acier à 1000 heures, exprimée en %.
La valeur par défaut est 0 : dans ce cas, on ne tient pas compte des pertes de tension par relaxation de l'acier.

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

F_PRG = fprg
Contrainte garantie de la charge maximale à rupture (suivant l'ETCC).
Si on tient compte des pertes de tension par relaxation de l'acier (RELAX_1000 renseignée par une valeur non nulle), il faut obligatoirement renseigner l'opérande F_PRG, par une valeur non nulle.

COEF_FROT = f
Coefficient de frottement entre le câble et sa gaine en partie courbe, en rad^{-1} . La valeur par défaut est 0.

PERT_LIGNE = phi
Coefficient de perte en ligne en $rad.m^{-1}$. La valeur par défaut est 0.
Remarque :

PERT_LIGNE = FROT_LINE/FROT_COURB.

8.9 Mot clé facteur BETON_DOUBLE_DP

Le modèle de comportement 3D développé dans *Code_Aster* est formulé dans le cadre de la thermo-plasticité, pour la description du comportement non linéaire du béton, en traction, et en compression, avec la prise en compte des variations irréversibles des caractéristiques thermiques et mécaniques du béton, particulièrement sensibles à haute température [R7.01.03].

8.9.1 Syntaxe

```
 | BETON_DOUBLE_DP = _F (
                                    ♦    F_C                          =
f'c   ,           [fonction]
                                    ♦    F_T                          =
f't   ,           [fonction]
                                    ♦   COEF_BIAX                =
beta,       [fonction]
                                    ♦   ENER_COMP_RUPT    =     Gc,
      [fonction]
                                    ♦   ENER_TRAC_RUPT    =     Gt,
      [fonction]
                                    ♦   COEF_ELAS_COMP    =     phi,
      [R]
                                    ◊   LONG_CARA         =     l_cara,
      [R]
                                    ◊   ECRO_COMP_P_PIC   = /'LINEAIRE'
,[DEFAUT]

         /'PARABOLE',[TXM]
                                    ◊   ECRO_TRAC_P_PIC   = /'LINEAIRE',
[DEFAUT]

         /'EXPONENT' [TXM]
                                   )
```

Les fonctions peuvent dépendre des variables de commandes suivantes :
'TEMP','INST','HYDR','SECH'.
BETON_DOUBLE_DP permet de définir toutes les caractéristiques associées à la loi de comportement avec double critère de Drücker Prager. En complément de ces caractéristiques, le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, et le coefficient de dilatation thermique α , ainsi que les coefficients de retrait endogène et de retrait de dessiccation, doivent être définis sous le mot-clé ELAS pour les coefficients réels, ou ELAS_FO, pour les coefficients définis par des fonctions, ou des nappes. Toutes les caractéristiques du modèle, $(E, nu, \alpha, f'c, f't, \beta, Gc, Gt)$ de type [fonction] peuvent

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

dépendre d'une ou de deux variables parmi la température, l'hydratation et le séchage. Lorsqu'elles dépendent de la température, elles sont fonctions du maximum de la température atteinte au cours de l'historique de chargement θ, qui est conservée en mémoire pour chaque point de Gauss, sous forme de variable interne. Ceci permet de prendre en compte les variations irréversibles de ces caractéristiques à haute température.

8.9.2 Opérandes F_C / F_T / COEF_BIAX

F_C= *f'c*
Résistance en compression uniaxiale f'_c.

F_T= *f't*
Résistance en traction uniaxiale f'_t.

COEF_BIAX= *beta*
Le rapport de la résistance en compression biaxiale à la résistance en compression uniaxiale β.

8.9.3 Opérandes ENER_COMP_RUPT / ENER_TRAC_RUPT / COEF_ELAS_COMP

ENER_COMP_RUPT= *Gc*

L'énergie de rupture en compression G_c,

ENER_TRAC_RUPT= *Gt*

L'énergie de rupture en traction G_t.

COEF_ELAS_COMP= *phi*

La limite d'élasticité en compression, donnée par un coefficient de proportionnalité en pourcentage de la résistance au pic $f'_c(\theta)$ est en général de l'ordre de 30% pour les bétons standard. Il est important de souligner que ce paramètre est un réel et non une fonction.

8.9.4 Opérandes LONG_CARA

Cet opérande permet de surcharger la longueur caractéristique calculée automatiquement, pour chaque maille, en fonction de ses dimensions (à partir de sa surface en 2D, à partir de son volume en 3D).
La longueur caractéristique calculée automatiquement permet, lorsque la finesse du maillage évolue d'un calcul à l'autre, de conserver des résultats stables en évitant les phénomènes de localisation. Cette longueur calculée automatiquement ou donnée par l'utilisateur, conduit à la valeur de l'écrouissage ultime en traction suivant la formule (pour un écrouissage post-pic linéaire) :

$$\kappa_u(\theta)=\frac{2.G_t(\theta)}{l_c.f'_t(\theta)}$$

Dans le cas particulier d'un maillage contenant des mailles adjacentes dont les dimensions sont très différentes, les écrouissages ultimes du modèle BETON_DOUBLE_DP calculés à partir de la longueur caractéristique des mailles sont par conséquent très différents, ce qui peut engendrer des problèmes de convergence ou conduire à un état de contraintes peu physique. (Cette longueur caractéristique est calculée à partir du volume de la maille courante). Pour cette raison, on se propose de donner la possibilité à l'utilisateur de définir une longueur moyenne qui surcharge la longueur caractéristique calculée pour chaque maille. La valeur par défaut de *Code_Aster* est la longueur caractéristique calculée pour chaque maille.

Choisir une longueur arbitraire et identique pour toutes les mailles peut aussi engendrer des difficultés de convergence. La meilleure solution consiste à créer un maillage dont les variations des dimensions des mailles respectent le sens de variation du champ de contraintes, et d'utiliser la longueur caractéristique calculée automatiquement en fonction de la taille des mailles. La surcharge par

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

LONG_CARA doit être réserver à des cas particuliers, quand l'utilisateur ne peut pas librement intervenir sur le maillage.

Dans le cas où l'utilisateur définit la longueur caractéristique dans le matériau, il choisira un couple $\left(G_t, \text{LONG_CARA}\right)$ tel que $\frac{2.G_t(\theta)}{l_c.f_t'(\theta)}$ vaille la valeur qu'il souhaite pour l'écrouissage ultime en traction κ_u. (La valeur usuelle de la déformation associée à l'écrouissage ultime en traction d'un béton moyen est de $5.E-4$).

8.9.5 Opérandes ECRO_COMP_P_PIC / ECRO_TRAC_P_PIC

Les paramètres permettant de définir la courbe d'adoucissement en compression et en traction sont facultatifs, et possèdent des valeurs par défaut.

```
ECRO_COMP_P_PIC= /     'LINEAIRE'
                       /     'PARABOLE'
```

Forme de la courbe post-pic en compression de type texte, qui peut prendre les valeurs 'LINEAIRE' et 'PARABOLE'. La courbe non linéaire est alors de type parabolique.

```
ECRO_TRAC_P_PIC= /     'LINEAIRE'
                       /     'EXPONENT'
```

Forme de la courbe post-pic en traction de type texte, qui peut prendre les valeurs 'LINEAIRE' et 'EXPONENT'. La courbe non linéaire est alors de type exponentiel.

8.10 Mot clé facteur BETON_GRANGER, V_BETON_GRANGER

Définition des paramètres matériaux pour le modèle viscoélastique de Granger, modélisant le fluage propre du béton. Il existe 2 relations de comportement : la première (BETON_GRANGER) ne prend pas en compte le phénomène de vieillissement mais modélise l'effet d'hygrométrie. La deuxième (BETON_GRANGER_V) prend en compte les effets de vieillissement et de l'hygrométrie (Cf. [R7.01.01]).

En 1D et sous l'action d'une contrainte constante σ_0, la déformation de fluage en fonction du temps et de l'instant de chargement t_c s'écrit : $\varepsilon_{fl}\left(t\right)=J\left(t,t_c,\right)\cdot\sigma_0$

$\left(0.5\,10^{-4}<\varepsilon_{d0}<1.5\,10^{-4}\right)$

La fonction de fluage $J\left(t,t_c\right)$ vaut :

$$J\left(t,t_c\right)=k\left(a\left(t_c\right)\right)\cdot\sum_{s=0}^{n}J_s\left(1-exp\left(\frac{t-t_c}{\tau_s}\right)\right)$$

où a est l'âge du matériau, c'est à dire le temps écoulé de la mise en place du béton. Il s'agit d'une variable interne du modèle.

La fonction $k\left(a\left(t_c\right)\right)$ qui apparaît dans $J\left(t,t_c\right)$ sert à modéliser le vieillissement car elle introduit la dépendance directe à l'instant de chargement. On peut utiliser par exemple la courbe CEB qui modélise le vieillissement dû à l'hydratation :

$$k\left(a\right)=\frac{28^{0.2}+0.1}{a^{0.2}+0.1}\quad\text{avec } a \text{ en jours}$$

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

Sans vieillissement cette fonction est constante et vaut 1, la fonction de fluage dépend dans ce cas seulement du temps écoulé dès la mise en charge $t-t_c$.

L'hygrométrie est prise en compte par le biais d'une contrainte équivalente $S=h\cdot\sigma$, h étant l'humidité relative du matériau. Il est donc nécessaire de renseigner la courbe isotherme de désorption c qui permet de passer de la teneur en eau C à h : $h=c^{-1}(C)$. Cette courbe est fourni à Code_Aster sous le mot-clé ELAS_FO (FONC_DESORP, voir § 4.1.8).

Remarque :

Ce comportement peut être associé aux retraits de séchage et thermo-hydratation définis par les opérandes K_DESSIC, B_ENDOGE et ALPHA sous le mot clé ELAS_FO.

Pour la loi BETON_GRANGER, les paramètres de la loi sont à renseigner sous le mot-clé : BETON_GRANGER. Pour la loi BETON_GRANGER_V il faut également renseigner le mot-clé BETON_GRANGER mais il faut y ajouter le mot-clé V_BETON_GRANGER pour les paramètres spécifiques à loi vieillissante.

Les variables internes de la loi de comportement sont décrites dans [R7.01.01].

8.10.1 Syntaxe pour le fluage propre

```
| BETON_GRANGER = _F    (
                                ◊    J1          =     J1,
            [R]
                                ◊    J2          =     J2,
            [R]
                                ◊    J3          =     J3,
            [R]
                                ◊    J4          =     J4,
            [R]
                                ◊    J5          =     J5,
            [R]
                                ◊    J6          =     J6,
            [R]
                                ◊    J7          =     J7,
            [R]
                                ◊    J8          =     J8,
            [R]
                                ◊    TAUX_1      =     tau1,
        [R]
                                ◊    TAUX_2      =     tau2,
        [R]
                                ◊    TAUX_3      =     tau3,
        [R]
                                ◊    TAUX_4      =     tau4,
        [R]
                                ◊    TAUX_5      =     tau5,
        [R]
                                ◊    TAUX_6      =     tau6,
        [R]
                                ◊    TAUX_7      =     tau7,
        [R]
                                ◊    TAUX_8      =     tau8,
        [R]
```


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

```
                                        ◊     QSR_K =      qsr
              [R]
                                      )
```

8.10.2 Opérandes pour le fluage propre

8 coefficients matériaux de la fonction de fluage, homogènes à un temps.

```
J1                =      J1
...
...
J8                =      J8
```

8 temps de retard de la fonction de fluage.

```
TAUX_1      =tau1
...
...
TAUX_8      =tau8
```

8.10.3 Syntaxe pour le vieillissement

Si on utilise la relation de comportement qui prend en compte le phénomène de vieillissement alors il faut renseigner en plus :

```
      |      V_BETON_GRANGER =_F     (
                                      ◊ QSR_VEIL        = USR,
                  [R]
                                      ◊ FONC_V          = k(tc),
                  [fonction, formule]
                                           )
```

8.10.4 Opérandes pour le vieillissement

FONC_V = k(a)
Fonction de vieillissement.

8.11 Mot clé facteur MAZARS, MAZARS_FO

Le modèle de comportement de Mazars est un modèle de comportement élastique endommageable permettant de décrire le comportement adoucissant du béton. Il distingue le comportement en traction et en compression, mais n'utilise qu'une seule variable d'endommagement scalaire (confer [R7.01.08]). Le modèle de Mazars implanté correspond à la version de 2012 c'est à dire à la reformulation améliorant le comportement en bi-compression et en cisaillement pur.

Les paramètres peuvent être fonction de la température, de l'hydratation et du séchage. Dans ce cas il faut utiliser MAZARS_FO. Dans le cas de cette loi de comportement les paramètres dépendent de la température maximale atteinte pendant tout l'historique de chargement.

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

8.11.1 Syntaxe

```
MAZARS= _F(
            ♦ EPSD0                    = epsd0,           [R]
            ♦ AC                       = Ac,        [R]
            ♦ AT                       = At,        [R]
            ♦ BC                       = Bc,        [R]
            ♦ BT                       = Bt,        [R]
            ♦ K                        = k,         [R]
            ♦ CHI                      = chi,       [R]
            ◊ SIGM_LIM                 = sglim      [R]
            ◊ EPSI_LIM                 = eplim      [R]
)

MAZARS_FO = _F(
            ♦ EPSD0                  = epsd0,          [fonction]
            ♦ AC                     = Ac,             [fonction]
            ♦ AT                     = At,             [fonction]
            ♦ BC                     = Bc,             [fonction]
            ♦ BT                     = Bt,             [fonction]
            ♦ K                      = k,              [fonction]
            ♦ CHI                    = chi             [R]
             ◊ SIGM_LIM               = sglim    [fonction]
            ◊ EPSI_LIM               = eplim    [fonction]
)
```

Les fonctions peuvent dépendre des variables de commandes suivantes : 'TEMP','HYDR','SECH'.

MAZARS (ou MAZARS_FO) permet de définir toutes les caractéristiques associées au modèle de comportement de Mazars. En plus de ces caractéristiques, les constantes élastiques doivent être définies sous le mot-clé ELAS pour les coefficients réels ou ELAS_FO pour les coefficients dépendant de la température.

8.11.2 Opérandes EPSD0 AC / AT / BC / BT / K

♦ EPSD0 = epsd0
Seuil d'endommagement en déformation .

♦ AC = ac
Coefficient permettant de fixer l'allure de la courbe post-pic en compression. Introduit une asymptote horizontale qui est l'axe des ε pour $Ac=1$ et l'horizontale pour passant par le pic pour $Ac=0$ (généralement).

♦ AT = at
Coefficient permettant de fixer l'allure de la courbe post-pic en traction. Introduit une asymptote horizontale qui est l'axe des ε pour $Ac=1$ et l'horizontale passant par le pic pour $Ac=0$ (généralement $0.7<At<1$).

♦ BC = bc
Coefficient permettant de fixer l'allure de la courbe post-pic en compression. Selon sa valeur peut correspondre à une chute brutale de la contrainte ($BC<10^4$) ou une phase préliminaire d'accroissement de contrainte suivie d'une décroissance plus ou moins rapide (généralement $10^3<Bc<2.10^3$).

♦ BT = bt
Coefficient permettant de fixer l'allure de la courbe post-pic en traction. Selon sa valeur peut correspondre à une chute brutale de la contrainte ($BC<10^4$) ou une phase préliminaire

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

d'accroissement de contrainte suivie d'une décroissance plus ou moins rapide (généralement $10^4 < Bt < 10^5$).

♦ K = k
Paramètre introduisant une asymptote horizontale en cisaillement pur. Il est compris entre 0 et 1. Valeur conseillée $0,7$.

8.11.3 Opérande CHI

♦ CHI = chi
Dans le cadre du couplage BETON_UMLV avec la loi de MAZARS. Le paramètre chi permet de définir l'importance du couplage :

$CHI = 0$: pas de couplage,

$CHI = 1$: couplage total.

Le couplage total engendre une apparition prématurée de l'endommagement du béton. La valeur préconisée se situe dans intervalle : $[0.4 ; 0.7]$.

8.11.4 Opérande SIGM_LIM, EPSI_LIM

◊ SIGM_LIM = sglim
Définition de la contrainte limite.

◊ EPSI_LIM = eplim
Définition de la déformation limite.

Les opérandes SIGM_LIM et ESPI_LIM permettent de définir les bornes en contrainte et en déformation qui correspondent aux états limites de service et ultime, classiquement utilisées lors d'étude en génie civil. Ces bornes sont obligatoires lorsque l'on utilise le comportement MAZARS_GC (confer [R7.01.08] Modèle d'endommagement de MAZARS, [U4.42.07] DEFI_MATER_GC). Dans les autres cas elles ne sont pas prises en compte.
Les opérandes SIGM_LIM et ESPI_LIM permettent de définir les bornes en contrainte et en déformation qui correspondent aux états limites de service et ultime, classiquement utilisées lors d'étude en génie civil.

Remarque: Ces bornes sont obligatoires lorsque l'on utilise le comportement MAZARS_GC (confer [R7.01.08] Modèle d'endommagement de MAZARS, [U4.42.07] DEFI_MATER_GC). *Dans les autres cas elles ne sont pas prises en compte*.

8.12 Mot clé BETON_UMLV

La loi de fluage UMLV suppose un découplage total entre les composantes sphériques et déviatoriques : les déformations induites par les contraintes sphériques sont purement sphériques et les déformations induites par les contraintes déviatoriques sont purement déviatoriques [R7.01.06]. Par ailleurs, la déformation de fluage propre est supposée proportionnelle à l'humidité relative interne:

Partie sphérique : $\varepsilon^s = h \cdot f\left(\sigma^s\right)$ et, partie déviatorique : $\underline{\underline{\varepsilon^d}} = h \cdot f\left(\underline{\underline{\widetilde{\sigma}}}\right)$

où h désigne l'humidité relative interne.
Le modèle de comportement BETON_UMLV est un modèle viscoélastique non vieillissant développé en partenariat avec l'Université de Marne-la-Vallée pour décrire le fluage propre des bétons. Il est particulièrement adapté aux configurations multiaxiales en ne présupposant pas la valeur du coefficient de Poisson de fluage.
Les contraintes sphériques sont à l'origine de la migration de l'eau absorbée aux interfaces entre les hydrates au niveau de la macro-porosité et absorbée au sein de la micro-porosité dans la porosité capillaire. La diffusion de l'eau inter-lamellaire des pores d'hydrates vers la porosité capillaire s'effectue de façon irréversible. La déformation sphérique totale de fluage s'écrit donc comme la somme d'une partie réversible et d'une partie irréversible :

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

$$\varepsilon^{fs} = \underbrace{\varepsilon_r^{fs}}_{\substack{partie \\ réversible}} + \underbrace{\varepsilon_i^{fs}}_{\substack{partie \\ irréversible}}$$

Le processus de déformation sphérique du fluage est gouverné par le système d'équations couplées suivant :

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}^{fs} = \dfrac{1}{\eta_r^s} \cdot \left[h \cdot \sigma^s - k_r^s \cdot \varepsilon_r^{fs} \right] - \dot{\varepsilon}_i^{fs} \\ \dot{\varepsilon}_i^{fs} = \dfrac{1}{\eta_i^s} \left\langle \left[k_r^s \cdot \varepsilon^{fs} - \left(k_r^s + k_i^s \right) \cdot \varepsilon_i^{fs} \right] - \left[h\,\sigma^s - k_r^s \cdot \varepsilon_r^{fs} \right] \right\rangle^+ \end{cases}$$

où k_r^s désigne la rigidité apparente associée au squelette formé par des blocs d'hydrates à l'échelle mésoscopique; η_r^s la viscosité apparente associée au mécanisme de diffusion au sein de la porosité capillaire; k_i^s désigne la rigidité apparente associée intrinsèquement aux hydrates à l'échelle microscopique et la η_i^s viscosité apparente associée au mécanisme de diffusion interfoliaire.

(Les crochets $\left\langle \right\rangle^+$ désignent l'opérateur de Mac Cauley: $\left\langle x \right\rangle^+ = \dfrac{1}{2}\left(x + |x| \right)$)

Les contraintes déviatoriques sont à l'origine d'un mécanisme de glissement (ou mécanisme de quasi dislocation) des feuillets de CSH dans la nano-porosité. Sous contrainte déviatorique, le fluage s'effectue à volume constant. Par ailleurs, la loi de fluage UMLV suppose l'isotropie du fluage déviatorique. Phénoménologiquement, le mécanisme de glissement comporte une contribution réversible viscoélastique de l'eau fortement adsorbée aux feuillets de CSH et une contribution irréversible visqueuse de l'eau libre :

$$\underbrace{\underline{\underline{\varepsilon}}^{fd}}_{\substack{déformation \\ déviatorique \\ totale}} = \underbrace{\underline{\underline{\varepsilon}}_r^{fd}}_{\substack{contribution \\ eau \\ absorbée}} + \underbrace{\underline{\underline{\varepsilon}}_i^{fd}}_{\substack{contribution \\ eau \\ libre}}$$

La *j*ème composante principale de la déformation déviatorique totale est régie par le système d'équations suivants :

$$\tilde{\sigma}^j \left(1 + \frac{\eta_r^d}{\eta_i^d} \right) + \frac{k_r^d}{\eta_i^d} \tilde{\sigma}^j = \eta_r^d \ddot{\tilde{\varepsilon}}^{d,j} + k_r^d \dot{\tilde{\varepsilon}}^{d,j}$$

où k_r^d désigne la rigidité associée à la capacité de l'eau absorbée à transmettre des charges (*load bearing water*); η_r^d la viscosité associée à l'eau adsorbée par les feuillets d'hydrates et η_i^d désigne la viscosité associée à l'eau libre.

8.12.1 Syntaxe

```
|     BETON_UMLV :       _F     (
                                  ♦     K_RS              =     K_RS,
        [R]
                                  ♦     K_IS              =     K_IS,
        [R]
                                  ♦     K_RD              =     K_RD,
        [R]
                                  ♦     ETA_RS            =     ETA_RS,
        [R]
                                  ♦     ETA_IS            =     ETA_IS,
        [R]
                                  ♦     ETA_RD            =     ETA_RD,
        [R]
```


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

```
                                        ♦  ETA_ID          =  ETA_ID,
            [R]
                                        ◊  ETA_FD          =
ETA_FD          [R]
                                        )
```

8.12.2 Opérande

K_RS = K_RS

k_r^s rigidité apparente associée au squelette formé par des blocs d'hydrates à l'échelle mésoscopique.

K_IS = K_IS

k_i^s rigidité apparente associée intrinsèquement aux hydrates à l'échelle microscopique.

K_RD = K_RD

k_r^d rigidité associée à la capacité de l'eau adsorbée à transmettre des charges (*load bearing water*).

ETA_RS = ETA_RS

η_r^s viscosité apparente associée au mécanisme de diffusion au sein de la porosité capillaire.

ETA_IS = ETA_IS

η_i^s viscosité apparente associée au mécanisme de diffusion interlamellaire.

ETA_RD = ETA_RD

η_r^d viscosité associée à l'eau absorbée par les feuillets d'hydrates.

ETA_FD = ETA_FD

permet de prendre en compte le fluage de dessiccation selon la loi de Bazant.

Remarque :

La courbe de désorption donnant l'hygrométrie h en fonction de la concentration en eau C doit être renseignée sous le mot-clé ELAS_FO .

8.13 Mot clé facteur BETON_ECRO_LINE

Définition d'une courbe d'écrouissage linéaire avec prise en compte du confinement dans le cas spécifique au béton. Afin d'améliorer le comportement en compression on définit un seuil de réversibilité ([R7.01.04] modèle ENDO_ISOT_BETON).

8.13.1 Syntaxe

```
      |   BETON_ECRO_LINE = _F    (
                                        ♦  D_SIGM_EPSI     =  dsde,
          [R]
                                        ♦  SYT             =
    sigt,           [R]
                                        ◊  SYC             =
    sigc,           [R]
                                        )
```

8.13.2 Opérandes

D_SIGM_EPSI = dsde (ET)
Pente de la courbe de traction.

SYT = sigt
Contrainte maximum en traction simple.

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

SYC = sigc
Contrainte maximum en compression simple (elle n'existe pas pour un coefficient de Poisson $\nu=0$, dans ce cas on ne spécifie pas SYC)

Le module de Young E est à préciser par les mots-clés ELAS ou ELAS_FO.

8.14 Mot clé facteur ENDO_ORTH_BETON

Définition des paramètres de la loi de comportement ENDO_ORTH_BETON, permettant de décrire l'anisotropie induite par l'endommagement du béton, ainsi que les effets unilatéraux [R7.01.09]. On se reportera aux documents [R7.01.09] et [V6.04.176] pour la signification précise des paramètres et la procédure d'identification.

8.14.1 Syntaxe

```
| ENDO_ORTH_BETON =      _F     (
                                  ◊    ALPHA        =      /      alpha,
                     [R]
                                                                    /
0.9,                              [DEFAUT]
                                  ♦    K0           =             k0,
                           [R]
                                  ♦    K1           =             k1,
                     [R]
                                  ◊    K2           =      /      k2,
                     [R]
                                                                   /
0.0007,                           [DEFAUT]
                                  ♦    ECROB        =             ecrob,
                     [R]
                                  ♦    ECROD        =             ecrod
                     [R]
                                 )
```

8.14.2 Opérande ALPHA

Constante de couplage entre l'évolution de l'endommagement de traction et celle de l'endommagement de compression. Elle doit être prise entre 0 et 1, plutôt proche de 1. La valeur par défaut est 0.9.

8.14.3 Opérandes K0 / K1 / K2

K0 = k0
Partie constante de la fonction seuil. Permet de calibrer la hauteur du pic en traction.

K1 = k1
Paramètre de la fonction seuil permettant d'augmenter le seuil en compression.

K2 = k2
Paramètre de contrôle de la forme de l'enveloppe de rupture pour des essais biaxiaux. La valeur par défaut est 7.10^{-4}.

8.14.4 Opérandes ECROB / ECROD

ECROB = ecrob
Terme de l'énergie bloquée (équivalente à une énergie d'écrouissage) relatif à l'évolution de l'endommagement de traction. Il permet de contrôler la forme du pic en traction.

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

ECROD = ecrod
Terme de l'énergie bloquée (équivalente à une énergie d'écrouissage) relatif à l'évolution de l'endommagement de compression. Il permet de contrôler la forme du pic en compression.

Le module de Young E et le coefficient de Poisson ν sont à préciser par les mots-clés ELAS ou ELAS_FO.

8.15 Mots-clés facteur ENDO_SCALAIRE/ENDO_SCALAIRE_FO

Définition des paramètres de la loi de comportement ENDO_SCALAIRE [R5.03.25], qui décrit la rupture élastique fragile d'un matériau isotrope homogène. Cette loi n'est disponible que pour la modélisation à gradient d'endommagement GRAD_VARI.

8.15.1 Syntaxe

```
| ENDO_SCALAIRE_FO
  ENDO_SCALAIRE =      _F     (
                                      ♦    K                                =
    k,                        [R] ou [fonction]
                                      ♦    P                                =
    p,                        [R] ou [fonction]
                                      ♦    M                                =
    m,                        [R] ou [fonction]
                                      ◊    C_COMP                  =      /
    c_comp,      [R] ou [fonction]

          /      0,                [DEFAUT]
                                      ◊    C_VOLU                  =      /
    c_volu,      [R] ou [fonction]

          /      1,                [DEFAUT]
                                      ◊    COEF_RIGI_MINI     =      /
    A_min,       [R]

          /      1E-5,         [DEFAUT]
                                      )
```

8.15.2 Opérande K, P, M

Il s'agit des paramètres internes du modèle qui définissent l'écrouissage, voir [R5.03.25] : k désigne une densité d'énergie Pa, k et m sont des paramètres sans dimension. k et m peuvent être recalés à partir de l'échelle non locale D (approximativement la demi-largeur de bande de localisation) et des paramètres macroscopiques suivants : E le module de Young, G_f l'énergie de fissuration et f_t la valeur de la contrainte au pic en traction simple. Les relations de recalage s'écrivent alors :

$$k=\frac{3\,G_f}{4\,D};\quad m=\frac{3\,E\,G_f}{2\,f_t^2\,D};\quad c=\frac{3}{8}\,D\,G_f$$

où c est le paramètre renseigné par NON_LOCAL = _F(C_GRAD_VARI = c), qui dépend lui aussi de la réponse macroscopique. Quant au paramètre p, supérieur à 1, il contrôle la courbure de la réponse post-pic.

8.15.3 Opérandes C_COMP, C_VOLU

Il s'agit des paramètres internes du modèle, sans dimension, qui définissent la forme de la surface de charge (à une homothétie près), voir [R5.03.25]. Les valeurs par défaut permettent de retrouver le

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

modèle énergétique (symétrique) pour lequel la surface de charge correspond à une ligne de niveau de la densité d'énergie élastique (ellipsoïde de rotation autour de l'axe $(1,1,1)$ qui est centré au début de coordonnées).

Dans le cas plus générale la surface de charge ellipsoïdale (toujours l'axe $1,1,1$) non-centré , peut-être définie par trois paramètres plus accessibles à la mesure : f_t la valeur de la contrainte au pic en traction simple, f_c la valeur de la contrainte au pic en compression simple et τ la valeur de la contrainte au pic en cisaillement pur. Les relations de recalage sont les suivantes :

$$c_{comp}=\frac{1+\nu}{1-2\nu}\frac{(f_c-f_t)\tau\sqrt{3}}{2f_tf_c};\qquad c_{volu}=\frac{2(1+\nu)}{1-2\nu}\left[\left(\frac{(f_c+f_t)\tau\sqrt{3}}{2f_tf_c}\right)^2-1\right]$$

8.15.4 Opérandes COEF_RIGI_MINI

COEF_RIGI_MINI
C'est le paramètre de régularisation de la matrice tangente à la rupture, pour éviter les pivots nuls si la fissuration devait découper la pièce en plusieurs morceaux non maintenus par les conditions aux limites. Il ne dépend pas des variables de commande.

Le module de Young E et le coefficient de Poisson ν sont à préciser par les mots-clés ELAS ou ELAS_FO.
Le paramètre de non localité est renseigné sous le mot-clé C_GRAD_VARI derrière le mot-clé facteur NON_LOCAL. Il est lié au paramètres macroscopiques par :

8.16 Mot clé facteur ENDO_FISS_EXP/ENDO_FISS_EXP_FO

Définition des paramètres de la loi de comportement ENDO_FISS_EXP [R5.03.27], qui décrit la rupture élastique fragile d'un matériau isotrope homogène. Cette loi n'est disponible que pour la modélisation à gradient d'endommagement GRAD_VARI.

8.16.1 Syntaxe

```
| ENDO_FISS_EXP_FO
  ENDO_FISS_EXP =      _F     (
                                    ♦    K                              =
    k,                          [R] ou [fonction]
                                    ♦    M                              =
    m,                          [R] ou [fonction]
                                    ♦    P                              =
    p,                          [R] ou [fonction]
                                    ◊    Q                              =
    /     q,                    [R] ou [fonction]

          /     0,                  [DEFAUT]
                                    ♦    TAU                  =     tau,
                [R] ou [fonction]
                                    ♦    SIG0                 =
    sig0,             [R] ou [fonction]
                                    ◊    BETA                 =     /
    beta,       [R]

          /     1E-1,       [DEFAUT]
                                    ♦    REST_RIGIDITE     =     gamma,
          [R]
                                    ◊    COEF_RIGI_MINI    =     /
    A_min,      [R]
```


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

```
/      1E-5,        [DEFAUT]
                          )
```

8.16.2 Opérande K, M, P, Q

Il s'agit des paramètres internes du modèle qui définissent l'écrouissage, voir [R5.03.27]. Leur identification est prise en charge par la commande DEFI_MATER_GC [U4.42.07], à partir de grandeurs accessibles expérimentalement.

8.16.3 Opérandes TAU, SIG0, BETA

Il s'agit des paramètres internes du modèle qui définissent la forme de la surface de charge (à une homothétie près), voir [R5.03.27]. Elle s'appuie sur la contrainte de Von Mises et l'exponentiel du tenseur des contraintes et se compare bien à des résultats expérimentaux sur du béton en chargement biaxial. Le paramètre BETA est de nature plus numérique et n'a comme intérêt que de rendre le domaine d'élasticité borné, y compris pour les compressions hydrostatiques ; la valeur par défaut remplit bien cet office, sans incidence sur la forme du domaine dans les zones d'intérêt.
Là aussi, la commande DEFI_MATER_GC [U4.42.07] permet d'identifier ces paramètres à partir de grandeurs accessibles expérimentalement (limites en traction et en compression).

8.16.4 Opérande REST_RIGIDITE

La restauration de rigidité est active pour les directions de déformation en compression. Pour éviter un changement de régime brutal lors du passage de traction à compression, une fonction S' régularise le saut de rigidité, voir [R5.03.27]. Le paramètre REST_RIGIDITE, positif, vient contrôler cette régularisation ; il correspond au coefficient γ de la fonction S'. Une valeur de 0 conduit à ne pas restaurer la rigidité (i.e. le modèle est sans restauration de rigidité) tandis qu'une valeur très grande revient à s'affranchir quasiment de la régularisation. La commande DEFI_MATER_GC [U4.42.07] facilite la quantification de ce paramètre en stipulant quelle proportion de la rigidité est restaurée pour un niveau de déformation correspondant au seuil initial en compression.

8.16.5 Opérandes COEF_RIGI_MINI

C'est le paramètre de régularisation de la matrice tangente à la rupture, pour éviter les pivots nuls si la fissuration devait découper la pièce en plusieurs morceaux non maintenus par les conditions aux limites. Il ne dépend pas des variables de commande.

Le module de Young E et le coefficient de Poisson ν sont à préciser par les mots-clés ELAS ou ELAS_FO.
Le paramètre de non localité est renseigné sous le mot-clé C_GRAD_VARI derrière le mot-clé facteur NON_LOCAL ; la commande DEFI_MATER_GC [U4.42.07] permet de l'identifier à partir de grandeurs accessibles expérimentalement.

8.17 Mot-clé facteur GLRC_DM

Ce mot-clé facteur permet de définir les paramètres de la loi de comportement GLRC_DM. Il s'agit d'un modèle d'endommagement global d'une dalle de béton armé formulé en terme de relations déformation/contrainte généralisées (extension membranaire, flexion et effort membranaire, moment fléchissant), cf. [R7.01,32].

8.17.1 Syntaxe

```
| GLRC_DM = _F    (
                                    ♦     NYT          =      Nt,
      [R]
```


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

```
                                ◊    NYC          =      Nc,
        [R]
                                ♦    MYF          =      Mf,
        [R]
                                ♦    GAMMA_T      =      Gmt,
        [R]
                                ◊    GAMMA_C      =      Gmc,
        [R]
                                ♦    GAMMA_F      =      Gmf,
        [R]
                                ◊    ALPHA_C      =      Alfc,
        [R]
                                                              /     1.0,
                    [DEFAUT]
                           )
```

8.17.2 Opérandes

NYT = Nt
Effort membranaire du seuil d'endommagement en traction simple d'une dalle de béton armé (unité de force par longueur).

NYC = Nc
Effort membranaire du seuil d'« endommagement » (fin de linéarité de la courbe de compression) en compression simple d'une dalle de béton armé (unité de force par longueur).

MYF = Mf
Moment fléchissant du seuil d'endommagement en flexion simple d'une dalle de béton armé (unité de force).

GAMMA_T = Gmt
Pente endommageante relative par rapport à la pente élastique en traction simple ($0<\gamma_{MT}<1$).

GAMMA_C = Gmc
Pente endommageante relative par rapport à la pente élastique en compression simple ($0<\gamma_{MC}<1$).

GAMMA_F = Gmf
Pente endommageante relative par rapport à la pente élastique en flexion simple ($0<\gamma_{F}<1$).

ALPHA_C = Alfc
Paramètre de modulation de la fonction d'endommagement en compression pour introduire un découplage des seuils en traction et compression et induisant une courbure de la courbe de compression. La fonction d'endommagement en membrane s'écrit :

$$\xi_m(x,d_1,d_2)=\frac{1}{2}\left(\left(\frac{1+\gamma_{mt}d_1}{1+d_1}+\frac{1+\gamma_{mt}d_2}{1+d_2}\right)H(x)+\left(\frac{\alpha_c+\gamma_{mc}d_1}{\alpha_c+d_1}+\frac{\alpha_c+\gamma_{mc}d_2}{\alpha_c+d_2}\right)H(-x)\right)$$

On peut se reporter à la documentation de référence [R7.01.32] section § 3.2.4 où est exposé un résumé de l'identification des paramètres du modèle.

8.18 Mot-clé facteur DHRC

Ce mots-clé facteur permet de définir les paramètres de la loi de comportement DHRC. Il s'agit d'un modèle d'endommagement global d'une dalle de béton armé formulé à l'aide d'une méthode d'homogénéisation, en termes de relations déformation/contrainte généralisées (extension

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

membranaire, flexion et effort membranaire, moment fléchissant) et comportant des variables d'état internes d'endommagement et de glissement à l'interface acier-béton, voir [R7.01.36].

Les 258 paramètres de la loi à identifier, par homogénéisation et par la méthode des moindres carrés sur différentes valeurs d'endommagement, correspondent :

- aux paramètres contrôlant les composantes des tenseurs de rigidité élastique endommageable $\mathbf{A}$, de couplage déformations généralisées-glissements $\mathbf{B}$ et d'énergie stockée en glissement $\mathbf{C}$, pour lesquels on ne dispose pas d'expression analytique ;
- aux paramètres de seuils macroscopiques qui sont liés aux paramètres des seuils microscopiques.

8.18.1 Syntaxe

```
        | DHRC = _F (
                ♦  NYD          =     nyd
[l_R]
                ♦  SCRIT        =     scrit,
[l_R]

                ♦  AA_C         =     alpha_Ac
[l_R]
                ♦  AA_T         =     alpha_At
[l_R]
                ♦  GA_C         =     gamma_Ac
[l_R]
                ♦  GA_T         =     gamma_At
[l_R]
                ♦  AB                 =     alpha_B
      [l_R]
                ♦  GB                 =     gamma_B
      [l_R]
                ♦  C0                 =     C0
            [l_R]
                ♦  AC                 =     alpha_C
      [l_R]
                ♦  GC                 =     gamma_C,
      [l_R]
        )
```

8.18.2 Opérandes

`NYD = nyd`
Liste des deux seuils d'endommagement $G^{\zeta,crit}$ en traction simple du béton armé

`SCRIT = scrit`
Liste des quatre seuils de glissement $\Sigma_{\alpha}^{\zeta,crit}$ acier-béton équivalent

`AA_C = alpha_Ac`

Paramètres (42) α^{Ac} des dépendances en variables d'endommagement des composantes (21 termes supra-diagonaux) du tenseur d'ordre 4 symétrique $\mathbf{A}$ membrane-flexion de la plaque, dans le domaine compression, dans le repère des armatures (x, y), en notations de Voigt, identifiés par homogénéisation et par la méthode des moindres carrés sur différentes valeurs de D_{ρ}, en zone supérieure (1) puis inférieure (2) :

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

$$A^{\rho}_{\beta\delta\tau\upsilon}(D_\rho)=A^{0}_{\beta\delta\tau\upsilon}\frac{\alpha^{Ac\,\rho}_{\beta\delta\tau\upsilon}+\gamma^{Ac\,\rho}_{\beta\delta\tau\upsilon}D_\rho}{\alpha^{Ac\,\rho}_{\beta\delta\tau\upsilon}+D_\rho}$$

Remarque :

En pratique courante, à cause de l'isotropie du béton et de l'orientation des aciers selon les axes (x,y) , on aura :
AAC131 = 1., AAC161 = 1., AAC231 = 1., AAC261 = 1., AAC341 = 1., AAC351 = 1., AAC461 = 1., AAC561 = 1. ; AAC132 = 1., AAC162 = 1., AAC232 = 1., AAC262 = 1., AAC342 = 1., AAC352 = 1., AAC462 = 1., AAC562 = 1. .

AA_T = alpha_At

Paramètres (42) α^{At} des dépendances en variables d'endommagement des composantes (21 termes supra-diagonaux) du tenseur d'ordre 4 symétrique **A** membrane-flexion de la plaque, dans le domaine traction, dans le repère des armatures (x,y), en notations de Voigt, identifiés par homogénéisation et par la méthode des moindres carrés sur différentes valeurs de D_ρ , en zone supérieure (1) puis inférieure (2) :

$$A^{\rho}_{\beta\delta\tau\upsilon}(D_\rho)=A^{0}_{\beta\delta\tau\upsilon}\frac{\alpha^{At\,\rho}_{\beta\delta\tau\upsilon}+\gamma^{At\,\rho}_{\beta\delta\tau\upsilon}D_\rho}{\alpha^{At\,\rho}_{\beta\delta\tau\upsilon}+D_\rho}$$

Remarque :

En pratique courante, à cause de l'isotropie du béton et de l'orientation des aciers selon les axes (x,y) , on prendra :
AAT131 = 1., AAT161 = 1., AAT231 = 1., AAT261 = 1., AAT341 = 1., AAT351 = 1., AAT461 = 1., AAT561 = 1. ; AAT132 = 1., AAT162 = 1., AAT232 = 1., AAT262 = 1., AAT342 = 1., AAT352 = 1., AAT462 = 1., AAT562 = 1. .

GA_C = gamma_Ac

Paramètres (42) γ^{Ac} des dépendances en variables d'endommagement des composantes (21 termes supra-diagonaux) du tenseur d'ordre 4 symétrique **A** membrane-flexion de la plaque, dans le domaine compression, dans le repère des armatures (x,y), en notations de Voigt, identifiés par homogénéisation et par la méthode des moindres carrés sur différentes valeurs de D_ρ , en zone supérieure (1) puis inférieure (2).

Remarque :

En pratique courante, à cause de l'isotropie du béton et de l'orientation des aciers selon les axes (x,y) , on prendra :
GAC131 = 1., GAC161 = 1., GAC231 = 1., GAC261 = 1., GAC341 = 1., GAC351 = 1., GAC461 = 1., GAC561 = 1. ; GAC132 = 1., GAC162 = 1., GAC232 = 1., GAC262 = 1., GAC342 = 1., GAC352 = 1., GAC462 = 1., GAC562 = 1. .

GA_T = gamma_At

Paramètres (42) γ^{At} des dépendances en variables d'endommagement des composantes (21 termes supra-diagonaux) du tenseur d'ordre 4 symétrique **A** membrane-flexion de la plaque, dans le domaine traction, dans le repère des armatures (x,y), pour les glissements en grille supérieure (1) ou inférieure (2), en notations de Voigt, identifiés par homogénéisation et par la méthode des moindres carrés sur différentes valeurs de D_ρ , en zone supérieure (1) puis inférieure (2).

Remarque :

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

En pratique courante, à cause de l'isotropie du béton et de l'orientation des aciers selon les axes (x, y) , on prendra :
GAT131 = 1., GAT161 = 1., GAT231 = 1., GAT261 = 1., GAT341 = 1., GAT351 = 1.,
GAT461 = 1., GAT561 = 1. ; GAT132 = 1., GAT162 = 1., GAT232 = 1., GAT262 = 1.,
GAT342 = 1., GAT352 = 1., GAT462 = 1., GAT562 = 1. .

AB = alpha_B

Paramètres (24) α^B des dépendances en variables d'endommagement des composantes (24 termes supra-diagonaux) du tenseur d'ordre 3 symétrique $\mathbf{B}$ de couplage membrane-flexion-glissement de la plaque, dans le repère des armatures (x, y), pour les glissements en grille supérieure (1) puis inférieure (2), en notations de Voigt, identifiés par homogénéisation et par la méthode des moindres carrés sur différentes valeurs de D_ρ :

$$\text{avec : } B^{m\rho\pi}_{\beta\delta\zeta}(D_\rho)=\frac{\gamma^{Bm\rho\pi}_{\beta\delta\zeta} D_\rho}{\alpha^{Bm\rho\pi}_{\beta\delta\zeta}+D_\rho} \;;\; B^{f\rho\pi}_{\beta\delta\zeta}(D_\rho)=\frac{\gamma^{Bf\rho\pi}_{\beta\delta\zeta} D_\rho}{\alpha^{Bf\rho\pi}_{\beta\delta\zeta}+D_\rho}$$

Remarque :
En pratique courante, à cause de l'isotropie du béton et de l'orientation des aciers selon les axes (x, y) , on prendra :
AB311 = 1., AB321 = 1., AB611 = 1., AB621 = 1.,
AB312 = 1., AB322 = 1., AB612 = 1., AB622 = 1.

GB = gamma_B

Paramètres (24) γ^B des dépendances en variables d'endommagement des composantes (24 termes supra-diagonaux) du tenseur d'ordre 3 symétrique $\mathbf{B}$ de couplage membrane-flexion-glissement de la plaque, dans le repère des armatures (x, y), pour les glissements en grille supérieure (1) puis inférieure (2), en notations de Voigt, identifiés par homogénéisation et par la méthode des moindres carrés sur différentes valeurs de D_ρ .

Remarque :
En pratique courante, à cause de l'isotropie du béton et de l'orientation des aciers selon les axes (x, y) , on prendra :
GB311 = 0, GB321 = 0, GB611 = 0, GB621 = 0,
GB312 = 0, GB322 = 0, GB612 = 0, GB622 = 0.

C0 = C0

Composantes (6 termes supra-diagonaux non nuls) du tenseur d'ordre 2 symétrique d'énergie libre de glissement acier-béton $\mathbf{C}^0$ de la plaque avant endommagement, selon les directions des glissements considérés, dans le repère des armatures (x, y), en grille supérieure (1) ou inférieure (2), en notations de Voigt, identifiées par homogénéisation :

$$\begin{pmatrix} C^{01}_{xx} & C^{01}_{yx} & 0 & 0 \\ & C^{01}_{yy} & 0 & 0 \\ & & C^{02}_{xx} & C^{02}_{yx} \\ & & & C^{02}_{yy} \end{pmatrix}$$

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

Remarque :

En pratique courante, à cause de l'isotropie du béton et de l'orientation des aciers selon les axes (x, y) *, on aura :* C0211 = 0, C0212 = 0.

AC = alpha_C

Paramètres (6) α^C des dépendances en variables d'endommagement des composantes (6 termes supra-diagonaux) du tenseur symétrique $\mathbf{C}$ identifiés par homogénéisation et par la méthode des moindres carrés sur différentes valeurs de D_ρ :

$$C^{\rho}_{\beta\delta}(D_\rho) = C^{0\rho}_{\beta\delta}\frac{\alpha^{C\rho}_{\beta\delta} + \gamma^{C\rho}_{\beta\delta} D_\rho}{\alpha^{C\rho}_{\beta\delta} + D_\rho}$$

Remarque :

En pratique courante, à cause de l'isotropie du béton et de l'orientation des aciers selon les axes (x, y) *, comme :* C0211 = 0, C0212 = 0 *, on prendra :* AC211 = 1., AC212 = 1..

GC = gamma_C

Paramètres (6) γ^C des dépendances en variables d'endommagement des composantes (6 termes supra-diagonaux) du tenseur symétrique $\mathbf{C}$ identifiés par homogénéisation et par la méthode des moindres carrés sur différentes valeurs de D_ρ .

Remarque :

En pratique courante, à cause de l'isotropie du béton et de l'orientation des aciers selon les axes (x, y) *, comme :* C0211 = 0, C0212 = 0 *, on prendra :* GC211 = 1., GC212 = 1..

On peut se reporter à la documentation de référence [R7.01.36] où est exposé un résumé de l'identification des paramètres du modèle.

8.19 Mot-clé facteur BETON_REGLE_PR

Ce mot-clé sert à définir les paramètres matériau utilisés par le comportement BETON_REGLE_PR (règle «Parabole-Rectangle»). Ce comportement est utilisable uniquement en 2D (contraintes planes ou déformations planes) ou en coques (modélisations DKT, COQUE_3D) (voir par exemple le test ssnp129a). Il se réduit à un comportement unidimensionnel, qui s'écrit, dans chacune des directions principales du tenseur 2D des déformations :

•En traction :

$$\begin{cases} \sigma = E\,\varepsilon & \text{si} \quad 0 < \varepsilon < \dfrac{\sigma^t_y}{E} \\ \sigma = \sigma^t_y + E_T\left(\varepsilon - \dfrac{\sigma^t_y}{E}\right) & \text{si} \quad \dfrac{\sigma^t_y}{E} < \varepsilon < \dfrac{\sigma^t_y}{E}\left(1 - \dfrac{E}{E_T}\right) \\ \sigma = 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

•En compression :

$$\begin{cases} \sigma = \sigma^c_y\left[1 - \left(1 - \dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)^n\right] & \text{si} \quad \varepsilon > \varepsilon_c \\ \sigma = \sigma^c_y & \text{sinon} \end{cases}$$

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

8.19.1 Syntaxe

```
|     BETON_REGLE_PR =_F       (
                                ♦    DSIGM_EPSI  =     Et
      [R]
                                ♦    SYT               =     Syt
      [R]
                                ◊    SYC               =     Syc
      [R]
                                ◊    EPSC              =     Epsc
            [R]
                                ◊    N                       =     N
            [     R]
                               )
```

8.19.2 Opérandes

DSIGM_EPSI = Et

Module tangent post-pic en traction E_t (négatif).

SYT = Syt

Contrainte ultime en traction σ_y^t.

SYC = Syc

Contrainte ultime en compression σ_y^c. Elle doit être donnée positive.

EPSC = Epsc

Déformation ultime en compression ε_c. Elle doit être donnée positive.

N = n

Exposant de la loi d'écrouissage en compression.

8.20 Mot clé JOINT_BA

Ces paramètres définissent le modèle de comportement non linéaire de la liaison acier - béton est employé pour le calcul fin des structures en béton armé où la prédiction des fissures et la redistribution des contraintes dans le béton sont très importantes. Disponible pour des analyses sous l'effet de chargements monotones et cycliques, le modèle est écrit dans le cadre de formulation thermodynamique des processus irréversibles. Il permet de tenir compte de l'endommagement de l'interface en cisaillement, en combinaison avec les effets du frottement des fissures, ainsi que des déformations irréversibles. Le document [R7.01.21] décrit les détails correspondants.

Ce modèle doit être employé avec les éléments « joint » en 2D [R3.06.09]. Les armatures d'acier pourront être modélisées avec des éléments plans (QUAD4) ou unidimensionnels (BARRE).

Remarque :
La prise en compte de l'effet d'un chargement thermique n'est pas possible pour le moment.

8.20.1 Syntaxe

```
◊     |     JOINT_BA     = _F(
                                ♦    HPEN   =     / HPEN,
            [R]
                                                      / 1.0,
                        [DEFAUT]
                                ♦    GTT    =     GTT    ,
            [R]
```


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

```
                                    ♦  GAMD0 =     Gam0,
                  [R]
                                    ♦  AD1         =     ad1,
                  [R]
                                    ♦  BD1         =     / bd1,
                  [R]
                                                                  /
0.5,                    [DEFAUT]
                                    ♦  GAMD2 =     Gam2,
                  [R]
                                    ♦  AD2         =     ad2,
                  [R]
                                    ♦  BD2         =     / bd2,
                  [R]
                                                                  /
1.0                     [DEFAUT]
                                    ♦  VIFROT      =     vifrot,
                  [R]
                                    ♦  FA                =     alpha,
                        [R]
                                    ♦  FC          =     c,
                        [R]
                                    ♦  EPSTR0      =     EPSN,
                        [R]
                                    ♦  ADN         =     adn   ,
                        [R]
                                    ♦  BDN         =     / bdn,
                        [R]
                                                                  /
1.0                           [DEFAUT]
                                    )
```

8.20.2 Opérandes

HPEN = HPEN
Paramètre de pénétration entre surfaces par écrasement du béton.
On vérifie que $HPEN > 0.$.

GTT = GTT
Module de rigidité de la liaison.
On vérifie que $G_{beton} \leq GTT \leq G_{acier}$.

GAMD0 = Gam0
Seuil d'adhérence parfaite ou limite de déformation élastique.
On vérifie que $1.E-4 < Gam0 < 1.E-2$.

AD1 = ad1
Paramètre d'évolution de l'endommagement en région 1 (passage des petites déformations aux grands glissements).
On vérifie que $1.E-1 < AD1 < 1.E+1$.

BD1 = bd1
Paramètre de puissance décrivant l'évolution de la variable d'endommagement en région 1 (passage des petites déformations aux grands glissements).
On vérifie que $BD1 < 1.E-1$.

GAMD2 = Gam2
Seuil des grands glissements.
On vérifie que $1.E-4 < Gam2 < 1.E+0$.

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

AD2 = ad2
Paramètre d'évolution de l'endommagement en région 2 (résistance maximale de la liaison et dégradation en frottement).
On vérifie que $AD2 < 1.\mathrm{E}-6$.

BD2 = bd2
Paramètre de puissance décrivant l'évolution de la variable d'endommagement en région 2 (résistance maximale de la liaison et dégradation en frottement).
On vérifie que $BD2 < 1.\mathrm{E}-1$.

VIFROT = vifrot
Paramètre matériau décrivant l'influence du frottement des fissures.
On vérifie que $VIFROT < 0.0E+0$.

FA = alpha
Paramètre matériau lié à l'écrouissage cinématique par frottement des fissures.
On vérifie que $FA < 0.0E+0$.

FC = c
Paramètre décrivant l'influence du confinement sur la résistance de la liaison.
On vérifie que $FC < 0.0E+0$.

EPSTR0 = EPSN
Seuil de déformation élastique sur la direction normale avant la rupture. On vérifie que $1.\mathrm{E}-4 < EPSN < 1.\mathrm{E}+0$.

ADN = adn
Paramètre de l'endommagement dans la direction normale par ouverture de la fissure.
On vérifie que $ADN < 1.\mathrm{E}-10$.

BDN = bdn
Paramètre de puissance décrivant l'évolution de la variable d'endommagement dans la direction normale.
On vérifie que $BDN < 1.\mathrm{E}-1$.

8.21 Mot clé BETON_RAG

Ce modèle est utilisé pour estimer le comportement à long terme des structures affectées par la réaction alcali-granulat [R7.01.26]. Il permet d'évaluer les déformations et l'endommagement anisotrope (fissuration) des ouvrages atteints. Il comporte un critère de Rankine en traction et un critère de Drücker-Prager en compression. Les deux critères sont associés à une loi d'évolution conduisant à un comportement adoucissant.

8.21.1 Syntaxe

```
/ BETON_RAG = _F(
    Caractéristiques pour le comportement mécanique endommagement
    ♦ ENDO_MC      = meca_mc                                    [R]
    ♦ ENDO_MT      = meca_mt                                    [R]
    ♦ ENDO_SIGUC   = meca_siguc                                 [R]
    ♦ ENDO_SIGUT   = meca_sigut                                 [R]
    ♦ ENDO_DRUPRA  = meca_drupra                                [R]

    Caractéristiques de fluage
    ♦ FLUA_SPH_KR  = flua_sph_kr                                [R]
    ♦ FLUA_SPH_KI  = flua_sph_ki                                [R]
    ♦ FLUA_SPH_NR  = flua_sph_nr                                [R]
    ♦ FLUA_SPH_NI  = flua_sph_ni                                [R]
    ♦ FLUA_DEV_KR  = flua_dev_kr                                [R]
```


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

♦ FLUA_DEV_KI = flua_dev_ki [R]
♦ FLUA_DEV_NR = flua_dev_nr [R]
♦ FLUA_DEV_NI = flua_dev_ni [R]

Caractéristiques de la formation des gels et de la RAG
♦ GEL_ALPHA0 = gel_alpha0 [R]
♦ GEL_TREF = gel_tref [R]
♦ GEL_EAR = gel_ear [R]
♦ GEL_SR0 = gel_sr0 [R]
♦ GEL_VG = gel_vg [R]
♦ GEL_MG = gel_mg [R]
♦ GEL_BG = gel_bg [R]
♦ GEL_A0 = gel_a0 [R]
♦ RAG_EPSI0 = rag_epsi0 [R]
♦ PW_A = pw_a [R]
♦ PW_B = pw_b [R]
)

8.21.2 Opérandes

8.21.2.1 Opérandes liées au modèle d'endommagement

♦ ENDO_MC
Paramètre de fragilité du béton en compression.
♦ ENDO_MT
Paramètre de fragilité du béton en traction.
♦ ENDO_SIGUC
Contrainte équivalente du béton en compression. L'unité de ce paramètre est homogène à une contrainte.
♦ ENDO_SIGUT
Contrainte équivalente du béton en traction. L'unité de ce paramètre est homogène à une contrainte.
♦ ENDO_DRUPRA
Ce terme est une caractéristique du critère de compression. Il correspond à l'angle en **radians** du critère de Drucker Prager.

8.21.2.2 Opérandes liées au modèle de fluage

♦ FLUA_SPH_KR
Module de compressibilité différé pour le fluage sphérique réversible. L'unité de ce paramètre est homogène à une contrainte.
♦ FLUA_SPH_KI
Module de compressibilité différé pour le fluage sphérique irréversible. L'unité de ce paramètre est homogène à une contrainte.
♦ FLUA_SPH_NR
Coefficient de viscosité pour le fluage sphérique réversible. L'unité de ce paramètre est homogène à une contrainte*temps.
♦ FLUA_SPH_NI
Coefficient de viscosité pour le fluage sphérique irréversible. L'unité de ce paramètre est homogène à une contrainte*temps.
♦ FLUA_DEV_KR
Module de compressibilité différé pour le fluage déviatorique réversible. L'unité de ce paramètre est homogène à une contrainte.
♦ FLUA_DEV_KI
Module de compressibilité différé pour le fluage déviatorique irréversible. L'unité de ce paramètre est homogène à une contrainte.
♦ FLUA_DEV_NR
Coefficient de viscosité pour le fluage déviatorique réversible. L'unité de ce paramètre est homogène à une contrainte*temps.

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

- FLUA_DEV_NI
  Coefficient de viscosité pour le fluage déviatorique irréversible. L'unité de ce paramètre est homogène à une contrainte*temps.

8.21.2.3 Opérandes liées au retrait endogène et à la formation du gel

- PW_A , PW_B
  Pour les milieux non saturés, ces coefficients sont ceux de de Van Genuchten.
- GEL_MG
  Module d'élasticité du gel. L'unité de ce paramètre est homogène à une contrainte.
- GEL_BG
  Coefficient de 'biot' du gel.
- GEL_VG
  Volume maximum de gel qui peut être créé par la réaction chimique ; il correspond au volume théorique de gel créé par volume unitaire de béton maintenu dans des conditions saturées pendant un temps infini.
- GEL_A0
  Avancement à partir duquel la porosité connectée initiale est comblée.
- GEL_ALPHA0
  Cinétique d'avancement identifiée à Tref.
- GEL_TREF
  Température de référence pour GEL_ALPHA0, dans l'équation de l'avancement chimique. L'unité de ce paramètre est homogène à des degré Celsius $[°C]$ et est convertie en degré Kelvin $[K]$ lors de la résolution (ajout de 273.15$[°C]$).
- GEL_EAR
  C'est le rapport entre l'énergie d'activation de la réaction et la constante gaz parfait. L'unité de ce paramètre est homogène à des degrés Kelvin $[K]$. La constante universelle des gaz parfaits est le produit du nombre d'Avogadro et de la constante de Boltzmann.
  Ce produit vaut $R = 8{,}3144621\ [J].[mol]^{-1}.[K]^{-1}$.
- GEL_SR0
  Seuil de saturation à partir duquel l'évolution de la réaction chimique devient possible.
- RAG_EPSI0
  Déformation visqueuse pour la RAG.

8.22 Mot clé BETON_BURGER

Le modèle de fluage BETON_BURGER suppose une décomposition entre les composantes sphériques et déviatoriques : les déformations induites par les contraintes sphériques sont purement sphériques et les déformations induites par les contraintes déviatoriques sont purement déviatoriques [R7.01.35]. Par ailleurs, la déformation de fluage propre est supposée proportionnelle à l'humidité relative interne :

Partie sphérique : $\varepsilon^s = h \cdot f\left(\sigma^s\right)$ et, partie déviatorique : $\underline{\underline{\varepsilon^d}} = h \cdot f\left(\underline{\underline{\widetilde{\sigma}}}\right)$

où h désigne l'humidité relative interne.
Le modèle de comportement BETON_BURGER est un modèle basé sur le modèle BETON_UMLV [R7.01.06] pour décrire le fluage propre des bétons. Il est particulièrement adapté aux configurations multiaxiales en ne présupposant pas la valeur du coefficient de Poisson de fluage. Les évolutions apportées portent sur la prise en compte d'une consolidation du fluage traduite par un terme non linéaire sur le comportement à long-terme du modèle. De plus, les parties sphériques et déviatoriques sont à présent construites de façon identique, laissant la possibilité de contrôler le coefficient de Poisson apparent de fluage.
Les parties sphériques et déviatoriques sont décrites par des chaînes rhéologiques équivalentes, chaîne dite de Bürger. Ce modèle est initialement construit suivant un étage de Kelvin Voigt (partie réversible) couplé en série à un corps de Maxwell (partie irréversible).
Le modèle permet aussi de prendre en compte l'effet de la température sur les déformations de fluage via une loi de type Arrhénius.

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

Les caractéristiques mécaniques élastiques E et NU doivent être définies en parallèle sous le mot-clé ELAS. Les valeurs sous les mots-clefs ELAS seront comparées à celles entrées sous le mot-clef BETON_BURGER. Si elles sont différentes, une erreur fatale sera émise.
Si le mot-clef ELAS n'est pas renseigné, code_aster le fera automatiquement en prenant les caractéristiques élastiques du mot-clef BETON_ BURGER .

8.22.1 Syntaxe

Le modèle BETON_BURGER, introduit dans Aster, est implémenté sous MFront :

```
 |    BETON_BURGER :    _F    (
                              ♦          YoungModulus            =
E,                       [R]
                              ♦          PoissonRatio            =
NU ,              [R]
                              ♦          K_RS
=     K_RS,               [R]
                              ♦          K_RD
=     K_RD,               [R]
                              ♦          ETA_RS
=     ETA_RS,             [R]
                              ♦          ETA_IS
=     ETA_IS,             [R]
                              ♦          ETA_RD
=     ETA_RD,             [R]
                              ♦          ETA_ID
=     ETA_ID,             [R]
                              ♦          KAPPA
=     KAPPA,              [R]
                              ♦          QSR_K
=     QSR_K,              [R]
                              ♦          TEMP_0_C
=     TEMP_0_C,    [R]
                                   ♦          ETA_FD
=     ETA_FD              [R]
                                   )
```

8.22.2 Opérandes

YoungModulus = E

E Module de Young. Cette opérande est obligatoire du fait de l'utilisation de Mfront

PoissonRatio = NU

ν Coefficient de Poisson. Cette opérande est obligatoire du fait de l'utilisation de Mfront

K_RS = K_RS

k_r^s rigidité apparente associée à la partie sphérique réversible des déformations de fluage

K_RD = K_RD

k_r^d rigidité apparente associée à la partie déviatorique réversible des déformations de fluage

ETA_RS = ETA_RS

η_r^s viscosité apparente associée aux déformations sphériques réversibles

ETA_IS = ETA_IS

η_i^s viscosité apparente associée aux déformations sphériques irréversibles

ETA_RD = ETA_RD

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

η_r^d viscosité aux déformations déviatoriques réversibles

ETA_ID = ETA_ID

η_i^d viscosité aux déformations déviatoriques irréversibles

KAPPA = KAPPA

κ terme affectant la viscosité à long terme (η_i^s et η_i^d) du matériau

QSR_K = Eac/R

E_{ac}/R vaut en général $4700.K$. (R est la constante des gaz parfaits).

TEMP_0_C = T0

Température de référence dans la loi d'Arrhénius. La température de référence T_0 est **en degrés Celsius**, et convertie en Kelvin lors de la résolution.

ETA_FD = ETA_FD

permet de prendre en compte le fluage de dessiccation selon la loi de Bazant.

Remarque :

La courbe de désorption donnant l'hygrométrie h en fonction de la concentration en eau C doit être renseignée sous le mot-clé ELAS_FO .

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

8.23 Mot clé FLUA_PORO_BETON

Ce modèle est utilisé pour estimer le comportement des structures soumises à des déformations différées de fluage[R7.01.30]. Les déformations différées du squelette solide sont appelées déformations propres de fluage. Elles peuvent être permanentes ou réversibles, en fonction des phénomènes sous-jacents. Dans le modèle, les équations constitutives de fluage propre sont toujours utilisées couplées à un modèle de déformation plastique qui assure la compatibilité du champ de contraintes avec les critères de résistance. En pratique, le modèle de fluage propre implique deux modules rhéologiques usuels : un étage de Kelvin-Voigt pour le fluage visco-élastique réversible et un étage de Maxwell plastique pour le fluage permanent. Les effets de la pression intraporeuse sont considérés à travers le cadre poromécanique.

8.23.1 Syntaxe

```
| FLUA_PORO_BETON = _F(
     Caractéristiques liées au comportement mécanique
     ♦ RT           = rt                                          [R]
    ♦ RC           = rc                                          [R]
    ♦ DELT         = delt                                        [R]

     Caractéristiques de fluage
    ♦ TREF         = tref                                        [R]
    ♦ TAUK         = tauk                                        [R]
    ♦ YKSY         = yksy                                        [R]
    ♦ TAUM         = taum                                        [R]
    ♦ EKFL         = ekfl                                        [R]
    ♦ XFLU         = xflu                                        [R]
    ♦ NRJM         = nrjm                                        [R]
    ♦ DFMX         = dfmx                                        [R]

     Caractéristiques liées au retrait/fluage en dessiccation
     ♦ PORO         = poro                                  [fonction]
     ◊ MSHR         = / 0.0                                   [DEFAUT]
                      / mshr                                       [R]
     ◊ MVGN         = / 0.0                                   [DEFAUT]
                      / mvgn                                       [R]
     ◊ BSHR         = / 0.0                                   [DEFAUT]
                      / bshr                                       [R]
     ◊ SFLD         = / 0.0                                   [DEFAUT]
                      / sfld                                       [R]

     Caractéristiques liées à l'endommagement thermique
    ♦ DT80         = dt80                                        [R]
     ♦ TSTH         = tsth                                        [R]

     Caractéristiques liées à l'hydratation
    ♦ HYDR         = hydr                                  [fonction]
     ♦ HYDS         = hyds                                        [R]

    )
```

8.23.2 Opérandes

8.23.2.1 Opérandes liées au comportement mécanique

- ♦ RT
  Résistance en traction.
- ♦ RC
  Résistance en compression.
- ♦ DELT
  Coefficient de prise en compte du confinement.

8.23.2.2 Opérandes liées au modèle de fluage

- ♦ TREF
  Température de référence pour le fluage.
- ♦ TAUK
  Temps caractéristique du module de Kelvin.
- ♦ YKSY
  Rapport : Rigidité de Kelvin / Module de Young.
- ♦ TAUM
  Temps caractéristique du module de Maxwell.
- ♦ EKFL
  Déformation caractéristique du potentiel de fluage.
- ♦ XFLU
  Coefficient de non-linéarité.
- ♦ NRJM
  Énergie d'activation de fluage.
- ♦ DFMX
  Endommagement de fluage.

8.23.2.3 Opérandes liées au retrait/fluage en dessiccation

- ♦ PORO
  Porosité du matériau.
- ◊ MSHR
  Module de Van Genuchten.
- ◊ MVGN
  Exposant de Van Genuchten.
- ◊ BSHR
  Coefficient de Biot de la pression capillaire.
- ◊ SFLD
  Contrainte caractéristique de dessiccation.

8.23.2.4 Opérandes liées à l'endommagement thermique

- ♦ DT80
  Endommagement à 80°C.
- ♦ TSTH
  Température seuil pour l'endommagement thermique.

8.23.2.5 Opérandes liées à l'hydratation

- ♦ HYDR
  Avancement de l'hydratation.
- ♦ HYDS
  Seuil de solidification de l'avancement.

8.24 Mot clé ENDO_PORO_BETON

Ce modèle est utilisé pour estimer le comportement des structures soumises à de l'endommagement d'origine mécanique (en traction, compression ou cisaillement) ou thermique [R7.01.30]. La fissuration du béton y est décrite grâce à un modèle non linéaire couplant des critères plastiques et des endommagements, tous anisotropes. Ces endommagements font le lien entre la contrainte totale et la contrainte effective au sens de la théorie de l'endommagement. En traction, les critères de Rankine permettent de reproduire les macro-fissures structurelles localisées. En compression, le critère de Drucker-Prager permet d'établir l'endommagement de cisaillement, en lien avec la dilatance issue de l'écoulement non associé basé sur le critère de Drucker-Prager.

8.24.1 Syntaxe

```
| ENDO_PORO_BETON = _F(
                  Caractéristiques liées au comportement mécanique
                  ♦ RT          = rt                                    [R]
                  ♦ EPT         = ept                                   [R]
                  ♦ RC          = rc                                    [R]
                  ♦ EPC         = epc                                   [R]
                  ♦ DELT        = delt                                  [R]
                  ♦ BETA        = beta                                  [R]
                  ♦ REF         = ref                                   [R]
                  ♦ EKDC        = yksy                                  [R]
                  ♦ GFT         = gft                                   [R]
                  ♦ GFR         = gfr                                   [R]
                  ♦ DIM3        = dim3                                  [R]

                  Caractéristiques liées à l'endommagement thermique
                  ♦ DT80        = dt80                                  [R]
                  ♦ TSTH        = tsth                                  [R]

                  Caractéristiques liées à l'hydratation
                  ♦ HYDR        = hydr                              [fonction]
                  ♦ HYDS        = hyds                                  [R]
    )
```

8.24.2 Opérandes

8.24.2.1 Opérandes liées au comportement mécanique

♦ RT
Résistance en traction.

♦ EPT
Déformation au pic de traction.

♦ RC
Résistance en compression.

♦ EPC
Déformation au pic de compression.

♦ DELT
Coefficient de prise en compte du confinement.

♦ BETA
Dilatance pour l'écoulement plastique non associé de Drucker-Prager.

♦ REF
Contrainte de refermeture de fissure.

♦ EKDC
Déformation caractéristique plastique de l'endommagement de Drucker-Prager.

♦ GFT
Énergie de fissuration en traction.

♦ GFR
Énergie de refermeture des fissures de traction.

♦ DIM3
Taille de l'élément dans la 3ème direction (pour cas AXIS ou 2D).

8.24.2.2 Opérandes liées à l'endommagement thermique

♦ DT80
Endommagement à 80°C.

♦ TSTH
Température seuil pour l'endommagement thermique.

8.24.2.3 Opérandes liées à l'hydratation

- ♦ HYDR
  Avancement de l'hydratation.
- ♦ HYDS
  Seuil de solidification de l'avancement.

8.25 Mot clé FLUA_ENDO_PORO

Ce modèle est utilisé pour estimer le comportement des structures soumises à des déformations différées de fluage et à de l'endommagement d'origine mécanique (en traction, compression ou cisaillement) ou thermique de manière couplée [R7.01.30]. Cette loi reprend les lois de comportement FLUA_PORO_BETON et ENDO_PORO_BETON en y ajoutant des couplages entres les phénomènes physiques.

8.25.1 Syntaxe

```
| FLUA_ENDO_PORO = _F(
    Caractéristiques liées au comportement mécanique
    ♦ RT          = rt                                          [R]
    ♦ EPT         = ept                                         [R]
    ♦ RC          = rc                                          [R]
    ♦ EPC         = epc                                         [R]
    ♦ DELT        = delt                                        [R]
    ♦ BETA        = beta                                        [R]
    ♦ REF         = ref                                         [R]
    ♦ EKDC        = yksy                                        [R]
    ♦ GFT         = gft                                         [R]
    ♦ GFR         = gfr                                         [R]
    ♦ DIM3        = dim3                                        [R]

    Caractéristiques de fluage
    ♦ TREF        = tref                                        [R]
    ♦ TAUK        = tauk                                        [R]
    ♦ YKSY        = yksy                                        [R]
    ♦ TAUM        = taum                                        [R]
    ♦ EKFL        = ekfl                                        [R]
    ♦ XFLU        = xflu                                        [R]
    ♦ NRJM        = nrjm                                        [R]
    ♦ DFMX        = dfmx                                        [R]

    Caractéristiques liées au retrait/fluage en dessication
    ♦ PORO         = poro                                  [fonction]
    ◊ MSHR         = / 0.0                                   [DEFAUT]
                     / mshr                                       [R]
    ◊ MVGN         = / 0.0                                   [DEFAUT]
                     / mvgn                                       [R]
    ◊ BSHR         = / 0.0                                   [DEFAUT]
                     / bshr                                       [R]
    ◊ SFLD         = / 0.0                                   [DEFAUT]
                     / sfld                                       [R]


    Caractéristiques liées à l'endommagement thermique
    ♦ DT80        = dt80                                        [R]
    ♦ TSTH        = tsth                                        [R]
```

```
                                        Caractéristiques liées à l'hydratation
                ♦ HYDR        = hydr                                    [fonction]
                 ♦ HYDS        = hyds                                          [R]

            )
```

8.25.2 Opérandes

8.25.2.1 Opérandes liées au comportement mécanique

- ♦ RT
  Résistance en traction.
- ♦ EPT
  Déformation au pic de traction.
- ♦ RC
  Résistance en compression.
- ♦ EPC
  Déformation au pic de compression.
- ♦ DELT
  Coefficient de prise en compte du confinement.
- ♦ BETA
  Dilatance pour l'écoulement plastique non associé de Drucker-Prager.
- ♦ REF
  Contrainte de refermeture de fissure.
- ♦ EKDC
  Déformation caractéristique plastique de l'endommagement de Drucker-Prager.
- ♦ GFT
  Énergie de fissuration en traction.
- ♦ GFR
  Énergie de refermeture des fissures de traction.
- ♦ DIM3
  Taille de l'élément dans la 3ème direction (pour cas AXIS ou 2D).

8.25.2.2 Opérandes liées au modèle de fluage

- ♦ TREF
  Température de référence pour le fluage.
- ♦ TAUK
  Temps caractéristique du module de Kelvin.
- ♦ YKSY
  Rapport : Rigidité de Kelvin / Module de Young.
- ♦ TAUM
  Temps caractéristique du module de Maxwell.
- ♦ EKFL
  Déformation caractéristique du potentiel de fluage.
- ♦ XFLU
  Coefficient de non-linéarité.
- ♦ NRJM
  Énergie d'activation de fluage.
- ♦ DFMX
  Endommagement de fluage.

8.25.2.3 Opérandes liées au retrait/fluage en dessiccation

- ♦ PORO
  Porosité du matériau.
- ◊ MSHR
  Module de Van Genuchten.
- ◊ MVGN
  Exposant de Van Genuchten.

◊ BSHR
Coefficient de Biot de la pression capillaire.
◊ SFLD
Contrainte caractéristique de dessiccation.

8.25.2.4 Opérandes liées à l'endommagement thermique

♦ DT80
Endommagement à 80°C.
♦ TSTH
Température seuil pour l'endommagement thermique.

8.25.2.5 Opérandes liées à l'hydratation

♦ HYDR
Avancement de l'hydratation.
♦ HYDS
Seuil de solidification de l'avancement.

8.26 Mot clé RGI_BETON

Ce modèle est utilisé pour estimer le comportement des structures soumises à des réactions de gonflement interne (RGI) qu'ils proviennent de la réaction alcali-granulats (RAG) ou de la DEF (Formation d'Ettringite Différée) issue de la RSI (Réaction Sulfatique Interne) [R7.01.30]. Le volume de produit expansif créé et calculé par des modèles chimiques, permet le calcul de la pression intraporeuse qui, combinée au chargement externe, permet d'évaluer la fissuration diffuse anisotrope grâce à des critères de fissuration anisotropes et des lois d'écrouissage. Il est à noter que l'ensemble des phénomènes et des équations de la loi FLUA_ENDO_BETON et donc a fortiori de FLUA_PORO_BETON et de ENDO_PORO_BETON sont réutilisés dans RGI_BETON. En effet, la bonne prise en compte des phénomènes de gonflement nécessite la prise en compte du fluage et de l'endommagement de manière couplée.

8.26.1 Syntaxe

```
| RGI_BETON = _F(
     Caractéristiques liées à la réaction alcali-granulats (RAG)
    ♦ VRAG          = vrag                                          [R]
    ♦ TAUG          = taug                                          [R]
    ♦ SRSG          = srsg                                          [R]
    ♦ TRAG          = trag                                          [R]
    ♦ NRJG          = nrjg                                          [R]

     Caractéristiques liées à la réaction sulfatique interne (RSI)
    ♦ VDEF          = vdef                                          [R]
    ♦ TDEF          = tdef                                          [R]
    ♦ SSAD          = ssad                                          [R]
    ♦ SRSD          = srsd                                          [R]
    ♦ SNAK          = snak                                          [R]
    ♦ NRJP          = nrjp                                          [R]
    ♦ NRJD          = nrjd                                          [R]
    ♦ TTDD          = ttdd                                          [R]
    ♦ TTRD          = ttrd                                          [R]
    ♦ TDID          = tdid                                          [R]
    ♦ TFID          = tfid                                          [R]
    ♦ C NA D          = sna d                                [ fonction ]
    ♦ CNAK          = sna k                                         [R]
    ♦ CNAB          = sna b                                         [R]
    ♦ EXND          = exnd                                          [R]
    ♦ EXMD          = exmd                                          [R]
```

Caractéristiques liées aux réactions de gonflement interne (RGI)

♦ VVRG = vvrg [R]
♦ KRGI = krgi [R]
♦ HRGI = hrgi [R]
♦ EKRG = ekrg [R]
◊ ALAT =/ 0.0 [DEFAUT]
/ alat [R]
◊ HPEV =/ 0.1 [DEFAUT]
/ hpev [R]
♦ KGEL = kgel [R]

Caractéristiques liées au comportement mécanique

♦ RT = rt [R]
♦ EPT = ept [R]
♦ RC = rc [R]
♦ EPC = epc [R]
♦ DELT = delt [R]
♦ BETA = beta [R]
♦ REF = ref [R]
♦ EKDC = ekdc [R]
♦ GFT = gft [R]
♦ GFR = gfr [R]
♦ DIM3 = dim3 [R]

Caractéristiques de fluage

♦ TREF = tref [R]
♦ TAUK = tauk [R]
♦ YKSY = yksy [R]
♦ TAUM = taum [R]
♦ EKFL = ekfl [R]
♦ XFLU = xflu [R]
♦ NRJM = nrjm [R]
♦ DFMX = dfmx [R]

Caractéristiques liées au retrait/fluage en dessication

♦ PORO = poro [fonction]
◊ MSHR = / 0.0 [DEFAUT]
/ mshr [R]
◊ MVGN = / 0.0 [DEFAUT]
/ mvgn [R]
◊ BSHR = / 0.0 [DEFAUT]
/ bshr [R]
◊ SFLD = / 0.0 [DEFAUT]
/ sfld [R]

Caractéristiques liées à l'endommagement thermique

♦ DT80 = dt80 [R]
♦ TSTH = tsth [R]

Caractéristiques liées à l'hydratation

♦ HYDR = hydr [fonction]
♦ HYDS = hyds [R]

)

8.26.2 Opérandes

8.26.2.1 Opérandes liées à la réaction alcali-granulats (RAG)

- VRAG
  Ratio maximum de volume de RAS.
- TAUG
  Temps caractéristique de RAS.
- SRSG
  Seuil de degré de saturation en eau pour activer la RAS.
- TRAG
  Température de référence à laquelle est réalisé l'essai.
- NRJG
  Énergie d'activation pour la cinétique de la RAS.

8.26.2.2 Opérandes liées à la réaction sulfatique interne (RSI)

- VDEF
  Ratio maximum de volume de DEF qui initialise les quantités d'aluminium et de sulfate.
- TDEF
  Temps caractéristique de précipitation de DEF.
- SSAD
  Ratio Sulfates/Aluminiums.
- SRSD
  Degré de saturation caractéristique pour la précipitation.
- SNAK
  Concentration de référence en alcalins.
- NRJP
  Énergie d'activation pour la fixation et la précipitation.
- NRJD
  Énergie d'activation pour la dissolution.
- TTDD
  Température seuil de référence.
- TTRD
  Température de référence pour le temps caractéristique TDEF.
- TDID
  Temps caractéristique pour la dissolution des sulfoaluminates.
- TFID
  Temps caractéristique pour la fixation des aluminates dans les hydro-grenats.
- CNAD
  Concentration en alcalins
- CNAK
  Concentration en alcalins caractéristiques contrôlant la dissolution des sulfoaluminates primaires.
- CNAB
  Concentration en alcalins bloquant la précipitation de DEF.
- EXND
  Exposant du couplage dissolution-température.
- EXMD
  Exposant du couplage précipitation –fixation des aluminiums.
- TTKF
  Température seuil de fixation des aluminiums en hydro-grenats.
- NRJF
  Énergie de fixation des aluminiums en hydro-grenats.

8.26.2.3 Opérandes liées aux réactions de gonflement interne (RGI)

- VVRG
  Volume des vides connectés aux sites de création de RGI.
- KRGI
  Facteur de concentration de contraintes.

♦ HRGI
Rapport du module d'écrouissage plastique et du module de Young pour le critère plastique de RGI.
♦ EKRG
Déformation caractéristique pour les endommagements de RGI.
◊ ALAT
Avancement chimique minimal au-delà duquel le volume de gel est effectif .
◊ HPEV
Coefficient multiplicateur de l'écrouissage de la résistance en traction pour de fort gonflement de RGI (>0.4%).
♦ KGEL
Rigidité du produit de RGI considéré .

8.26.2.4 Opérandes liées au comportement mécanique

♦ RT
Résistance en traction.
♦ EPT
Déformation au pic de traction.
♦ RC
Résistance en compression.
♦ EPC
Déformation au pic de compression.
♦ DELT
Coefficient de prise en compte du confinement.
♦ BETA
Dilatance pour l'écoulement plastique non associé de Drucker-Prager.
♦ REF
Contrainte de refermeture de fissure.
♦ EKDC
Déformation caractéristique plastique de l'endommagement de Drucker-Prager.
♦ GFT
Énergie de fissuration en traction.
♦ GFR
Énergie de refermeture des fissures de traction.
♦ DIM3
Taille de l'élément dans la 3ème direction (pour cas AXIS ou 2D).

8.26.2.5 Opérandes liées au modèle de fluage

♦ TREF
Température de référence pour le fluage.
♦ TAUK
Temps caractéristique du module de Kelvin.
♦ YKSY
Rapport : Rigidité de Kelvin / Module de Young.
♦ TAUM
Temps caractéristique du module de Maxwell.
♦ EKFL
Déformation caractéristique du potentiel de fluage.
♦ XFLU
Coefficient de non-linéarité.
♦ NRJM
Energie d'activation de fluage.
♦ DFMX
Endommagement de fluage.

8.26.2.6 Opérandes liées au retrait/fluage en dessication

♦ PORO
Porosité du matériau.

◊ MSHR
Module de Van Genuchten.
◊ MVGN
Exposant de Van Genuchten.
◊ BSHR
Coefficient de Biot de la pression capillaire.
◊ SFLD
Contrainte caractéristique de dessiccation.

8.26.2.7 Opérandes liées à l'endommagement thermique

♦ DT80
Endommagement à 80°C.
♦ TSTH
Température seuil pour l'endommagement thermique.

8.26.2.8 Opérandes liées à l'hydratation

♦ HYDR
Avancement de l'hydratation.
♦ HYDS
Seuil de solidification de l'avancement.

8.27 Mot clé facteur ENDO_LOCA_EXP / ENDO_LOCA_EXP_FO

Définition des paramètres de la loi de comportement ENDO_LOCA_EXP [R7.01.42], qui décrit la fissuration homogène d'une structure en béton via un modèle d'endommagement local quasi-fragile isotrope.

8.27.1 Syntaxe

```
| ENDO_LOCA_EXP_FO
  ENDO_LOCA_EXP =      _F    (
                                    ♦    KAPPA                    =
    kappa,             [R] ou [fonction]
                                    ♦    P                              =
    p,                       [R] ou [fonction]
                                    ♦    SIGC                     =
    sigc,              [R] ou [fonction]
                                    ♦    SIG0                     =
    sig0,              [R] ou [fonction]
                                    ◊    BETA0                    =     /
    beta,        [R]

          /     1E-1,        [DEFAUT]
                                    ♦    REST_RIGIDITE            =
    gamma,       [R]
                                   )
```

8.27.2 Opérandes KAPPA et P

Il s'agit des paramètres internes du modèle qui définissent l'écrouissage, voir [R7.01.42]. Leur identification est prise en charge par la commande DEFI_MATER_GC [U4.42.07], à partir de grandeurs plus accessibles expérimentalement.

Opérandes SIGC, SIG0, BETA0
Il s'agit des paramètres internes du modèle qui définissent la forme de la surface de charge (à une homothétie près), voir [R7.01.42]. Elle s'appuie sur la contrainte de Von Mises et l'exponentiel du tenseur des contraintes et se compare bien à des résultats expérimentaux sur du béton en chargement biaxial. Le paramètre BETA0 est de nature plus numérique et n'a comme intérêt que de

rendre le domaine d'élasticité borné, y compris pour les compressions hydrostatiques ; la valeur par défaut remplit bien cet office, sans incidence sur la forme du domaine dans les zones d'intérêt.
Là aussi, la commande DEFI_MATER_GC [U4.42.07] permet d'identifier ces paramètres à partir de grandeurs accessibles expérimentalement (limites en traction et en compression).

8.27.3 Opérande REST_RIGIDITE

La restauration de rigidité est active pour les directions de déformation en compression. Pour éviter un changement de régime brutal lors du passage de traction à compression, une fonction S' régularise le saut de rigidité, voir [R7.01.42]. Le paramètre REST_RIGIDITE, positif, vient contrôler cette régularisation ; il correspond au coefficient γ de la fonction S'. Une valeur de 0 conduit à ne pas restaurer la rigidité (i.e. le modèle est sans restauration de rigidité) tandis qu'une valeur très grande revient à s'affranchir quasiment de la régularisation. La commande DEFI_MATER_GC [U4.42.07] facilite la quantification de ce paramètre en stipulant quelle proportion de la rigidité est restaurée pour un niveau de déformation correspondant au seuil initial en compression.

9 Comportements métallo-mécaniques

Pour le comportement métallurgique (cf. [R4.04.01]), deux lois de comportement sont disponibles : une loi caractéristique des transformations métallurgiques de l'acier et une loi caractéristique des alliages de zirconium.

Remarque :

L'acier peut comporter (au plus) cinq phases métallurgiques différentes (phase froide 1 = ferrite, phase froide 2 = perlite, phase froide 3 = bainite, phase froide 4 = martensite et une phase chaude = l'austénite), α

Le zircaloy peut comporter (au plus) trois phases métallurgiques différentes (phase froide 1 = phase α *pure, phase froide 2 = phase* α *mélange et une phase chaude = phase* β *.*

Pour le comportement mécanique avec la prise en compte des transformations métallurgiques, il existe deux modèles.
Le premier modèle (cf. [R4.04.02]) est utilisable pour l'acier et pour le Zircaloy. On choisit le matériau souhaité en activant, dans l'opérateur STAT_NON_LINE, le mot clé RELATION_KIT qui vaut 'ACIER' ou 'ZIRC'. Les différentes relations relatives à ce modèle sont identiques pour ces deux matériaux (on traite les mêmes phénomènes) mais le nombre de phases en présence est différent.
Le second modèle (cf. [R4.04.05]) est uniquement disponible pour le Zircaloy (RELATION_KIT='ZIRC') et correspond au mot clé META_LEMA_ANI sous COMPORTEMENT.

9.1 Mot clé facteur META_ACIER

Paramètres à renseigner pour la métallurgie de l'acier.

9.1.1 Syntaxe

```
|     META_ACIER = _F   (
                                ♦     TRC    =    nomtrc      ,
            [table_sdaster]
                                ♦     AR3    =    ar3,
            [R]
                                ♦     ALPHA  =    alpha,
            [R]
                                ♦     MS0    =    mso,
            [R]
                                ♦     AC1    =    ac1,
            [R]
                                ♦     AC3    =    ac3   ,
            [R]
```

```
                                    ♦      TAUX_1 =    t1,
[R]
                                    ♦      TAUX_3 =    t3,
[R]
                                    ◊      LAMBDA0=    l0,
[R]
                                    ◊      QSR_K  =    Qapp,
[R]
                                    ◊      D10    =    d10   ,
[R]
                                    ◊      WSR_K  =    Wapp,
[R]
                                    )
```

9.1.2 Opérandes pour les changements de phases

TRC = nomtrc

Concept de type trc produit par l'opérateur DEFI_TRC [U4.43.04] et contenant l'ensemble des informations fournies par les diagrammes TRC (Transformation en Refroidissement Continu) de l'acier considéré.

AR3 = ar3

Température quasi-statique de début de décomposition de l'austénite au refroidissement.

ALPHA = alpha

Coefficient α de la loi de Koïstinen-Marbürger exprimant la quantité de martensite formée en fonction de la température :

$$Z_m = 1 - exp(\alpha(M_s - T))$$

MSO = mso

Température de début de transformation martensitique lorsque celle-ci est totale. Dans ce cas $M_s = M_{s0}$.

AC1 = ac1

Température quasi-statique de début de transformation en austénite au chauffage.

AC3 = ac3

Température quasi-statique de fin de transformation en austénite.

TAUX_1 = t1

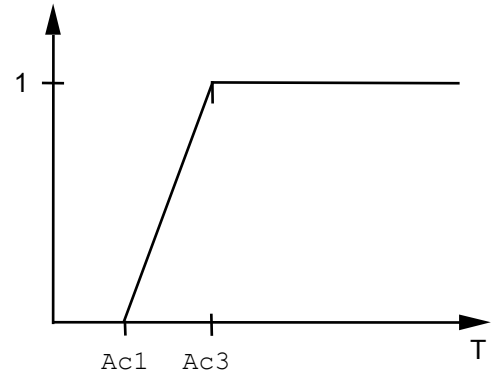
Valeur de la fonction "retard" (cf. [R4.04.01]) $\tau(T)$ intervenant dans le modèle de transformation austénitique à la température AC1.

TAUX_3 = t3

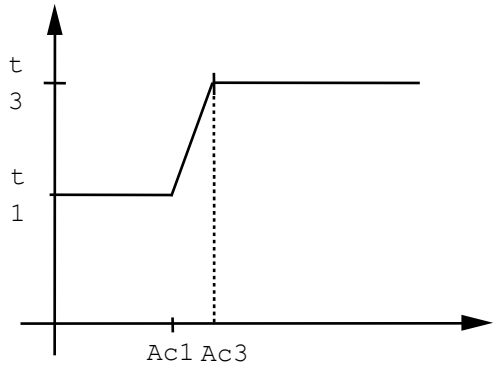
Valeur de la fonction "retard" (cf. [R4.04.01]) $\tau(T)$ intervenant dans le modèle de transformation austénitique à la température AC3.

L'évolution de la proportion d'austénite est alors définie par : $\dot{Z} = \frac{Z - Z_{\text{eq}}(T)}{\tau(T)}$

avec: $Z_{\text{eq}}(T)$



et $\tau\left(T\right)$



9.1.3 Opérandes pour la taille de grains

Les quatre opérandes suivants entraînent le calcul de taille de grains s'ils sont renseignés.

LAMBDA0 = l0

Paramètre matériau intervenant dans le modèle d'évolution de taille de grain ci-dessous.

$$\frac{dD}{dt}=\frac{1}{\lambda}\left(\frac{1}{D}-\frac{1}{D_{\lim}}\right) \text{ avec } \left\{\begin{array}{l}\lambda=\lambda_0\, exp(\frac{Q_{app}}{RT})\\ D_{\lim}=D_{10}\, exp(-\frac{W_{app}}{RT})\end{array}\right.$$

QSR_K = Qapp/R

Paramètre énergie d'activation intervenant dans le modèle d'évolution de taille de grain.

D10 = D10

Paramètre matériau intervenant dans le modèle d'évolution de taille de grain.

WSR_K = Wapp/R

Paramètre énergie d'activation intervenant dans le modèle d'évolution de taille de grain.

9.2 Mot clé facteur **META_ZIRC**

Paramètres à renseigner pour la métallurgie du Zircaloy (cf. [R4.04.04]).

9.2.1 Syntaxe

```
|     META_ZIRC = _F    (
                                ♦     TDEQ  =     teqd,
      [R]
                                ♦     N           =     n,
                  [R]
                                ♦     K           =     K,
                  [R]
                                ♦     T1C   =     t1c   ,
      [R]
                                ♦     T2C   =     t2c   ,
      [R]
                                ♦     QSR_K =     qsr   ,
      [R]
                                ♦     AC          =     Ac,
            [R]
                                ♦     M           =     m,
                  [R]
                                ♦     T1R   =     t1r,
      [R]
                                ♦     T2R   =     t2r,
      [R]
                                ♦     AR          =     Ar,
            [R]
                                ♦     BR          =     Br
                  [R]
                                                  )
```

9.2.2 Opérandes

TDEQ = teqd

Température de début de transformation $\alpha \Leftrightarrow \beta$ à l'équilibre
α : phase à froid hexagonale compacte
β : phase à chaud cubique centrée

N = n
Paramètre matériau relatif au modèle donnant la proportion de β en fonction de la température, à l'équilibre.

K = K
Paramètre matériau relatif au modèle donnant la proportion de β en fonction de la température, à l'équilibre.

T1C = t1c
Température de début de transformation α en β au chauffage.

T1C = t1c
Paramètre matériau intervenant dans le calcul de la température de début de transformation α en β au chauffage.

T2C = t2c
Paramètre matériau intervenant dans le calcul de la température de début de transformation α en β au chauffage.

AC = Ac
Paramètre matériau intervenant dans le modèle d'évolution de β au chauffage.

M = m
Paramètre matériau intervenant dans le modèle d'évolution de β au chauffage.

T2R = t2r
Paramètre matériau intervenant dans le calcul de la température de début de transformation β en α au refroidissement.

T2R = t2r
Paramètre matériau intervenant dans le calcul de la température de début de transformation β en α au refroidissement.

AR = Ar
Paramètre matériau intervenant dans le modèle d'évolution de β au refroidissement.

BR = Br
Paramètre matériau intervenant dans le modèle d'évolution de β au refroidissement.

QSR_K = qsr
Constante d'Arrhénius exprimé en degré Kelvin.

9.3 Mot clé facteur **DURT_META**

Définition des caractéristiques relatives au calcul de dureté associée à la métallurgie des aciers.
La dureté est calculée en utilisant une loi de mélange linéaire sur la micro-dureté des constituants :

$$HV = \sum_i z_i HV_i$$

HV_i : micro-dureté du constituant i
z_i : proportion du constituant i

9.3.1 Syntaxe

```
|      DURT_META = _F(
                                    ♦      F1_DURT      =      HVf1,
                [R]
                                    ♦      F2_DURT      =      HVf2,
                [R]
                                    ♦      F3_DURT      =      HVf3,
                [R]
                                    ♦      F4_DURT      =      HVf4,
                [R]
                                    ♦      C_DURT       =      HVa
                [R]
                                    )
```

9.3.2 Opérandes

F1_DURT = HVf1
Micro-dureté de la phase à froid $F1$ (ferrite pour l'acier).

F2_DURT = HVf2
Micro-dureté de la phase à froid $F2$ (perlite pour l'acier).

F3_DURT = HVf3
Micro-dureté de la phase à froid $F3$ (bainite pour l'acier).

F4_DURT = Hvf4
Micro-dureté de la phase à froid $F4$ (martensite pour l'acier).

C_DURT = HVf1
Micro-dureté pour la phase à chaud (austénite pour l'acier).

9.4 Mots clés facteur ELAS_META, ELAS_META_FO

Définition des caractéristiques élastiques, de dilatation et de limites d'élasticité pour la modélisation d'un matériau subissant des transformations métallurgiques (voir [R4.04.02] ou [R4.04.05]). Ces coefficients peuvent être soient constants par rapport à la température ELAS_META, soient dépendre de la température ELAS_META_FO (paramètre 'TEMP').
Certains coefficients dépendent de la structure métallurgique (paramètre 'META').

Remarque :
Concernant le modèle META_LEMA_ANI, la dilatation thermique s'écrit classiquement sans distinction des phases. Par conséquent, les mots clés 'C_ALPHA', 'PHASE_REFE' et 'EPSF_EPSC_TREF' sont obligatoires mais non pris en compte dans les équations. Seul le coefficient de dilatation 'F_ALPHA' est considéré.
Ce modèle est une loi sans seuil donc les limites d'élasticité et la loi des mélanges ne sont pas utiles.

Remarque :
Concernant les autres modèles, pour un acier on renseigne au maximum 5 limites d'élasticité, pour le Zircaloy on en renseigne au maximum trois.

9.4.1 Syntaxe

```
            | /   ELAS_META
              /   ELAS_META_FO = _F (
                                        ♦     E                         =
      young,            [R] ou [fonction]
                                        ♦     NU                        =     nu,
                  [R] ou [fonction]
                                        ♦     F_ALPHA           =     fal,
            [R] ou [fonction]
                                        ♦     C_ALPHA           =     cal,
            [R] ou [fonction]
                                        ♦     PHASE_REFE  = /   'CHAUD', [TXM]
                                                                    /
      'FROID', [TXM]
                                        ♦     EPSF_EPSC_TREF=deltae,        [R]
                                        ◊     TEMP_DEF_ALPHA=Tda,           [R]
(_FO)
                                        ◊     PRECISION         = / eps,
      [R]
                                                                          /
1.,         [DEFAUT]
                                        ◊     F1_SY             =     F1sy,
            [R] ou [fonction]
                                        ◊     F2_SY             =     F2sy,
            [R] ou [fonction]
                                        ◊     F3_SY             =     F3sy,
            [R] ou [fonction]
                                        ◊     F4_SY             =     F4sy,
            [R] ou [fonction]
                                        ◊     C_SY              =     Fsy,
            [R] ou [fonction]
                                        ◊     SY_MELANGE  =     f,
            [fonction]
                                        ◊     F1_S_VP           =     F1svp,
            [R] ou [fonction]
                                        ◊     F2_S_VP           =     F2svp,
            [R] ou [fonction]
                                        ◊     F3_S_VP           =     F3svp,
            [R] ou [fonction]
                                        ◊     F4_S_VP           =     F4svp,
            [R] ou [fonction]
                                        ◊     C_S_VP                  =
      Csvp,       [R] ou [fonction]
                                        ◊     S_VP_MELANGE      =     Svp
      [fonction]
                                              )
```

9.4.2 Opérandes

E = young
Module de Young, identique pour toutes les phases métallurgiques.

NU = nu
Coefficient de Poisson, identique pour toutes les phases métallurgiques.

F_ALPHA = fal
Coefficient de dilatation thermique moyen des phases froides.

C_ALPHA = cal
Coefficient de dilatation thermique moyen de la phase chaude.

PHASE_REFE = / 'CHAUD'
/ 'FROID'

Choix de la phase métallurgique de référence (phase chaude ou phase froide).
En effet, pour définir la déformation thermique nulle, il faut définir la température de référence T_{ref} (définie dans AFFE_MATERIAU) et la phase métallurgique de référence, de sorte que la déformation thermique soit considérée nulle à T_{ref} et dans l'état métallurgique de référence.

EPSF_EPSC_TREF = deltae

Déformation de la phase non de référence par rapport à la phase de référence à la température T_{ref} : traduit la différence de compacité entre les structures cristallographiques cubiques à faces centrées (type austénitique) et cubiques centrées (type ferritique).

TEMP_DEF_ALPHA = Tda

Température par rapport à laquelle on définit le coefficient de dilatation. Dans le cas où C_ALPHA est une fonction, cet opérande est obligatoire.

PRECISION = eps

Ce réel indique avec quelle précision une température T est proche de la température de référence (cf. [§3.1.4]).

F1_SY= F1sy

Limite d'élasticité de la phase froide 1 pour un comportement plastique.

F2_SY= F2sy

Limite d'élasticité de la phase froide 2 pour un comportement plastique.

F3_SY= F3sy

Limite d'élasticité de la phase froide 3 pour un comportement plastique.

F4_SY= F4sy

Limite d'élasticité de la phase froide 4 pour un comportement plastique.

C_SY = Fsy

Limite d'élasticité de la phase chaude pour un comportement plastique.

SY_MELANGE = f

Fonction utilisée pour la loi de mélange sur la limite d'élasticité du matériau multiphasé pour un comportement plastique.

$$\sigma_y = \left(1 - f\left(z\right)\right)\sigma_y^{\gamma} + f\left(z\right)\sigma_y^{\alpha}$$

F1_S_VP = F1svp

Limite d'élasticité de la phase froide 1 pour un comportement visqueux.

F2_S_VP = F2svp

Limite d'élasticité de la phase froide 2 pour un comportement visqueux.

F3_S_VP = F3svp

Limite d'élasticité de la phase froide 3 pour un comportement visqueux.

F4_S_VP = F4svp

Limite d'élasticité de la phase froide 4 pour un comportement visqueux.

C_S_VP = Csvp

Limite d'élasticité de la phase chaude pour un comportement visqueux.

S_VP_MELANGE = Svp

Fonction utilisée pour la loi de mélange sur la limite d'élasticité du matériau multiphasé pour un comportement visqueux.

$$\sigma_c = \left(1 - f\left(z\right)\right)\sigma_c^{\gamma} + f\left(z\right)\sigma_c^{\alpha}$$

9.5 Mot clé facteur META_ECRO_LINE

Définition de cinq modules d'écrouissage utilisés dans la modélisation du phénomène d'écrouissage isotrope linéaire d'un matériau subissant des changements de phases métallurgiques (voir [R4.04.02]). Ces modules dépendent de la température.

9.5.1 Syntaxe

```
|     META_ECRO_LINE = _F     (
                                  ◊    F1_D_SIGM_EPSI=   dsde1,
        [fonction]
                                  ◊    F2_D_SIGM_EPSI=   dsde2,
        [fonction]
                                  ◊    F3_D_SIGM_EPSI=   dsde3,
        [fonction]
                                  ◊    F4_D_SIGM_EPSI=   dsde4,
        [fonction]
                                  ◊    C_D_SIGM_EPSI     =     dsdec,
              [fonction]
                                )
```

9.5.2 Opérandes

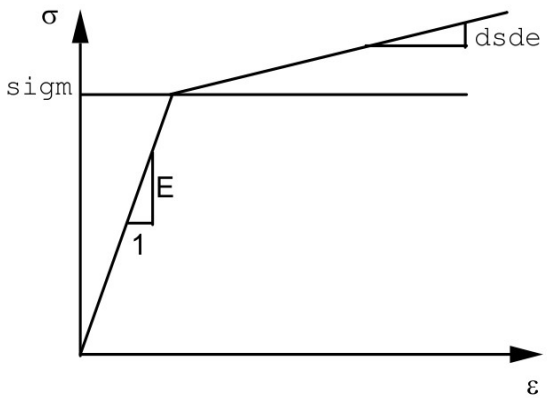
F1_D_SIGM_EPSI = dsde1
Pente de la courbe de traction pour la phase froide 1.

F2_D_SIGM_EPSI = dsde2
Pente de la courbe de traction pour la phase froide 2.

F3_D_SIGM_EPSI = dsde3
Pente de la courbe de traction pour la phase froide 3.

F4_D_SIGM_EPSI = dsde4
Pente de la courbe de traction pour la phase froide 4.

C_D_SIGM_EPSI = dsdec
Pente de la courbe de traction pour la phase chaude.



Le module de Young E est à préciser par les mots-clés META_ELAS ou META_ELAS_FO.

9.6 Mot clé facteur META_TRACTION

Définition de cinq courbes de traction utilisées dans la modélisation du phénomène d'écrouissage isotrope non linéaire d'un matériau subissant des changements de phases métallurgiques (voir [R4.04.02]). Les courbes de traction peuvent éventuellement dépendre de la température.

9.6.1 Syntaxe

```
|      META_TRACTION = _F (
                                          ◊      SIGM_F1      =      r_p1,
                [fonction]
                                          ◊      SIGM_F2      =      r_p2,
                [fonction]
                                          ◊      SIGM_F3      =      r_p3,
                [fonction]
                                          ◊      SIGM_F4      =      r_p4,
                [fonction]
                                          ◊      SIGM_C       =      r_pc
                [fonction]
                                          )
```

9.6.2 Opérandes

SIGM_F1 = r_p1

Courbe écrouissage isotrope R en fonction de la déformation plastique cumulée p pour la phase froide 1 .

SIGM_F2 = r_p2

Courbe écrouissage isotrope R en fonction de la déformation plastique cumulée p pour la phase froide 2 .

SIGM_F3 = r_p3

Courbe écrouissage isotrope R en fonction de la déformation plastique cumulée p pour la phase froide 3 .

SIGM_F4 = r_p4

Courbe écrouissage isotrope R en fonction de la déformation plastique cumulée p pour la phase froide 4 .

SIGM_C = r_p c

Courbe écrouissage isotrope R en fonction de la déformation plastique cumulée p pour la phase chaude.

Remarque :

Attention il ne s'agit pas de la courbe σ fonction de ε mais de la courbe R fonction de p . On passe de l'une à l'autre en effectuant les calculs suivants :

$$R = \sigma - limite\ d'élasticité\ ,\ p = \varepsilon - (\sigma / E).$$

9.7 Mot clé facteur META_VISC_FO

Définition des paramètres visqueux de la loi de comportement viscoplastique avec prise en compte de la métallurgie (voir [R4.04.02]). Le modèle viscoplastique de type Norton-Hoff comporte 5 paramètres ; les paramètres classique η , n de la loi d'écoulement en puissance, la limite élastique d'écoulement visqueuse, les paramètres C et m relatifs à la restauration d'écrouissage d'origine visqueuse. Ces paramètres dépendent de la température et de la structure métallurgique.

Les paramètres limites d'élasticité sont définis dans ELAS_META.

9.7.1 Syntaxe

```
|     META_VISC_FO      = _F  (
                                ◊    F1_ETA            =     eta1,
                [fonction]
                                ◊    F2_ETA            =     eta2,
                [fonction]
                                ◊    F3_ETA            =     eta3,
                [fonction]
                                ◊    F4_ETA            =     eta4,
                [fonction]
                                ◊    C_ETA             =     etac,
                [fonction]
                                ◊    F1_N              =     n1,
                [fonction]
                                ◊    F2_N              =     n2,
                [fonction]
                                ◊    F3_C              =     C1,
                [fonction]
                                ◊    F2_C              =     C2,
                [fonction]
                                ◊    F3_C              =     C3,
                [fonction]
                                ◊    F4_C              =     C4,
                [fonction]
                                ◊    C_C               =     C5,
                [fonction]
                                ◊    F1_M              =     m1,
                [fonction]
                                ◊    F2_M              =     m2,
                [fonction]
                                ◊    F3_M              =     m3,
                [fonction]
                                ◊    F4_M              =     m4,
                [fonction]
                                ◊    C_M               =     m5
                      [fonction]
                                )
```

9.7.2 Opérandes F1_ETA/F2_ETA/F3_ETA/F4_ETA/C_ETA

F1_ETA = eta1

Paramètre η de la loi d'écoulement visco-plastique, pour la phase froide 1.

F2_ETA = eta2

Paramètre η de la loi d'écoulement visco-plastique, pour la phase froide 2.

F3_ETA = eta3

Paramètre η de la loi d'écoulement visco-plastique, pour la phase froide 3.

F4_ETA = eta4

Paramètre η de la loi d'écoulement visco-plastique, pour la phase froide 4.

C_ETA= etac

Paramètre η de la loi d'écoulement visco-plastique, pour la phase à chaud.

9.7.3 Opérandes F1_N/F2_N/F3_N/F4_N/C_N

F1_N = n1
Paramètre n de la loi d'écoulement visco-plastique, pour la phase froide 1.

F2_N = n2
Paramètre n de la loi d'écoulement visco-plastique, pour la phase froide 2.

F3_N = n3
Paramètre n de la loi d'écoulement visco-plastique, pour la phase froide 3.

F4_N = n4
Paramètre n de la loi d'écoulement visco-plastique, pour la phase froide 4.

C_N = n5
Paramètre n de la loi d'écoulement visco-plastique, pour la phase à chaud.

9.7.4 Opérandes F1_C/F2_C/F3_C/F4_C/C_C

F1_C = C1
Paramètre C relatif à la restauration d'écrouissage d'origine visqueuse, pour la phase froide 1.

F2_C = C2
Paramètre C relatif à la restauration d'écrouissage d'origine visqueuse, pour la phase froide 2.

F3_C = C3
Paramètre C relatif à la restauration d'écrouissage d'origine visqueuse, pour la phase froide 3.

F4_C = C4
Paramètre C relatif à la restauration d'écrouissage d'origine visqueuse, pour la phase froide 4.

C_C = C5
Paramètre C relatif à la restauration d'écrouissage d'origine visqueuse, pour la phase à chaud.

9.7.5 Opérandes F1_M/F2_M/F3_M/F4_M/C_M

F1_M = m1
Paramètre m relatif à la restauration d'écrouissage d'origine visqueuse, pour la phase froide 1.

F2_M = m2
Paramètre m relatif à la restauration d'écrouissage d'origine visqueuse, pour la phase froide 2.

F3_M = m3
Paramètre m relatif à la restauration d'écrouissage d'origine visqueuse, pour la phase froide 3.

F4_M = m4
Paramètre m relatif à la restauration d'écrouissage d'origine visqueuse, pour la phase froide 4.

C_M = m5
Paramètre m relatif à la restauration d'écrouissage d'origine visqueuse, pour la phase à chaud.

9.8 Mot clé facteur META_PT

Définition des caractéristiques utilisées dans la modélisation de la plasticité de transformation d'un matériau qui subit des changements de phases métallurgiques (voir [R4.04.02]).

Le modèle est le suivant : $\Delta \varepsilon^{pt} = \frac{3}{2} \sigma \sum_{i=1}^{i=4} K_i F_i'(Z_i) \langle \Delta Z_i \rangle$

9.8.1 Syntaxe

```
| META_PT = _F (
                    ◊ F1_K = Kf,
[R]
```

```
                                        ◊    F2_K              = Kp,
                [R]
                                        ◊    F3_K              = Kb,
                [R]
                                        ◊    F4_K              = Km,
                [R]
                                        ◊    F1_D_F_META = F'f,
              [fonction]
                                        ◊    F2_D_F_META = F'p,
              [fonction]
                                        ◊    F3_D_F_META = F'b,
              [fonction]
                                        ◊    F4_D_F_META = F'm
              [fonction]
                                      )
```

9.8.2 Opérandes

`F1_K = Kf, F2_K = Kp, F3_K = Kb, F4_K = Km`

Constantes K_i utilisées dans le modèle de plasticité de transformation, pour les différentes phases à froid. Pour l'acier = phase ferritique, perlitique, bainitique et martensitique.

`F1_D_F_META=F'f, F2_D_F_META=F'p, F3_D_F_META=F'b, F4_D_F_META=F'm,`

Fonctions $F_i^{'}$ utilisées dans le modèle de plasticité de transformation, pour les différentes phases à froid. Pour l'acier : phase ferritique, perlitique, bainitique et martensitique.

9.9 Mot clé facteur **META_RE**

Définition des caractéristiques utilisées dans la modélisation du phénomène de restauration d'écrouissage d'un matériau qui subit des changements de phases métallurgiques (voir [R4.04.02]).

9.9.1 Syntaxe

```
      |    META_RE = _F      (
                                        ◊    C_F1_THETA =      Tgf   ,
                [R]
                                        ◊    C_F2_THETA =      Tgp   ,
                [R]
                                        ◊    C_F3_THETA =      Tgb,
                [R]
                                        ◊    C_F4_THETA =      Tgm   ,
                [R]
                                        ◊    F1_C_THETA =      Tfg,
                [R]
                                        ◊    F2_C_THETA =      Tpg,
                [R]
                                        ◊    F3_C_THETA =      Tbg,
                [R]
                                        ◊    F4_C_THETA =      Tmg
                [R]
                      )
```

9.9.2 Opérandes

`C_F1_THETA=Tgf, C_F2_THETA=Tgp, C_F3_THETA=Tgb, C_F4_THETA=Tgm`

Constantes caractérisant le taux d'écrouissage transmis lors de la transformation de la phase à chaud C en phase à froid. Pour l'acier; transformation de l'austénite en ferrite, perlite, bainite et martensite. Ainsi, $\theta=0$ correspond à une restauration totale et $\theta=1$ à une transmission totale de l'écrouissage.

```
F1_C_THETA=Tfg,   F2_C_THETA=Tpg,   F3_C_THETA=Tbg,
                                                F4_C_THETA=Tmg
```

Constantes caractérisant le taux d'écrouissage transmis lors de la transformation des phases à froid en phase à chaud. Pour l'acier ; transformation de la ferrite, de la perlite, de la bainite et de la martensite en austénite. Ainsi, $\theta=0$ correspond à une restauration totale et $\theta=1$ à une transmission totale de l'écrouissage.

9.10 Mot clé **META_LEMA_ANI**

Définition des paramètres de la loi META_LEMA_ANI (cf. [R4.04.05]), élasto-visqueuse sans seuil avec un comportement anisotrope. Brièvement, le modèle s'écrit soit dans le repère cylindrique (r,θ,z), soit dans le repère cartésien (Ox,Oy,Oz) :

Partition des déformations : $\varepsilon=\varepsilon^e+\alpha\,\Delta T\,\mathbf{Id}+\varepsilon^v$

Loi d'écoulement de la déformation visqueuse : $\dot{\varepsilon}^v=\dot{p}\,\dfrac{M:\sigma}{\sigma_{eq}}$

Critère de Hill : $\sigma_{eq}=\sqrt{\sigma:M:\sigma}$

Matrice de Hill $\mathbf{M}$ *en coordonnées cylindriques* :

$$\underline{M}_{(r,\theta,z)}=\begin{bmatrix} M_{rrrr} & M_{rr\theta\theta} & M_{rrzz} & 0 & 0 & 0 \\ M_{rr\theta\theta} & M_{\theta\theta\theta\theta} & M_{\theta\theta zz} & 0 & 0 & 0 \\ M_{rrzz} & M_{\theta\theta zz} & M_{zzzz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_{r\theta r\theta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{rzrz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{\theta z\theta z} \end{bmatrix}$$

$$\text{avec}\begin{cases} M_{rrrr}+M_{rr\theta\theta}+M_{rrzz} = 0 \\ M_{rr\theta\theta}+M_{\theta\theta\theta\theta}+M_{\theta\theta zz} = 0 \\ M_{rrzz}+M_{\theta\theta zz}+M_{zzzz} = 0 \end{cases}$$

ou bien, en coordonnées cartésiennes :

$$\underline{M}_{(x,y,z)}=\begin{bmatrix} M_{xxxx} & M_{xxyy} & M_{xxzz} & 0 & 0 & 0 \\ M_{xxyy} & M_{yyyy} & M_{yyzz} & 0 & 0 & 0 \\ M_{xxzz} & M_{yyzz} & M_{zzzz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_{xyxy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{xzxz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{yzyz} \end{bmatrix}$$

$$\text{avec}\begin{cases} M_{xxxx}+M_{xxyy}+M_{xxzz} = 0 \\ M_{xxyy}+M_{yyyy}+M_{yyzz} = 0 \\ M_{xxzz}+M_{yyzz}+M_{zzzz} = 0 \end{cases}$$

Loi des mélanges sur la matrice $\mathbf{M}$:

$$M=\begin{cases} M^c & \text{si} \quad 0.00\leqslant Z_f\leqslant 0.01 \\ M^2=Z_f M^1+(1-Z_f)M^c & \text{si} \quad 0.01\leqslant Z_f\leqslant 0.99 \\ M^1 & \text{si} \quad 0.99\leqslant Z_f\leqslant 1.00 \end{cases}$$
$$Z_f=Z_1+Z_2;\quad Z_c=Z_3=1-Z_f$$

Vitesse de déformation équivalente : $\dot{p}=\left(\frac{\sigma_{eq}}{ap^m}\right)^n e^{-Q/T}$

ou de manière équivalente : $\sigma_{eq}=\underbrace{a\left(e^{Q/T}\right)^{1/n}p^m}_{\text{contrainte visqueuse } \sigma_v}\dot{p}^{1/n}=\sigma_v$

Loi des mélanges sur la contrainte visqueuse $\boldsymbol{\sigma_v}$:

$$\sigma_{eq}=\sigma_v=\sum_{i=1}^{3} f_i(Z_\alpha)\sigma_{vi} \text{ avec } \sigma_{vi}=a_i\left(e^{Q_i/T}\right)^{1/n_i}p^{m_i}\dot{p}^{1/n_i}$$

Remarque :
dans le cas isotrope, on a :

$$M_{rrrr}=M_{\theta\theta\theta\theta}=M_{zzzz}=1$$
$$M_{r\theta r\theta}=M_{rzrz}=M_{\theta z\theta z}=0.75$$

$$M_{xxxx}=M_{yyyy}=M_{zzzz}=1$$
$$M_{xyxy}=M_{xzxz}=M_{yzyz}=0.75$$

9.10.1 Syntaxe

Le choix du type de coordonnées (cylindriques ou cartésiennes) se fait respectivement par la détection du mot-clé F_MRR_RR ou du mot-clé F_MXX_XX.

En coordonnées cylindriques :

```
|      META_LEMA_ANI= _F(
                                ♦      F1_A          =      a1
                    [R]
                                ♦      F2_A          =      a2
                    [R]
                                ♦      C_A           =      ac
                          [R]
                                ♦      F1_M          =      m1
                          [R]
                                ♦      F2_M          =      m2
                          [R]
                                ♦      C_M           =      mc
                          [R]
                                       ♦      F1_N          =      n1,
                    [R]
                                       ♦      F2_N          =      n2,
                    [R]
                                       ♦      C_N           =      nc,
                    [R]
```

```
                                        ♦      F1_Q          =      q1,
                    [R]
                                        ♦      F2_Q          =      q2,
                    [R]
                                        ♦      C_Q           =      qc,
                    [R]
                                        ♦      F_MRR_RR      =      mrrrrf,
                    [R]
                                        ♦      C_MRR_RR      =      mrrrrc,
                    [R]
                                        ♦      F_MTT_TT      =      mttttf,
                    [R]
                                        ♦      C_MTT_TT      =      mttttc,
                    [R]
                                        ♦      F_MZZ_ZZ      =      mzzzzf,
                    [R]
                                        ♦      C_MZZ_ZZ      =      mzzzzc,
                    [R]

                                        ♦      F_MRT_RT      =      mrtrtf,
                    [R]
                                        ♦      C_MRT_RT      =      mrtrtc,
                    [R]
                                        ♦      F_MRZ_RZ      =      mrzrzf,
                    [R]
                                        ♦      C_MRZ_RZ      =      mrzrzc,
                    [R]
                                        ♦      F_MTZ_TZ      =      mtztzf,
                    [R]
                                        ♦      C_MTZ_TZ      =      mtztzc,
                    [R]
                                        )
```

En coordonnées cartésiennes :

```
                |       META_LEMA_ANI= _F(
                                        ♦      F1_A          =      a1
                    [R]
                                        ♦      F2_A          =      a2
                    [R]
                                        ♦      C_A           =      ac
                          [R]
                                        ♦      F1_M          =      m1
                          [R]
                                        ♦      F2_M          =      m2
                          [R]
                                        ♦      C_M           =      mc
                          [R]
                                        ♦      F1_N          =      n1,
                    [R]
                                        ♦      F2_N          =      n2,
                    [R]
                                        ♦      C_N           =      nc,
                    [R]
                                        ♦      F1_Q          =      q1,
                    [R]
                                        ♦      F2_Q          =      q2,
                    [R]
                                        ♦      C_Q           =      qc,
                    [R]
```

```
                                                    ♦      F_MXX_XX     =      mxxxxf,
          [R]
                                                    ♦      C_MXX_XX     =      mxxxxc,
          [R]
                                                    ♦      F_MYY_YY     =      myyyyf,
    [R]
                                                    ♦      C_MYY_YY     =      myyyyc,
    [R]
                                                    ♦      F_MZZ_ZZ     =      mzzzzf,
    [R]
                                                    ♦      C_MZZ_ZZ     =      mzzzzc,
    [R]

                                                    ♦      F_MXY_XY     =      mxyxyf,
    [R]
                                                    ♦      C_MXY_XY     =      mxyxyc,
    [R]
                                                    ♦      F_MXZ_XZ     =      mxzxzf,
    [R]
                                                    ♦      C_MXZ_XZ     =      mxzxzc,
    [R]
                                                    ♦      F_MYZ_YZ     =      myzyzf,
    [R]
                                                    ♦      C_MYZ_YZ     =      myzyzc,
    [R]
                                                    )
```

9.10.2 Opérandes

Le tableau ci-dessous résume les correspondances entre les symboles des équations et les mots clés.

Symbole dans les équations	Mot clé *Aster*
$a1$, $a2$, $a3$	'F1_A','F2_A','C_A'
$m1$, $m2$, $m3$	'F1_M','F2_M','C_M'
$n1$, $n2$, $n3$	'F1_N','F2_N','C_N'
$Q1$, $Q2$, $Q3$	'F1_Q','F2_Q','C_Q'

La matrice de Hill est connue soit pour la phase froide (1) 'F_M**_**', soit pour la phase chaude (3) 'C_M**_**'.

Remarque :
Les coefficients 'F1_Q' ,'F2_Q' *et* 'C_Q' *sont en degré Kelvin.*

10 Comportements thermo-hydro-mécaniques et des sols

10.1 Mot clé simple COMP_THM

Permet de sélectionner dès la définition du matériau la loi de couplage THM. Le tableau ci-dessous précise les mots clés obligatoires en fonction de la loi de couplage choisie.

	LIQU_SATU	LIQU_GAZ	GAZ	LIQU_GAZ_ATM	LIQU_VAPE_GAZ	LIQU_AD_GAZ_VAPE	LIQU_AD_GAZ	LIQU_VAPE
THM_INIT	***O***	***O***	***O***	***O***	***O***	***O***	***O***	***O***
PRE1	F	F	F	F	F	F	F	F
PRE2		F			F	F	F	
PORO	O	O	O	O	O	O	O	O
TEMP	F	F	F	F	F	F	F	F
PRES_VAPE					O	O		O
THM_DIFFU	***O***	***O***	***O***	***O***	***O***	***O***	***O***	***O***
R_GAZ		O	O		O	O	O	O
RHO	O	O	O	O	O	O	O	O
BIOT_COEF	O	O	O	O	O	O	O	O
PESA_X	O	O	O	O	O	O	O	O
PESA_Y	O	O	O	O	O	O	O	O
PESA_Z	O	O	O	O	O	O	O	O
SATU_PRES				O				O
D_SATU_PRES				O				O
PERM_LIQU				O				O
D_PERM_LIQU_SATU				O				O
PERM_GAZ								O
D_PERM_SATU_GAZ								O
D_PERM_PRES_GAZ								O
VG_N / VG_PR / VG_SR								
VG_SMAX / VG_SATUR								
EMMAG								
FICKV_T					O	O		
FICKV_PV								
FICKV_PG								
FICKV_S								
D_FV_T								
D_FV_PG								
FICKA_T						O	O	
FICKA_PA								
FICKA_PL								
FICKA_S								
D_FA_T								
CP	T	T	T	T	T	T	T	T
PERM_IN/PERM_END/PERM_X	O	O	O	O	O	O	O	O
PERM_Y								
PERM_Z								
LAMB_T	T	T	T	T	T	T	T	T
LAMB_S								
LAMB_PHI								
LAMB_CT								
D_LB_T								
D_LB_S								
D_LB_PHI								
THM_LIQU	***O***	***O***		***O***	***O***	***O***	***O***	***O***
RHO	O	O		O	O	O	O	O
UN_SUR_K	O	O		O	O	O	O	O
VISC	O	O		O	O	O	O	O
D_VISC_TEMP	O	O		O	O	O	O	O
ALPHA	T	T		T	T	T	T	T
CP	T	T		T	T	T	T	T
THM_GAZ		***O***	***O***	***O***	***O***	***O***	***O***	
MASS_MOL		O	O	O	O	O	O	
VISC		O	O	O	O	O	O	
D_VISC_TEMP		O	O	O	O	O	O	
CP		T	T	T	T	T	T	
THM_VAPE_GAZ					***O***	***O***		***O***
MASS_MOL					O	O		O
CP					O	O		O
VISC					O	O		O
D_VISC_TEMP					O	O		O
THM_AIR_DISS						***O***	***O***	
CP						O	O	

COEF_HENRY		O	O

O Mot clé Obligatoire
T Mot clé obligatoire en Thermique
Mot clé Inutile pour ce type de loi de couplage

La syntaxe est la suivante :

```
◊     COMP_THM =  / 'LIQU_SATU'                    ,
                  / 'LIQU_GAZ'          ,
                  / 'GAZ'                    ,
                  / 'LIQU_GAZ_ATM'           ,
                  / 'LIQU_VAPE_GAZ'          ,
                  / 'LIQU_AD_GAZ'   ,
                  / 'LIQU_AD_GAZ_VAPE'    ,
                  / 'LIQU_VAPE'              ,
```

10.2 Mot clé facteur THM_INIT

Pour tous les comportements Thermo-Hydro-Mécaniques, il permet de décrire l'état initial de la structure (cf. [R7.01.11] et [R7.01.14]).

10.2.1 Syntaxe

```
      | THM_INIT = _F  (
                              ◊    TEMP              = temp,          [R]
                              ◊    PRE1              = pre1,          [R]
                              ◊    PRE2              = pre2,          [R]
                              ♦    PORO              = poro,          [R]
                              ◊    PRES_VAPE   = pvap,                [R]
                              ◊    DEGR_SATU         = ds,            [R]
                         )
```

Pour bien comprendre ces données, il faut distinguer les inconnues aux nœuds, que nous appelons $\{u\}^{ddl}$ et les valeurs définies sous le mot clé THM_INIT que nous appelons p^{ref} et T^{ref}.

$$\{u\}^{ddl}=\begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \\ PRE1^{ddl} \\ PRE2^{ddl} \end{Bmatrix}$$

La signification des inconnues $PRE1$ et $PRE2$ varie suivant les modèles. En notant p_w la pression d'eau, p_{ad} la pression d'air dissous, p_l la pression de liquide $p_l=p_w+p_{ad}$, p_{as} la pression d'air sec p_{vp} la pression de vapeur, $p_g=p_{as}+p_{vp}$ la pression totale de gaz et $p_c=p_g-p_l$ la pression capillaire (aussi appelée succion), on a les significations suivantes des inconnues $PRE1$ et $PRE2$:

Comportement KIT	LIQU_SATU	LIQU_VAPE	LIQU_GAZ_ATM	GAZ	LIQU_VAPE_GAZ	LIQU_GAZ	LIQU_AD_GAZ_VAPE	LIQU_AD_GAZ
$PRE1$	p_l	p_l	$-p_l$	p_g	$p_c=p_g-p_l$	$p_c=p_g-p_l$	$p_c=p_g-p_l$	$p_c=p_g-p_l$
$PRE2$					p_g	p_g	p_g	p_g

On pourra se reporter au [§4.4.3] de la documentation [U4.51.11].

On définit alors les pressions et la température «totales» par :

$$p = p^{ddl} + p^{ref} ; T = T^{ddl} + T^{ref}$$

Les valeurs écrites par IMPR_RESU sont les inconnues nodales p^{ddl} et T^{ddl}. De même les conditions aux limites doivent être exprimées par rapport aux inconnues nodales.

Par contre, ce sont les pressions et la température totales qui sont utilisées dans les lois de comportement $\frac{P}{\rho} = \frac{R}{M} T$ pour les gaz parfaits, $\frac{d\,\rho_l}{\rho_l} = \frac{dp_l}{K_l} - 3\,\alpha_l\,dT$ pour le liquide et dans la relation saturation/pression capillaire.

Notons que les valeurs nodales peuvent être initialisées par le mot clé ETAT_INIT de la commande STAT_NON_LINE ou par une combinaison des deux (cela peut permettre une facile conversion de Kelvin en degré par exemple).

10.2.2 Opérande TEMP

Température de référence T^{ref} exprimée en Kelvin. Par défaut elle est prise égale à zéro.

Attention la valeur de la température **initiale** $T = T^{ddl} + T^{ref}$ doit être strictement supérieure à zéro.

La valeur de la température de référence entrée derrière le mot clé VALE_REF de la commande AFFE_VARC est ignorée.

10.2.3 Opérande PRE1

Par défaut elle est prise égale à zéro.
Pour les comportements : LIQU_SATU, LIQU_VAPE pression de liquide de référence.
Pour le comportement : GAZ pression de gaz de référence. Dans ce cas la pression **initiale** de gaz $p = p^{ddl} + p^{ref}$ doit être non nulle.
Pour le comportement : LIQU_GAZ_ATM pression de liquide de référence changée de signe.
Pour les comportements : LIQU_VAPE_GAZ, LIQU_AD_GAZ_VAPE, LIQU_AD_GAZ et LIQU_GAZ pression capillaire de référence.

10.2.4 Opérande PRE2

Par défaut elle est prise égale à zéro. Pour les comportements : LIQU_VAPE_GAZ, LIQU_AD_GAZ_VAPE, LIQU_AD_GAZ et LIQU_GAZ pression de gaz de référence. La pression **initiale** de gaz $p = p^{ddl} + p^{ref}$ doit être non nulle.

10.2.5 Opérande PORO/PRES_VAPE/DEGR_SATU

```
PORO        = poro
```

Porosité initiale Φ_0.

Remarque : pour les modélisation AXIS_JHMS et PLAN_JHMS, cette valeur n'a pas de sens et n'est pas utilisée lors du calcul.

```
PRES_VAPE   = pvap
```

Pour les comportements : LIQU_VAPE_GAZ, LIQU_VAPE, LIQU_AD_GAZ_VAPE et LIQU_GAZ pression de vapeur initiale.

```
DEGR_SATU   = ds
```

Pour tous les comportements non saturés : degré de saturation initial (désormais inutile, donné à titre indicatif).

10.3 Mot clé facteur THM_LIQU

Ce mot clé concerne tous les comportements THM faisant intervenir un liquide (cf. [R7.01.11]).

10.3.1 Syntaxe

```
| THM_LIQU= _F    (
                        ♦     RHO          = rho,            [R]
                        ♦     UN_SUR_K     = usk,            [R
                        ◊     ALPHA        = alp,            [fonction]
                        ◊     CP           = cp,             [R]
                        ♦     VISC         = vi,             [fonction]
                        ♦     D_VISC_TEMP  = dvi,            [fonction]
                              )
```

10.3.2 Opérande RHO

Masse volumique du liquide pour la pression définie sous le mot clé PRE1 du mot clé facteur THM_INIT.

10.3.3 Opérande UN_SUR_K

Inverse de la compressibilité K_l du liquide. Une valeur nulle signifie un liquide incompressible.

10.3.4 Opérande ALPHA

Coefficient de dilatation thermique α_l du liquide.

Si p_l désigne la pression du liquide, ρ_l sa masse volumique et T la température, la relation de comportement du liquide est : $\frac{d\rho_l}{\rho_l}=\frac{dp_l}{K_l}-3\alpha_l dT$.

10.3.5 Opérande CP

Chaleur massique à pression constante du liquide.

10.3.6 Opérandes VISC/D_VISC_TEMP

VISC = vi
Viscosité dynamique du liquide (rappel des unités : [pression] . [temps]). Fonction de la température.

D_VISC_TEMP = dvi

Dérivée de la viscosité du liquide par rapport à la température. Fonction de la température. L'utilisateur doit assurer la cohérence avec la fonction associée à VISC.

10.4 Mot clé facteur THM_GAZ

Ce mot clé facteur concerne tous les comportements THM faisant intervenir un gaz (cf. [R7.01.11]). Pour les comportements faisant intervenir à la fois un liquide et un gaz, et quand on prend en compte l'évaporation du liquide, les coefficients renseignés ici concernent le gaz sec. Les propriétés de la vapeur sont renseignées sous le mot clé THM_VAPE_GAZ.

10.4.1 Syntaxe

```
| THM_GAZ = _F    (
                  ◊    MASS_MOL          = Mgs,              [R]
                  ◊    CP                = cp,               [R]
                  ◊    VISC              = vi,               [fonction]
                  ◊    D_VISC_TEMP       = dvi,              [fonction]
                       )
```

10.4.2 Opérande MASS_MOL

Masse molaire du gaz sec M_{gs}.
Si p_{gs} désigne la pression du gaz sec, ρ_{gs} sa masse volumique, R la constante des gaz parfaits et T la température, le comportement du gaz sec est : $\frac{p_{gs}}{\rho_{gs}}=\frac{RT}{M_{gs}}$.

10.4.3 Opérande CP

Chaleur massique à pression constante du gaz sec.

10.4.4 Opérande VISC

Viscosité du gaz sec. Fonction de la température.

10.4.5 Opérande D_VISC_TEMP

Dérivée par rapport à la température de la viscosité du gaz sec. Fonction de la température.
L'utilisateur doit assurer la cohérence avec la fonction associée à VISC.

10.5 Mot clé facteur THM_VAPE_GAZ

Ce mot clé facteur concerne tous les comportements THM faisant intervenir à la fois un liquide et un gaz, et prenant en compte l'évaporation du liquide (confer [R7.01.11]). Les coefficients renseignés ici concernent la vapeur.

10.5.1 Syntaxe

```
| THM_VAPE_GAZ = _F     (
                        ◊     MASS_MOL     = m    ,              [R]
                        ◊     CP           = cp,               [R]
                        ◊     VISC         = vi,               [fonction]
                        ◊     D_VISC_TEMP  = dvi,              [fonction]
                              )
```

10.5.2 Opérande MASS_MOL

MASS_MOL = m
Masse molaire de la vapeur M_{vp}.

Si est M_{vp} désigne la pression du vapeur, ρ_{vp} sa masse volumique, la constante R des gaz parfaits et T la température, le comportement de la vapeur est : $\frac{p_{vp}}{\rho_{vp}}=\frac{RT}{M_{vp}}$.

10.5.3 Opérande CP

CP = cp

Chaleur massique à pression constante de vapeur.

10.5.4 Opérande VISC

```
VISC                = v
```

Viscosité de la vapeur. Fonction de la température.

10.5.5 Opérande D_VISC_TEMP

```
D_VISC_TEMP = dvi
```

Dérivée par rapport à la température de la viscosité de la vapeur. Fonction de la température.
L'utilisateur doit assurer la cohérence avec la fonction associée à VISC.

10.6 Mot clé facteur THM_AIR_DISS

Ce mot clé facteur concerne le comportement THM THM_AD_GAZ_VAPE prenant en compte la dissolution de l'air dans le liquide (cf. [R7.01.11]). Les coefficients renseignés ici concernent l'air dissous.

10.6.1 Syntaxe

```
| THM_AD_GAZ_VAPE = _F (
                                ♦     CP          = cp,        [R]
                                ♦     COEF_HENRY  = h,         [fonction]
                                )
```

10.6.2 Opérande CP

```
CP                          = cp
```

Chaleur massique à pression constante de l'air dissous.

10.6.3 Opérande COEF_HENRY

```
COEF_HENRY  = h
```

Constante de Henry K_H, fonction de la température, permettant de relier la concentration molaire d'air dissous C_{ad}^{ol} ($moles/m^3$) à la pression d'air sec :

$$C_{ad}^{ol} = \frac{p_{as}}{K_H}$$

10.7 Mot clé facteur THM_DIFFU

Obligatoire pour tous les comportements THM (cf. [R7.01.11]). L'utilisateur doit s'assurer de la cohérence des fonctions et de leur dérivée.

10.7.1 Syntaxe

```
| THM_DIFFU = _F (
                          ♦     R_GAZ            = rgaz,          [R]
                          ♦     RHO              = rho,           [R]
                          ◊     CP               = cp,            [R]
                          ◊     BIOT_COEF        = bio,           [R]
                          ◊     BIOT_L           = biol,          [R]
                          ◊     BIOT_N           = bion,          [R]
                          ◊     BIOT_T           = biot,          [R]
                          ♦     PESA_X           = px,            [R]
                          ♦     PESA_Y           = py,            [R]
```

```
 ♦     PESA_Z            = pz,              [R]
 ◊     PESA_MULT         = fpesa,     [fonction]
 ◊     PERM_IN           = perm,      [fonction]
◊      PERMIN_L          = perml,     [fonction]
◊      PERMIN_T          = permn,     [fonction]
◊      PERMIN_N          = permt,     [fonction]
◊      SATU_PRES         = sp,        [fonction]
◊      D_SATU_PRES       = dsp,       [fonction]
◊      PERM_LIQU         = perml,     [fonction]
◊      D_PERM_LIQU_SATU  = dperm,     [fonction]
◊      PERM_GAZ          = permg,     [fonction]
◊      D_PERM_SATU_GAZ   = dpsg,      [fonction]
◊      D_PERM_PRES_GAZ   = dppg,      [fonction]
◊      VG_N              = vgn,             [R]
◊      VG_PR             = pr,              [R]
◊      VG_SR             = sr,              [R]
◊      VG_SMAX           = smax,            [R]
◊      VG_SATUR          = stur,            [R]
◊      FICKV_T           = fvt,       [fonction]
◊      FICKV_PV          = /fvpv,     [fonction]
                           /1,        [DEFAUT]
◊      FICKV_PG          = /fvpg,     [fonction]
                           /1,        [DEFAUT]
◊      FICKV_S           = /fvs,      [fonction]
                           /1,        [DEFAUT]
◊      D_FV_T            = /dfvt,     [fonction]
                           /0,        [DEFAUT]
◊      D_FV_PG     =      /dfvgp,      [fonction]
                          /0,         [DEFAUT]
◊      FICKA_T           = fat,       [fonction]
◊      FICKA_PA          = /fapv,     [fonction]
                           /1,        [DEFAUT]
◊      FICKA_PL          = /fapg,     [fonction]
                          /1,         [DEFAUT]
◊      FICKA_S           = /fas,      [fonction]
                           /1,        [DEFAUT]
◊      D_FA_T            = /dfat,     [fonction]
                           /0,        [DEFAUT]
◊      LAMB_T            = /lambt,    [fonction]
◊      LAMB_TL           = /lambtl,   [fonction]
◊      LAMB_TN           = /lambtn,   [fonction]
◊      LAMB_TT           = /lambtt,   [fonction]
                           /0         [DEFAUT]
◊      LAMB_S            = /lambs,    [fonction]
                           /1,        [DEFAUT]
◊      LAMB_PHI          = /lambp,    [fonction]
                           /1,        [DEFAUT]
◊      LAMB_CT           = /lambct,   [fonction
◊      LAMB_C_T          = /lambctt,  [fonction]
◊      LAMB_C_L          = /lambctl,  [fonction]
◊      LAMB_C_N          = /lambctn,  [fonction]
                           /0,        [DEFAUT]
◊      D_LB_S            = /dlambs,   [fonction]
                           /0,        [DEFAUT]
◊      D_LB_T            = /dlambt,   [fonction]
◊      D_LB_TT           = /dlambtt,  [fonction]
◊      D_LB_TL           = /dlambtl,  [fonction]
◊      D_LB_TN           = /dlambtn,  [fonction]
                           /0,        [DEFAUT]
◊      D_LB_PHI          = /dlambp,   [fonction]
```

```
                                        /0,        [DEFAUT]
                ◊      EMMAG              = em,      [R]
                ◊      PERM_END           = perment  [fonction]


          ◊  EPAI                 = epais,       [fonction]
          ◊  A0                   = surf,        [R]
          ◊  SHUTTLE           = sh,             [R]
          ◊  S_BJH          = sb,           [fonction]
          ◊  W_BJH          = wb,           [fonction]
                        )
```

10.7.2 Opérandes R_GAZ/RHO/CP/BIOT_COEF

R_GAZ = rgaz
Constante des gaz parfaits.

RHO = rho
Pour les comportements hydromécaniques, masse volumique homogénéisée. Dans les cas statiques, il est inutile de renseigner la masse volumique dans le comportement élastique (cf. section 4.1.3).

CP = cp
Pour les comportements thermiques chaleur massique à contrainte constante du solide seul.

BIOT_COEF = bio
Coefficient de Biot. Doit être inférieur ou égal à 1.

10.7.3 Opérandes BIOT_L/BIOT_T/BIOT_N

Remplace BIOT_COEF dans le cas anisotrope. Dans le cas de l'isotropie transverse (3D), BIOT_L et BIOT_N sont respectivement les coefficients de Biot dans les directions L et N (perpendiculaire au plan d'isotropie). Dans le cas orthotrope en 2D, on définira les coefficients de Biot dans les trois directions L,T,N : BIOT_L, BIOT_T et BIOT_N.

Remarque : si on choisit cette version anisotrope des coefficients de Biot, il faut veiller à choisir de même la version anisotrope de l'élasticité. Sinon vous aurez un message d'erreur.

10.7.4 Opérandes SATU_PRES/D_SATU_PRES

Pour les comportements de matériaux non saturés (LIQU_VAPE_GAZ, LIQU_VAPE, LIQU_AD_GAZ, LIQU_AD_GAZ_VAPE, LIQU_GAZ, LIQU_GAZ_ATM).
SATU_PRES = sp
Isotherme de saturation fonction de la pression capillaire.

D_SATU_PRES= dsp
Dérivée de la saturation par rapport à la pression.

10.7.5 Opérandes PESA_X/PESA_Y/PESA_Z/PESA_MULT

PESA_X = px,PESA_y = py,PESA_z = pz,
Pesanteur selon x, y ou z, utilisé uniquement si la modélisation choisie dans AFFE_MODELE inclut 1 ou 2 variable de pression.
PESA_MULT = fpesa
Fonction temporelle en facteur des composantes de pesanteur PESA_X, PESA_Y et PESA_Z. Facultative, elle est par défaut constante et égale à 1.

10.7.6 Opérande PERM_IN

Perméabilité intrinsèque K_{int}, dont la dimension est celle d'une surface : fonction de la porosité φ (dans le cas isotrope). Dans les études, l'utilisateur peut s'exprimer la dépendance de la perméabilité intrinsèque à φ par la loi cubique usuelle suivante, à laide d'une fonction préalablement définie :

$$\frac{K_{\text{int}}(\varphi)}{K_{\text{int}_0}} = \begin{array}{c} si \quad \varphi-\varphi_0<0 \ : \ 1 \\ si \quad 0<\varphi-\varphi_0<10^{-2}: \ 1+\chi(\varphi-\varphi_0)^3 \\ si \quad 10^{-2}<\varphi-\varphi_0 \ : \ 1+\chi*10^{-6} \end{array}$$

D'autres lois sont bien sûr possibles.

La perméabilité au sens usuel K , dont la dimension est celle d'une vitesse, se calcule de la façon suivante :

$K=\frac{K_{\text{int}}K_{rel}}{\mu}\rho_l g$ où K_{int} est la perméabilité intrinsèque, K_{rel} la perméabilité relative au liquide (dans dimension), μ la viscosité dynamique du liquide, ρ_l la masse volumique du liquide et g l'accélération de la pesanteur. K_{int} est en fait un tenseur diagonal, dans le cas isotrope ses trois composantes sont égales à la valeur renseignée.

10.7.7 Opérandes PERMIN_L/PERMIN_T/PERMIN_N

Pour la définition des plans d'isotropie on se référera à Error: Reference source not found et Error: Reference source not found. Dans le cas de l'isotropie transverse (3D), PERMIN_L et PERMIN_T sont respectivement les perméabilités intrinsèques dans les directions L et N (perpendiculaire au plan d'isotropie). Dans le cas orthotrope en 2D, on définira les perméabilités dans les plans L et T : PERMIN_L et PERMIN_T.

10.7.8 Opérandes PERM_LIQU/D_PERM_LIQU_SATU

Pour les comportements de matériaux non saturés (LIQU_VAPE_GAZ, LIQU_VAPE, LIQU_AD_GAZ, LIQU_AD_GAZ_VAPE, LIQU_GAZ, LIQU_GAZ_ATM).
Perméabilité relative au liquide (sans dimension) : fonction de la saturation et sa dérivée par rapport à la saturation .

10.7.9 Opérandes PERM_GAZ/D_PERM_SATU_GAZ/D_PERM_PRES_GAZ

Pour les comportements de matériaux non saturés (LIQU_VAPE_GAZ, LIQU_VAPE, LIQU_AD_GAZ, LIQU_AD_GAZ_VAPE, LIQU_GAZ).
Perméabilité relative au gaz (sans dimension) : fonction de la saturation et de la pression de gaz et ses dérivées par rapport à la saturation et à la pression de gaz.

10.7.10 Opérandes VG_N/VG_PR/VG_SR

Pour les comportements de matériaux non saturés liquide gaz à deux constituants et deux inconnues (LIQU_VAPE_GAZ, LIQU_AD_GAZ, LIQU_AD_GAZ_VAPE, LIQU_GAZ,) et dans le cas où la loi hydraulique est HYDR_VGM ou HYDR_VGC (voir doc. U4.51.11), désignent respectivement les paramètres N, Pr, et Sr de la loi de Mualem Van-Genuchten servant à définir la pression capillaire et les perméabilités relatives à l'eau et au gaz.

10.7.11 Opérandes VG_SMAX/VG_SATUR

Pour les comportements de matériaux non saturés liquide gaz à deux constituants et deux inconnues (LIQU_VAPE_GAZ, LIQU_AD_GAZ, LIQU_AD_GAZ_VAPE, LIQU_GAZ,) et dans le cas où la loi hydraulique est HYDR_VGM ou HYDR_VGC (voir document [U4.51.11]).

VG_SMAX = smax
désigne la saturation maximum pour laquelle on applique la loi de Mualem Van-Genuchten. Au-delà de cette saturation les courbes de Mualem-Van Genuchten sont interpolées (voir document [R7.01.11]). Cette valeur doit être très proche de 1.

VG_SATUR = stur

Au delà de la saturation définie par VG_SMAX, la saturation est multipliée par ce facteur correctif. Cette valeur doit être très proche de 1 (voir document [R7.01.11]).

10.7.12Opérandes FICKV_T/FICKV_S/FICKV_PG/FICKV_PV

Pour les comportements LIQU_VAPE_GAZ et LIQU_AD_GAZ_VAPE, coefficient de Fick fonction de la température pour la diffusion de la vapeur dans le mélange gazeux. Le coefficient de Fick pouvant être fonction de la saturation , la température, la pression de gaz et la pression de vapeur, on le définit comme un produit de 4 fonctions : FICKV_T, FICKV_S, FICKV_PG, FICKV_VP. Dans le cas de LIQU_VAPE_GAZ et LIQU_AD_GAZ_VAPE, seul FICKV_T est obligatoire.

10.7.13Opérandes D_FV_T/D_FV_PG

Pour les comportements LIQU_VAPE_GAZ et LIQU_AD_GAZ_VAPE.
Dérivée du coefficient FICKV_T par rapport à la température.
Dérivée du coefficient FICKV_PG par rapport à la pression de gaz.

10.7.14Opérandes FICKA_T/FICKA_S/FICKA_PA/FICKA_P

Pour le comportement LIQU_AD_GAZ_VAPE, coefficient de Fick fonction de la température pour la diffusion de l'air dissous dans le mélange liquide. Le coefficient de Fick pouvant être fonction de la saturation , la température, la pression d'air dissous et la pression de liquide, on le définit comme un produit de 4 fonctions : FICKA_T, FICKA_S, FICKV_PA, FICKV_PL. Dans le cas de LIQU_AD_GAZ_VAPE, seul FICKA_T est obligatoire.

10.7.15Opérande D_FA_T

Pour le comportement LIQU_AD_GAZ_VAPE, dérivée du coefficient FICKA_T par rapport à la température.

10.7.16Opérandes LAMB_T/LAMB_S/LAMB_PHI/LAMB_CT

LAMB_T = lambt
Partie multiplicative de la conductivité thermique du mélange dépendant de la température (cf. [R7.01.11]). Cet opérande est obligatoire dans le cas de modélisation avec thermique.

LAMB_S = lambs , LAMB_PHI = lambp
Partie multiplicative (égale à 1 par défaut) de la conductivité thermique du mélange dépendant respectivement de la saturation, de la porosité.

LAMB_CT = lambct
Partie de la conductivité thermique du mélange constante et additive (confer [R7.01.11]). Cette constante est égale à zéro par défaut.

10.7.17Opérandes LAMB_TL/ LAMB_TN/LAMB_TT

Remplace LAMB_T dans le cas anisotrope. Dans le cas de l'isotropie transverse (3D), LAMB_TL et LAMB_TT sont respectivement les conductivités dans les directions L et N (perpendiculaire au plan d'isotropie). Dans le cas orthotrope en 2D, on définira les conductivités dans les plans L et T : LAMB_TL et LAMB_TN.

10.7.18Opérandes LAMB_C_L/ LAMB_C_N/LAMB_C_T

Remplace LAMB_CT dans le cas anisotrope. Dans le cas de l'isotropie transverse (3D), LAMB_C_L et LAMB_C_T sont respectivement les conductivités dans les directions L et N (perpendiculaire au plan d'isotropie). Dans le cas orthotrope en 2D, on définira les conductivités dans les plans L et T : LAMB_C_L et LAMB_C_N.

10.7.19 Opérandes D_LB_T/D_LB_S/D_LB_PHI

D_LB_T = dlambt
Dérivée de la partie de la conductivité thermique du mélange dépendant de la température par rapport à la température.

D_LB_S = dlambs, D_LB_PHI = dlambp
Dérivée de la partie de la conductivité thermique du mélange dépendant respectivement de la saturation, de la porosité.

10.7.20 Opérandes D_LB_TL/D_LB_TN/D_LB_TT

Dans le cas anisotrope, dérivées par rapport à la température de respectivement LAMB_TL, LAMB_TN et LAMB_TT.

10.7.21 Opérande EMMAG

Coefficient d'emmagasinement. Ce coefficient n'est pris en compte que dans les cas des modélisations sans mécanique. Il relie la variation de porosité à la variation de pression de liquide.

10.7.22 Opérande PERM_END

Perméabilité fonction de l'endommagement, utilisé par les comportements mécaniques avec endommagement.

10.7.1 Opérandes EPAI/A0/SHUTTLE/S_BJH/W_BJH

Pour les comportements de matériaux non saturés liquide gaz à deux constituants et deux inconnues (LIQU_VAPE_GAZ, LIQU_AD_GAZ, LIQU_AD_GAZ_VAPE, LIQU_GAZ,LIQU_GAZ_ ATM) et dans le cas où la loi hydraulique est HYDR_ TABBAL (voir doc. U 2 . 04 . 05). Ces paramètres sont ceux du modèle poromécanique pour fort séchage définis dans la thèse de G. El Tabbal . Ils servent à définir respectivement l'épaisseur de la couche adsorbée EPAI, la surface spécifique A0 du matériau, le paramètre de Shuttleworth SHUTTLE et les fonctions sorties du calcul BJH: S_BJH et W_BJH .

10.8 Mot clé MOHR_COULOMB

Le modèle de Mohr-Coulomb est un modèle élasto-plastique utilisé en mécanique des sols et est spécialement adapté aux matériaux sableux. Le document [**R7.01.28**] décrit les équations correspondantes. Ce modèle peut être utilisé indépendamment des comportements THM. Les caractéristiques élastiques doivent être définies sous le mot clé ELAS.

10.8.1 Syntaxe

```
| MOHR_COULOMB = _F   (
                        ♦     PHI          =     phi,              [R]
                        ♦     ANGDIL       =     angdil,           [R]
                        ♦     COHESION     =     cohes,            [R]
                              )
```

10.8.2 Opérandes PHI/ANGDIL/COHESION

PHI = phi
Angle de frottement (en degrés). La valeur doit être comprise entre 0 et 60 degrés.
ANGDIL = angdil
Angle de dilatance (en degrés). La valeur doit être comprise entre 0 et 60 degrés.
COHESION = cohes
Cohésion du matériau (en Pascal – si unité SI).

10.9 Mot clé CAM_CLAY

Le modèle de Cam-Clay est un modèle élastoplastique utilisé en mécanique des sols et est spécialement adapté aux matériaux argileux. Le modèle présenté ici est appelé Cam-Clay modifié. Le

document [R7.01.14] décrit les équations correspondantes. Ce modèle peut être utilisé indépendamment des comportements THM. Les caractéristiques élastiques doivent être définies sous le mot clé ELAS.

10.9.1 Syntaxe

```
| CAM_CLAY = _F (
                ♦   MU          =   mu,          [R]
                ♦   LAMBDA      =   lambda,      [R]
                ♦   KAPA        =   kapa,        [R]
                ♦   M           =   m,           [R]
                ♦   PORO        =   poro,        [R]
                ♦   PRES_CRIT   =   prescr,      [R]
                ◊   KCAM        =   kcam,        [R]
                ◊   PTRAC       =   ptrac,       [R]
                )
```

10.9.2 Opérandes MU/LAMBDA/KAPA

MU = mu
Module élastique de cisaillement.
LAMBDA = lambda
Coefficient de compressibilité (pente plastique dans un essai de compression hydrostatique).
KAPA = kapa
Coefficient élastique de gonflement (pente élastique dans un essai de compression hydrostatique).

10.9.3 Opérande M

Pente de la droite d'état critique.

10.9.4 Opérande PORO

Porosité initiale. Si CAM_CLAY est utilisée sous RELATION_KIT, le mot clé PORO renseigné sous CAM_CLAY et sous THM_INIT doit être le même.

10.9.5 Opérandes PRES_CRIT/KCAM

PRES_CRIT = prescr
La pression critique égale à la moitié de la pression de consolidation.
KCAM = kcam
Pression initiale correspondante à la porosité initiale généralement égale à la pression atmosphérique. Ce paramètre doit être positif ($kcam > 0.$).

10.9.6 Opérande PTRAC

Quantité de la contrainte hydrostatique de traction tolérée ou décalage de l'ellipse vers la gauche sur l'axe des contraintes hydrostatiques. Ce paramètre doit être négatif (ptrac < 0.).

10.10 Mot clé facteur CJS

La loi (Cambou, Jaffani, Sidoroff) est une loi de comportement pour les sols. Elle comporte trois mécanismes, l'un correspond à de l'élasticité non linéaire, un autre correspond à une plastification pour des états de contraintes isotropes, et le troisième mécanisme correspond à une plastification liée à un état de contrainte déviatoire. Le document [R7.01.13] décrit avec précision les équations correspondantes.
Les caractéristiques élastiques doivent être définies sous le mot clé ELAS.

La loi CJS recouvre trois formes possibles (CJS1, CJS2 et CJS3), selon que l'on autorise ou non l'activation des mécanismes non linéaires.
Le tableau ci dessous donne les mécanismes activés pour les trois niveaux CJS1, CJS2 et CJS3 :

	Mécanisme élastique	Mécanisme plastique isotrope	Mécanisme plastique déviatoire
CJS1	linéaire	non activé	activé, plasticité parfaite
CJS2	non linéaire	activé	activé, écrouissage isotrope
CJS3	non linéaire	activé	activé, écrouissage cinématique

Remarque :
En adoptant la correspondance des paramètres pour les états limites, il est possible d'utiliser le comportement CJS1 pour modéliser une loi de Mohr Coulomb en mécanique des sols.

10.10.1Syntaxe

```
|     CJS = _F     (
                        ♦     BETA_CJS     = beta,                [R]
                        ♦     RM           = rm,                  [R]
                        ◊     N_CJS        = n    ,               [R]
                        ◊     KP           = kp,                  [R]
                        ◊     RC           = rc,                  [R]
                        ◊     A_CJS        = a    ,               [R]
                        ◊     B_CJS        = b    ,               [R]
                        ◊     C_CJS        = c    ,               [R]
                        ♦     GAMMA_CJS    = g    ,               [R]
                        ◊     MU_CJS       = mu,                  [R]
                        ◊     PCO          = pco,                 [R]
                        ♦     PA           = pa,                  [R]
                        ◊     Q_INIT       = q    ,               [R]
                        ◊     R_INIT       = r                    [R]
                        )
```

Les différents coefficients sont à renseigner ou non selon le niveau que l'on veut utiliser, conformément au tableau ci dessous (F pour facultatif , O pour obligatoire et rien pour sans objet).

Symbole	Q_{init}	R_{init}	n	K^p	γ	β	R_c	A
Mot clé	Q_INIT	R_INIT	N_CJS	KP	PCO = pcoGAMMA_CJS	BETA_CJS	RC	A_CJS
CJS1	F				O	O		
CJS2	F	F	O	O	O	O	O	O
CJS3	F		O	O	O	O	O	

Symbole	b	R_m	μ	p_{co}	c	P_a
Mot clé	B_CJS	RM	M_CJS	PCO	C_CJS	PA
CJS1		O				O
CJS2		O				O
CJS3	O	O	O	O	O	O

Nous attirons l'attention de l'utilisateur sur le fait que, pour un même matériau, le même coefficient peut prendre des valeurs différentes selon le niveau utilisé. Le niveau utilisé n'est jamais renseigné, il est indiqué par le fait que certains coefficients sont renseignés ou non.

Par ailleurs, le mot clé ELAS doit être obligatoirement renseigné quand on utilise la loi CJS (sous un de ses trois niveaux). La définition du module d'Young et du coefficient de Poisson permettent de calculer les coefficients K_o^e et G_o.

10.10.2 Opérandes BETA_CJS/RM

Pour niveaux CJS1, CJS2 CJS3.
BETA_CJS = beta
Paramètre β. Contrôle la variation de volume plastique dans le mécanisme déviatoire.
RM = rm
Valeur maximale d'ouverture du domaine de réversibilité déviatoire.

10.10.3 Opérandes N_CJS/KP/RC

Pour niveaux CJS2 et CJS3.
N_CJS = n
Contrôle la dépendance des module d'élasticité avec la contrainte moyenne :

$$K = K_o^e \left(\frac{I_1 + Q_{init}}{3P_a} \right)^n \quad G = G_o \left(\frac{I_1 + Q_{init}}{3P_a} \right)^n$$

KP = kp
Module de compressibilité plastique :

$$\dot{Q}_{iso} = K^p \dot{q} = K_o^p \left(\frac{Q_{iso}}{P_a} \right)^n \dot{q}$$

RC = rc
Valeur critique de la variable R :

$$\dot{e}_v^{dp} = -\beta \left(\frac{s_{II}}{s_{II}^c} - 1 \right) \frac{\left| s_{ij} \dot{e}_{ij}^{dp} \right|}{s_{II}} \quad s_{II}^c = -\frac{R_c I_1}{h(\theta_s)}$$

10.10.4 Opérandes A_CJS/R_INIT

Pour niveaux CJS2.
A_CJS = a
Contrôle l'écrouissage isotrope du mécanisme déviatoire ;

$$R = \frac{AR_m r}{R_m + Ar}$$

R_INIT = r
Valeur initiale de la variable R. Au premier temps de calcul, si la valeur initiale de R est nulle, soit qu'on ait pas défini d'état initial des variables internes par le mot clé ETAT_INIT de STAT_NON_LINE, soit que cet état initial soit nul, on prendra comme valeur initiale celle définie par le mot clé R_INIT de DEFI_MATERIAU.

10.10.5 Opérandes B_CJS/C_CJS/PCO/MU_CJS

Pour niveaux CJS3.
B_CJS = b
Contrôle l'écrouissage cinématique du mécanisme déviatoire :

$$\dot{X}_{ij} = -\frac{1}{b} \dot{\lambda}^d \left[dev \left(\frac{\partial f^d}{\partial X_{ij}} \right) - I_1 f X_{ij} \right] \left(\frac{I_1}{3 P_a} \right)^{-1.5}$$

C_CJS = c

Contrôle l'évolution de la pression critique : $p_c = p_{co} exp\left(-c\,\varepsilon_v\right)$.

PCO = pco

Pression critique initiale : $p_c = p_{co} exp\left(-c\,\varepsilon_v\right)$.

MU_CJS = mu

Contrôle la valeur de rupture de la variable R : $R_r = R_c + m \ln\left(\frac{3\,p_c}{I_1}\right)$.

10.10.6 Opérandes GAMMA_CJS/PA/Q_INIT

Pour niveaux CJS1, CJS2 et CJS3.

GAMMA_CJS = g

Contrôle la forme du critère : $h\left(\theta_s\right) = \left(1 + \gamma \cos\left(3\,\theta_s\right)\right)^{1/6} = \left(1 + \gamma \sqrt{54}\,\frac{det\left(\underline{\underline{s}}\right)}{s_{II}^3}\right)^{1/6}$

PA = pa

Pression atmosphérique. Doit être donnée négative.

Q_INIT = q

Paramètre numérique permettant de rendre admissible un état de contrainte nul. Peut également être utilisé pour définir une cohésion, au moins pour le niveau CJS1. On utilisera la formule : $Q_{init} = -3\,c\,cotan\left(\phi\right)$

10.11 Mot clé facteur LAIGLE

La loi de LAIGLE [R7.01.15] est un modèle de comportement rhéologique pour la modélisation des roches. Celles-ci sont caractérisées par les trois paramètres suivants :

- a qui définit l'influence de la composante de dilatance dans le comportement aux grandes déformations. Ce paramètre dépend du niveau d'altération de la roche,
- s qui définit la cohésion du milieu. Il est donc représentatif de l'endommagement de la roche,
- m est fonction de la nature minéralogique de la roche, et est associé à un retour d'expérience important.

Les caractéristiques élastiques doivent être définies sous le mot clé ELAS.

10.11.1 Syntaxe

```
| LAIGLE   =_F   (
                        ♦   GAMMA_ULT   =   gamma_ult,        [R]
                        ♦   GAMMA_E     =   gamma_e,          [R]
                        ♦   M_ULT       =   m_ult,            [R]
                        ♦   M_E         =   m_e   ,           [R]
                        ♦   A_E         =   a_e   ,           [R]
                        ♦   M_PIC       =   m_pic,            [R]
                        ♦   A_PIC       =   a_pic,            [R]
                        ♦   ETA         =   eta   ,           [R]
                        ♦   SIGMA_C     =   sigma_c,          [R]
                        ♦   GAMMA       =   gamma,            [R]
                        ♦   KSI         =   ksi   ,           [R]
                        ♦   GAMMA_CJS   =   gamma_cjs,        [R]
                        ♦   SIGMA_P1    =   sigma_p1,         [R]
                        ♦   PA          =   pa                [R]
                        )
```

10.11.2 Opérandes GAMMA_ULT/GAMMA_E

GAMMA_ULT = gamma_ult

Paramètre γ_{ult} : Déformation déviatoire plastique correspondant au palier.

GAMMA_E = gamma_e

Paramètre γ_e : Déformation déviatoire plastique correspondant à la disparition complète de la cohésion.

10.11.3 Opérande M_ULT/M_E/A_E/M_PIC

M_ULT = m_ult

Paramètre m_{ult} : Valeur de m du critère ultime atteinte γ_{ult}.

M_E = m_e

Paramètre m_e : Valeur de m du critère intermédiaire atteinte en γ_e.

A_E = a_e

Paramètre a_e : Valeur de a du critère intermédiaire atteinte en γ_e.

M_PIC = m_pic

Paramètre m_{pic} : Valeur de m du critère de pic atteinte au pic de contrainte.

10.11.4 Opérandes A_PIC/ETA/SIGMA_C

A_PIC = a_pic

Paramètre a_{pic} : Valeur de l'exposant a au pic de contrainte.

ETA = eta

Paramètre η : Exposant régulant l'écrouissage.

SIGMA_C = sigma_c

Paramètre s_c : Résistance en compression simple.

10.11.5 Opérandes GAMMA/KSI

GAMMA = gamma, KSI = ksi

Paramètres γ et ξ : Paramètres réglant la dilatance.

Une condition à respecter est que le rapport γ/ξ reste inférieur à 1. Dans le cas des roches dures très résistantes, soumises à des contraintes de confinement relativement faibles, la variation de la dilatance $\sin\psi$ (en fonction de l'état des contraintes - voir [R7.01.15]) peut tendre vers γ/ξ, ce qui justifie cette condition.

10.11.6 Opérande GAMMA_CJS

Paramètre γ_{cjs} : paramètre de forme de la surface de charge dans le plan déviatoire.

10.11.7 Opérande SIGMA_P1

Paramètre σ_{pl} : intersection du critère intermédiaire et du critère de pic.

10.11.8 Opérande PA

Pression atmosphérique. Doit être donnée positive.

Remarque :

Les paramètres M_E , A_E , A_PIC , SIGMA_P1 , SIGMA_C et MPIC sont dépendants les uns des autres par la relation : $m_e = \frac{\sigma_c}{\sigma_{pl}} \left(m_{pic} \frac{\sigma_{pl}}{\sigma_c} + 1 \right)^{\frac{a_{pic}}{a_e}}$. *Cette dépendance est vérifiée au sein du code.*

10.12 Mot clé facteur LETK

Le modèle rhéologique L&K (Laigle et Kleine) est une loi de comportement élasto visco-plastique appelée LETK dans Code_Aster [R7.01.24]. Elle s'appuie sur des concepts de l'élastoplasticité et de la viscoplasticité. L'élastoplasticité se caractérise par un écrouissage positif en pré pic et un écrouissage négatif en post pic.
On retrouve parmi les paramètres :

- des paramètres qui interviennent dans les fonctions d'écrouissage relatifs aux différents seuils élastoplastiques ou visqueux, comme a , s et m ,
- des paramètres liés au critères visqueux,
- des paramètres liés à la dilatance,
- des paramètres liés à la résistance du matériau en compression et en traction.

Les caractéristiques élastiques doivent être définies sous le mot clé ELAS.

10.12.1 Syntaxe

```
                |    LETK  =     _F    (
                                          ♦      PA              =     pa,
                     [R]
                                          ♦      NELAS           =
nelas,                    [R]
                                          ♦      SIGMA_C    =    sigc,
               [R]
                                          ♦      H0_EXT          =     h0,
                     [R]
                                          ♦      GAMMA_CJS  =    gcjs,
               [R]
                                          ♦      XAMS            =
xams,                     [R]
                                          ♦      ETA             =     eta,
                     [R]
                                          ♦      A_0             =     a0,
                     [R]
                                          ♦      A_E             =     ae,
                     [R]
                                          ♦      A_PIC           =     ap,
                     [R]
                                          ♦      S_0             =     s0,
                     [R]
                                          ♦      S_E             =     se,
                     [R]
                                          ♦      M_0             =     m0,
                     [R]
                                          ♦      M_E             =     me,
                     [R]
                                          ♦      M_PIC           =     mp,
                     [R]
                                          ♦      M_ULT           =
mult,                     [R]
                                          ♦      XI_ULT          =
xiult,                    [R]
                                          ♦      XI_E            =     xie,
                     [R]
```

```
                                                    ♦       XI_PIC          =       xip,
                        [R]
                                                    ♦       MV_MAX          =
      mvmx,                     [R]
                                                    ♦       XIV_MAX         =
      xivmx,                    [R]
                                                    ♦       A                       =
      A,                              [R]
                                                    ♦       N                       =
      n,                              [R]
                                                    ♦       SIGMA_P1    =       sp1,
                  [R]
                                                    ♦       MU0_V           =
      mu0v,                     [R]
                                                    ♦       XI0_V           =
      xi0v,                     [R]
                                                    ♦       MU1             =       mu1,
                        [R]
                                                    ♦       XI1             =       xi1
                        [R]
                                                    )
```

10.12.2 Opérandes PA/ NELAS/SIGMA_C/H0_EXT

PA = pa S_0 = s0

Paramètre Pa : pression atmosphérique.

NELAS = nelas

Paramètre n_{elas} : exposant de la loi de variation des modules élastiques K et G.

SIGMA_C = sigc

Paramètre σ_c : résistance en compression simple (l'unité d'une contrainte)..

H0_EXT = h0

Paramètre H_{0ext} : paramètre pilotant la résistance à la traction

10.12.3 Opérande GAMMA_CJS/XAMS

GAMMA_CJS = gcjs

Paramètre γ_{cjs} : paramètre de forme du critère dans le plan déviatoire (entre 0 et 1).

XAMS = xams

Paramètre χ_{ams} : paramètre non nul intervenant dans les lois d'écrouissage pré-pic.

10.12.4 Opérande ETA/A_0/A_E/A_PIC

ETA = eta

Paramètre h : paramètre non nul intervenant dans les lois d'écrouissage post-pic.

A_0 = a0

Paramètre a_0 : valeur de a sur le seuil d'endommagement.

A_E = ae

Paramètre a_e : valeur de a sur le seuil intermédiaire.

A_PIC = ap

Paramètre a_{pic} : valeur de a sur le seuil de pic.

10.12.5Opérandes S_0/S_E/M_0/M_E/M_PIC/M_ULT

S_0 = s0
Paramètre s_0 : valeur de s sur le seuil d'endommagement.
S_E = se
Paramètre s_e : valeur de s sur le seuil intermédiaire.
M_0 = m0
Paramètre m_0 : valeur de m sur le seuil d'endommagement.

M_E = me
Paramètre m_e : valeur de m sur le seuil intermédiaire.
M_PIC = mp
Paramètre m_{pic} : valeur de m sur le seuil de pic.
M_ULT = mult
Paramètre m_{ult} : valeur de m sur le seuil résiduel.

10.12.6Opérandes XI_E/XI_PIC/MV_MAX/XIV_MAX

XI_E = xie
Paramètre ξ_e : niveau d'écrouissage sur le seuil intermédiaire.
XI_PIC = xip
Paramètre ξ_{pic} : niveau d'écrouissage sur le seuil de pic.
MV_MAX = mvmx
Paramètre m_{v-max} : valeur de m sur le seuil de viscoplasticité.
XIV_MAX = xivmx
Paramètre ξ_{v-max} : niveau d'écrouissage pour atteindre le seuil viscoplastique maximal.

10.12.7Opérandes A/N

A = A
Paramètre A : paramètre caractérisant l'amplitude de la vitesse de fluage (en s^{-1} ou $jour^{-1}$).
N = n
Paramètre n : exposant intervenant dans la formule pilotant la cinétique de fluage.

10.12.8Opérande SIGMA_P1

SIGMA_P1 = sp1
Paramètre σ_{P1} : correspond à l'abscisse du point d'intersection de la limite de clivage et du seuil de pic.

10.12.9Opérandes MU0_V et XI0_V

MU0_V = mu0v, XI0_V = xi0v
Paramètres μ_{0v} et ξ_{0v} : paramètres réglant la dilatance des mécanismes pré-pic et viscoplastiques
Les conditions à respecter sur ces paramètres sont :

$\mu_{0v} < \xi_{0v}$ ou $\begin{cases} \mu_{0v} > \xi_{0v} \\ \dfrac{s_{pic}^{a_{pic}}}{s_0^{a_0}} \leq \dfrac{1+\mu_{0v}}{\mu_{0v}-\xi_{0v}} \end{cases}$ avec $s^{pic} = 1$

10.12.10Opérandes MU1 et XI1

MU1 =mu1, XI1 = xi1

Paramètres μ_I et ξ_I : paramètres réglant la dilatance des mécanismes post-pic. Une condition à respecter est que le rapport μ_I/ξ_I reste inférieur ou égal à 1.

10.13 Mot clé facteur DRUCK_PRAGER

Le critère de DRUCK_PRAGER [R7.01.16] est un modèle de comportement pour la mécanique des sols, elle est définie par la relation :

$$\sigma_{eq}+\alpha I_1-R(p)\leq 0$$

où :

σ_{eq} est une fonction du déviateur des contraintes effectives σ',

$I_1=Tr(\sigma')$ est la trace des contraintes effectives,

α est un coefficient de dépendance en pression,

$R(p)$ est une fonction de la déformation plastique cumulée.

Dans le cas linéaire, la fonction R est donnée par : $\begin{array}{ll} 0<p<p_{ult} & R(p)=hp+\sigma_y \\ p\geq p_{ult} & R(p)=h\,p_{ult}+\sigma_y \end{array}$.

Dans le cas parabolique, $R(p)=\sigma_y f(p)$ où la fonction $f(p)$ est donnée par :

$$0<p<p_{ult} \quad f(p)=\left(1-\left(1-\sqrt{\frac{\sigma_{y\,ult}}{\sigma_y}}\right)\frac{p}{p_{ult}}\right)^2$$

$$p\geq p_{ult} \quad f(p)=\frac{\sigma_{y\,ult}}{\sigma_y}$$

Syntaxe

```
|     DRUCK_PRAGER      = _F (
                                ♦ ECROUISSAGE    =/'LINEAIRE'      ,
                      [TXM]
                                                                    /'P
ARABOLIQUE',             [TXM]
                                ♦ ALPHA                 =     alpha,
                           [R]
                                ♦ P_ULTM          =     p_ult,
                      [R]
                                ♦ SY                    =     sy,
                           [R]
                                ◊ H                     =     h,
                                 [R]
                                ◊ SY_ULTM         =     sy_ult,
                      [R]
                                ◊ DILAT                 =     ang,
                           [R]
                                 )
```

10.13.1 Opérande ECROUISSAGE

ECROUISSAGE =/'LINEAIRE',/'PARABOLIQUE'

Permet de définir le type d'écrouissage souhaité.

10.13.2 Opérande ALPHA

ALPHA = alpha

Désigne le coefficient de dépendance en pression. On rappelle que l'opérande ALPHA est relié à l'angle de frottement φ par la relation : $\alpha = \frac{2.sin(\varphi)}{3-sin(\varphi)}$.

10.13.3 Opérande P_ULTM

P_ULTM = p_ult
Désigne la déformation plastique cumulée ultime.

10.13.4 Opérande SY

SY = sy
Désigne la contrainte plastique. Cette opérande est liée à la combinaison du coefficient de cohésion C avec l'angle de frottement φ de la façon suivante : $SY = \frac{6C\,cos(\varphi)}{3-sin(\varphi)}$.

10.13.5 Opérande H

H = h
Désigne le module d'écrouissage, $h<0$ si la loi est adoucissante. Cette opérande est obligatoire pour un écrouissage de type linéaire (opérande ECROUISSAGE ='LINEAIRE') .

10.13.6 Opérande SY_ULTM

SY_ULTM = sy_ult Désigne la contrainte ultime. Cette opérande est obligatoire pour un écrouissage de type parabolique (opérande ECROUISSAGE ='PARABOLIQUE') .

10.13.7 Opérande DILAT

DILAT = ang
Désigne l'angle de dilatance (par défaut égal à zéro).

10.14 Mot clé facteur VISC_DRUC_PRAG

Le modèle rhéologique VISC_DRUC_PRAG est une loi de comportement élasto-visco-plastique dans Code_Aster [R7.01.22]. Elle se caractérise par un mécanisme viscoplastique qui s'écrouit entre trois seuils : élastique, de pic et ultime. L'élastoplasticité est de type Drucker Prager avec un écrouissage positif en pré pic et un écrouissage négatif en post-pic et la viscoplasticité est une loi puissance de type Perzyna.

On retrouve parmi les paramètres :

- des paramètres qui interviennent dans les fonctions d'écrouissage relatifs aux différents seuils élastique, de pic et ultime « α », « R » et « β » ,
- des paramètres liés à la loi de fluage « A » et « n » ,
- les déformations viscoplastiques cumulées correspondantes à chacun des seuils p_{pic} et p_{ult} ;
- une pression de référence « P_{ref} »

Les caractéristiques élastiques doivent être définies sous le mot clé ELAS.

10.14.1 Syntaxe

```
                |    VISC_DRUC_PRAG    =    _F    (
                                               ♦    PREF                =
pref,                          [R]
                                               ♦    N                   =    n,
                          [R]
```

```
                                        ♦ A                    =
      a,                                    [R]
                                        ♦ P_PIC                =
      ppic,                         [R]
                                        ♦ P_ULT                =
      pult,                         [R]
                                        ♦ ALPHA_0              =
      alpha0,                       [R]
                                        ♦ ALPHA_PIC            =
      alphapic,               [R]
                                        ♦ ALPHA_ULT            =
      alphault,               [R]
                                        ♦ R_0                  =     r0,
                              [R]
                                        ♦ R_PIC                =
      rpic,                         [R]
                                        ♦ R_ULT                =
      rult,                         [R]
                                        ♦ BETA_0               =
      beta0,                        [R]
                                        ♦ BETA_PIC             =
      betapic,                      [R]
                                        ♦ BETA_ULT             =
      betault,                      [R]
                                        )
```

Opérandes PREF/ N/A/P_PIC/P_ULT

PREF = pref

Paramètre P_{ref} : pression de référence (unité d'une contrainte)

N = n

Paramètre n : exposant de la loi d fluage

A = a

Paramètre A : paramètre viscoplastique (en s^{-1} ou $jour^{-1}$)

P_PIC = ppic

Paramètre p_{pic} : déformation viscoplastique cumulée au niveau du seuil de pic

P_ULT = pult

Paramètre p_{ult} : déformation viscoplastique cumulée au niveau du seuil ultime

10.14.2 Opérandes ALPHA_0/ALPHA_PIC /ALPHA_ULT

ALPHA_0 = alpha0

Paramètre α_0 : paramètre de la fonction de cohésion $\alpha(p)$ au niveau du seuil élastique

ALPHA_PIC = alphapic

Paramètre α_{pic} : paramètre de la fonction de cohésion $\alpha(p)$ au niveau du seuil de pic

ALPHA_ULT = alphault

Paramètre α_{ult} : paramètre de la fonction de cohésion $\alpha(p)$ au niveau du seuil ultime

10.14.3 Opérandes R_0 /R_PIC /R_ULT

R_0 = r0

Paramètre R_0 : paramètre de la fonction d'écrouissage $R(p)$ au niveau du seuil élastique (en unités de contraintes Pa ou MPa)

R_PIC = rpic

Paramètre R_{pic} : paramètre de la fonction d'écrouissage $R(p)$ au niveau du seuil de pic (en unités de contraintes Pa ou MPa)

R_ULT = rult

Paramètre R_{ult} : paramètre de la fonction d'écrouissage $R(p)$ au niveau du seuil ultime (en unités de contraintes Pa ou MPa)

10.14.4 Opérandes BETA_0 /BETA_PIC /BETA_ULT

BETA_0 = beta0
Paramètre β_0 : paramètre de la fonction de dilatance $\beta(p)$ au niveau du seuil élastique
BETA_PIC = betapic
Paramètre β_{pic} : paramètre de la fonction de dilatance $\beta(p)$ au niveau du seuil de pic
BETA_ULT = betault
Paramètre β_{ult} : paramètre de la fonction de dilatance $\beta(p)$ au niveau du seuil ultime

10.15 Mot clé facteur BARCELONE

Le modèle de Barcelone décrit le comportement élasto-plastique des sols non saturés couplé au comportement hydraulique (Cf. [R7.01.17] pour plus de détail). Ce modèle se ramène au modèle de Cam-Clay dans le cas saturé. Deux critères interviennent : un critère de plasticité mécanique (celui de Cam-Clay) et un critère hydrique contrôlé par la succion (ou pression capillaire). Il ne peut être utilisé que dans le cadre des comportements THHM et HHM. Les caractéristiques nécessaires au modèle doivent être données sous ce mot-clé et sous les mots clés CAM_CLAY et ELAS.
Il est donc obligatoire de renseigner les paramètres des mots clés CAM_CLAY et ELAS.

10.15.1 Syntaxe

```
| BARCELONE = _F (
                                    ♦ MU                = mu,
        [R]
                                    ♦ PORO              = poro,
        [R]
                                    ♦ LAMBDA            = lambda
    [R]
                                    ♦ KAPA              = kapa,
        [R]
                                    ♦ M                 = m,
            [R]
                                    ♦ PRES_CRIT         = pc,
    [R]
                                    ♦ PA                = pa,
        [R]
                                    ♦ R                 = r,
            [R]
                                    ♦ BETA              = beta,
        [R]
                                    ♦ KC                = kc,
        [R]
                                    ♦ PC0_INIT          = Pc0(0),
    [R]
                                    ♦ KAPAS             = Kappas,
        [R]
                                    ♦ LAMBDAS           = Lambdas,
    [R]
                                    ◊ ALPHAB            = alphab
    [R]
                  )
```

10.15.2 Opérandes MU/PORO/LAMBDA/KAPA/M

MU = mu
Module élastique de cisaillement .

PORO = poro

Porosité associée à une pression initiale et liée à l'indice des vides initial : $n=\frac{e_0}{1+e_0}$.

LAMBDA = lambda
Coefficient de compressibilité (pente plastique dans un essai de compression hydrostatique).
KAPA = kapa
Coefficient élastique de gonflement (pente élastique dans un essai de compression hydrostatique).
M = m
Pente de la droite d'état critique.

10.15.3 Opérandes PRES_CRIT et PA

PRES_CRIT = pc,PA = pa
Pression critique égale à la moitié de la pression de consolidation et pression atmosphérique.

10.15.4 Opérandes R/BETA/KC

R = r, BETA = beta
Coefficients adimensionnels intervenant dans l'expression : $\lambda(p_c)=\lambda(0)\left[(1-r)exp(-\beta\, p_c)+r\right]$
KC= kc
Paramètre adimensionnel contrôlant l'augmentation de la cohésion avec la succion (pression capillaire).

10.15.5 Opérandes PCO_INIT/KAPAS/LAMBDAS/ALPHAB

PC0_INIT = Pc0(0)
Seuil initial de la pression capillaire (homogène à des contraintes).
KAPAS = Kappas
Coefficient de rigidité adimensionnel associé au changement de succion dans le domaine élastique.
LAMBDAS = Lambdas
Coefficient de compressibilité lié à une variation de succion dans le domaine plastique. (adimensionnel).
ALPHAB = alphab
Coefficient de correction de la normalité de l'écoulement plastique, cf. [R7.01.17].

Terme correctif facultatif et adimensionnel permettant de mieux prendre en compte des résultats expérimentaux. Par défaut, il est calculé par *Code_Aster* en fonction de la pente de la droite d'état critique, du coefficient de gonflement et du coefficient de compressibilité.

10.16 Mot clé facteur HUJEUX

Loi de comportement élastoplastique en mécanique des sols (géo-matériaux granulaires : argiles sableuses, normalement consolidées ou sur-consolidées, graves…). Ce modèle est un modèle multi-critère qui comporte un mécanisme élastique non linéaire, 3 mécanismes plastiques déviatoires et un mécanisme plastique isotrope (voir [R7.01.23]).

Les caractéristiques mécaniques élastiques E, NU, et ALPHA doivent être définies en parallèle sous le mot-clé ELAS. La loi de Hujeux exhibant un comportement élastique non-linéaire, les valeurs de ces paramètres sont associées à la pression de référence PREF de la loi de Hujeux.

10.16.1Syntaxe

```
| HUJEUX = _F     (
                                ♦  N                    =     n,
                          [R]
                                ♦  BETA           =     beta,
                [R]
                                ♦  B                    =     b,
                          [R]
                                ♦       D                     =
d,                              [R]
                                ♦  PHI            =     phi,
                [R]
                                ♦  ANGDIL         =     angdil,
                [R]
                                ♦  PCO            =     pco,
                [R]
                                ♦  PREF           =     pref,
                [R]
                                ♦  ACYC           =     acyc,
                [R]
                                ♦  AMON           =     amon,
                [R]
                                ♦  CCYC           =     ccyc,
                [R]
                                ♦  CMON           =     cmon,
                [R]
                                ♦  RD_ELA         =     rdela,
                [R]
                                ♦  RI_ELA         =     riela,
                [R]
                                ♦  RHYS           =     rhys,
                [R]
                                ♦  RMOB           =     rmob,
                [R]
                                ♦  XM                   =     xm,
                      [R]
                                ♦  RD_CYC         =     rdcyc,
                [R]
                                ♦       RI_CYC          =
ricyc,                          [R]
                                ♦  DILA           =     dila,
                [R]
                                ◊  P     TRAC     =     /ptrac,
                [R]

/0.0                            [DEFAUT]
                                 )
```

10.16.2Opérandes N/BETA/B/D/PHI

N = n
Valeur du paramètre caractéristique de la loi puissance élastique non-linéaire, comprise entre 0 et 1.
BETA = beta
Valeur du coefficient de compressibilité plastique volumique ou de loi d'état critique, (positif).
B= b

Valeur du paramètre influençant la fonction de charge dans le plan (P',Q), comprise entre 0 (Mohr-Coulomb) et 1 (Cam-Clay).
D = d
Valeur du paramètre caractérisant la distance entre la droite d'état critique et la droite de consolidation isotrope, (positif).
PHI = phi
Valeur du paramètre caractérisant l'angle de frottement interne, en degré.

10.16.3 Opérandes ANGDIL/PCO/PREF

ANGDIL = angdil
Valeur du paramètre caractérisant l'angle de dilatance, en degré.
PCO = pco
Valeur pression critique de référence initiale, (négative).
PREF = pref
Valeur pression de confinement de référence, (négative).

Opérandes ACYC/AMON/CCYC/CMON
ACYC = acyc,AMON = amon,CCYC = ccyc,CMON = cmon
Valeurs des paramètres d'écrouissage des mécanismes plastiques déviatoires, en cyclique et en monotone, et des mécanismes plastiques de consolidation, en cyclique et en monotone, respectivement.

10.16.4 Opérandes RD_ELA/RI_ELA

RD_ELA = rdela, RI_ELA = riela,
Valeurs des rayons initiaux des seuils des mécanismes déviatoire monotone et de consolidation monotone, respectivement, comprises entre 0 et 1.
RD_ELA = rdela, RI_ELA = riela,
Valeurs des rayons initiaux des seuils des mécanismes déviatoire monotone et de consolidation monotone, respectivement, comprises entre 0 et 1.

10.16.5 Opérandes RD_CYC/RI_CYC

RD_CYC = rdcyc, RI_CYC = ricyc
Valeurs des rayons initiaux des seuils des mécanismes déviatoire cyclique et de consolidation cyclique, respectivement, comprises entre 0 et 1.

10.16.6 Opérandes RHYS/RMOB/XM/DILA/PTRAC

RHYS = rhys
Valeur du paramètre définissant la taille du domaine hystérétique.
RMOB = rmob
Valeur du paramètre définissant la taille du domaine mobilisé.
XM = xm
Valeur du paramètre de contrôle dans le domaine hystérétique.
DILA = dila
Valeur du coefficient de dilatance, comprise entre 0 et 1.
PTRAC = ptrac
cohésion du matériau, homogène à une contrainte (valeur positive ou nulle). Permet de décaler la surface de charge vers les $p>0$ afin de prendre en compte une légère traction dans le matériau.

10.17 Mot clé facteur HOEK_BROWN

Loi de comportement en mécanique des roches de type loi de HOEK-BROWN modifiée (Cf. [R7.01.18]
Les caractéristiques mécaniques élastiques E, NU, et ALPHA doivent être définies en parallèle sous le mot-clé ELAS.

10.17.1Syntaxe

```
| HOEK_BROWN = _F (
                                    ♦  GAMMA_RUP          =     grup,
      [R]
                                    ♦  GAMMA_RES          =     gres,
      [R]
                                    ♦  S_END                    =
send,              [R]
                                    ♦  S_RUP                    =
srup,              [R]
                                    ♦  M_END                    =
mend,              [R]
                                    ♦  M_RUP                    =
mrup,              [R]
                                    ♦  BETA                     =
beta,              [R]
                                    ♦  ALPHAHB                  =
alphahb,           [R]
                                    ♦  PHI_RUP                  =
prup,              [R]
                                    ♦  PHI_RES                  =
pres,              [R]
                                    ◊  PHI_END                  =
phiend             [R]
                                  )
```

10.17.2Opérandes GAMMA_RUP/GAMMA_RES

GAMMA_RUP = grup
Valeur du paramètre d'écrouissage à la rupture du matériau.
GAMMA_RES = gres
Valeur du paramètre d'écrouissage au début de la résistance résiduelle.

10.17.3Opérandes S_END/S_RUP/M_END/M_RUP

S_END = send
Valeur du produit S*SIGMA_c**2 atteinte à l'initiation d'endommagement.
S_RUP = srup
Valeur du produit S*SIGMA_c**2 atteinte en GAMMA_RUP.
M_END = mend
Valeur du produit M*SIGMA_c atteinte à l'initiation d'endommagement.
M_RUP = mrup
Valeur du produit M*SIGMA_c atteinte en GAMMA_RUP.

10.17.4Opérande BETA/ALPHAB

BETA = beta
Paramètre caractérisant le comportement post-rupture du matériau.
ALPHAHB = alphahb
Paramètre caractérisant le comportement post-rupture du matériau.

10.17.5Opérande PHI_RUP/PHI_RES/PHI_END

PHI_RUP = prup
Valeur de l'angle de frottement atteinte en GAMMA_RUP.
PHI_RES = pres
Valeur de l'angle de frottement atteinte en GAMMA_RES.
PHI_END = phiend
Valeur de l'angle de frottement à l'initiation d'endommagement (prise nulle par défaut).

10.18 Mot clé facteur GONF_ELAS

Loi de comportement en mécanique des roches permettant de décrire le comportement des matériaux de type "argile gonflante" (bentonite). Ce modèle a été développé au LAEGO. Il s'agit d'un modèle élastique non-linéaire reliant la contrainte nette à la pression de gonflement qui elle même dépend de la succion (ou pression capillaire). Il ne peut être utilisé que dans le cadre des comportements THHM et HHM.
Les caractéristiques mécaniques élastiques E, NU, et ALPHA doivent être définies en parallèle sous le mot-clé ELAS.
La loi GONF_ELAS est un modèle de comportement pour les argiles gonflantes (type bentonite), elle est définie par la relation :

$$d\,\tilde{\sigma} = K_0\, d\,\varepsilon_V + b\left(1+\frac{s}{A}\right) e^{-\beta_m\left(\frac{s}{A}\right)^2} ds$$

avec $\tilde{\sigma}$: contrainte nette (trace) $\sigma = \tilde{\sigma} - p_g$.

Dans le domaine saturé : $d\,\tilde{\sigma} = K_0\, d\,\varepsilon_V - b dp_w + dp_g$

Ou encore : $d\,\tilde{\sigma} = K_0\, d\,\varepsilon_V - b dp_c + (1-b) dp_g$

K_0 est le module de compressibilité du matériau
b est le coefficient de Biot
A est un paramètre homogène à une pression
β_m est un paramètre sans dimension
s la succion (ou pression capillaire)

A partir de là, l'identification se fait en recherchant la pression de gonflement.

Soit P_{gf} la pression de gonflement attendue et soit $P_{gf}(s_0)$ la pression de gonflement trouvée par le modèle quand on re-sature un échantillon dans un essai à déformation bloquée et en partant d'une succion s_0 .

Il est facile de voir que : $\frac{P_{gf}(s_0)}{A} = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\beta_m}} Erf\left(\frac{s_0}{A}\sqrt{\beta_m}\right) + \frac{1}{2\beta_m}\left(1 - e^{-\beta_m\left(\frac{s_0}{A}\right)^2}\right)$

On doit avoir $P_{gf} = P_{gf}^{\infty}$. On sait que $Erf(\infty) = 1$ et donc : $\frac{P_{gf}(s_0)}{A} = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\beta_m}} + \frac{1}{2\beta_m}$

Pour plus de détails, on se reportera à [R7.01.41].

10.18.1 Syntaxe

```
        | GONF_ELAS  = _F (
                                  ♦ BETAM   = betam,
    [R]
                                  ♦ PREF    = pref
    [R]
                              ),
```

10.18.2 Opérande BETAM

Paramètre matériau sans dimension correspondant au β_m de la loi ci-dessus. L'identification se fait en recherchant la pression de gonflement.

10.18.3 Opérande PREF

Paramètre homogène à une pression correspondant au A de la loi ci-dessus.

10.19 Mot clé facteur JOINT_BANDIS

Loi de comportement d'un joint hydraulique en mécanique des roches. Dans la direction normale au joint, le comportement est donné par

$$d\,\sigma'_n = -K_{\mathrm{ni}} \frac{dU}{\left(1-\frac{U}{U_{max}}\right)^{\gamma}}$$

σ'_n est la contrainte effective normale.
K_{ni} est la rigidité initiale normale.
U est la fermeture de fissure (ouverture à chargement nul moins ouverture courante).
U_{max} est la fermeture asymptotique de la fissure (à contrainte infinie).
γ est un paramètre matériau.

Dans la direction tangentielle, le comportement est élastique linéaire :

$$\sigma'_t = K_t [[u_t]]$$

10.19.1 Syntaxe

```
    | JOINT_BANDIS  = _F (
                                        ♦ K                = k,
      [R]
                                        ♦ DMAX       = dmax,
[R]
                                        ♦ GAMMA            =     gamma,
      [R]
                                        ◊ KT               =     /kt,
      [R]
                                              /1.E12             [DEFAUT]
                                    ),
```

10.19.2 Opérande K

Rigidité normale à chargement nul K_{ni} (contrainte par unité de longueur).

10.19.3 Opérande DMAX

Fermeture asymptotique D_{max} (longueur).

10.19.4 Opérande GAMA

Paramètre matériau γ sans dimension.

10.19.5 Opérande KT

Rigidité tangentielle K_t (contrainte par unité de longueur).

10.20 Mot clé facteur THM_RUPT

Loi de comportement pour les fissures avec couplage hydro-mécanique (voir [R7.02.15]).

Lorsque les massifs environnants la fissure sont imperméables, l'écoulement n'est plus bien défini sur les éléments de joints non ouverts. Dans ce cas, on remplace le saut de déplacement par une ouverture de fissure fictive ε_{fict} qui permet de régulariser l'écoulement et de reporter à la pointe de fissure la condition aux limites écrite à l'extrémité du trajet de fissuration.

On peut également définir un module de Biot N pour la zone cohésive.

10.20.1 Syntaxe

```
    | THM_RUPT  = _F (
                                        ♦ OUV_FICT     =     ouv_fict,
[R]
                                        ◊ UN_SUR_N           =     /
1/n,        [R]
            /           0.0         [DEFAUT]
                                            ),
```

10.20.2 Opérande OUV_FICT

Ouverture fictive de fissure ε_{fict} (longueur).

10.20.3 Opérande UN_SUR_N

Inverse du module de Biot de la fissure N (contrainte par unité de longueur).

10.21 Mot clé facteur Iwan

Loi de comportement élastoplastique en mécanique des sols adaptée pour le comportement déviatorique cyclique. La loi de comportement d'Iwan [R7.01.38] permet de reproduire les courbes de dégradation du module de cisaillement. La loi est calibrée à partir des paramètres d'un modèle hyperbolique de la forme :

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1+\left(\frac{\gamma}{\gamma_{ref}}\right)^n}$$

Les caractéristiques mécaniques élastiques E et NU doivent être définies en parallèle sous le mot-clé ELAS. Les valeurs sous les mot-clef ELAS seront comparées à celles entrées sous le mot-clef Iwan. Si elles sont différentes, une erreur fatale sera émise.
Si le mot-clef ELAS n'est pas renseigné, code_aster le fera automatiquement en prenant les caractéristiques élastiques su mot-clef Iwan.

10.21.1 Syntaxe

```
        | Iwan = _F       (
                                ♦     YoungModulus      =     young,      [R]
                                ♦     PoissonRatio      =     poisson,    [R]
                                ♦     GammaRef          =     gammaref,   [R]
                                ♦     n                 =     n           [R]
                                      ),
```

10.21.2 Opérande YoungModulus

Module de Young.

10.21.3 Opérande PoissonRatio

C oefficient de Poisson.

10.21.4 Opérande GammaRef

Valeur de la déformation de cisaillement $\gamma_{ref}=2\varepsilon_{ij}$ de la loi hyperbolique. C'est la valeur pour laquelle $G=G_{max}/2$ dans la courbe de comportement.

10.21.5 Opérande n

Exposant de la loi hyperbolique.

10.22 Mot clé facteur LKR

Le modèle *LKR* (Laigle, Kleine et Raude) est une loi de comportement thermo-élasto(visco)plastique [R7.01.40]. Elle s'appuie sur des concepts issus des théories de l'élastoplasticité et de la viscoplasticité. Le mécanisme plastique est caractérisé par un écrouissage positif en régime pré-pic et négatif en régime post-pic. La température influence les écrouissages plastique et viscoplastique.

Les caractéristiques élastiques doivent être définies sous le mot clé ELAS.

Le lecteur se rapportera à la documentation de référence [R7.01.40] pour la signification, les intervalles de définition et les valeurs par défaut (si paramètre facultatif, ◊) de chaque paramètre propre au mot-clé facteur LKR dont la syntaxe est détaillée dans le paragraphe § 10.22.1.

10.22.1 Syntaxe

```
| LKR = _F(  ♦ PA            = pa,           [R]
             ◊ NELAS         = nelas,        [R]
             ♦ SIGMA_C       = sigma_c,      [R]
             ◊ BETA          = beta,         [R]
             ◊ GAMMA         = gamma,        [R]
             ♦ V_1           = v_1,          [R]
             ♦ V_2           = v_2,          [R]
             ♦ A_2           = a_2,          [R]
             ♦ M_0           = m_0,          [R]
             ♦ M_1           = m_1,          [R]
             ♦ Q_I           = q_i,          [R]
             ♦ XI_1          = xi_1,         [R]
             ♦ XI_2          = xi_2,         [R]
             ♦ XI_5          = xi_5,         [R]
             ◊ F_P           = f_p,          [R]
             ♦ A             = a,            [R]
             ♦ N             = n,            [R]
             ♦ RHO_1         = rho_1,        [R]
             ♦ RHO_2         = rho_2,        [R]
             ♦ RHO_4         = rho_4,        [R]
             ◊ R_Q           = r_q,          [R]
             ◊ R_M           = r_m,          [R]
             ◊ R_S           = r_s,          [R]
             ◊ R_X1          = r_x1,         [R]
             ◊ R_X2          = r_x2,         [R]
             ◊ R_X5          = r_x5,         [R]
             ◊ Z             = z,            [R]
             ◊ COUPLAGE_P_VP = couplage_p_vp, [R]
```

10.23 Mot clé facteur MohrCoulombAS

Loi de comportement élastoplastique en mécanique des sols (géo-matériaux granulaires) adaptée pour des chargements monotones, écrite sous *MFront*. Cette loi de comportement élastoplastique avec surface de charge lissée de Mohr-Coulomb [R7.01.43] permet par exemple d'analyser la capacité portante d'une structure géotechnique. Le lissage proposé du critère de Mohr-Coulomb, comparativement à la loi d'origine [R7.01.28], a pour but d'accroître la robustesse de l'intégration numérique implicite. Les données nécessaires au champ matériau comportent aussi les paramètres de lissage. Les caractéristiques mécaniques élastiques E et NU doivent être définies en parallèle sous le mot-clé ELAS. Les valeurs sous le mot-clef ELAS seront comparées à celles entrées sous le mot-clef MohrCoulombAS. Si elles sont différentes, une erreur fatale sera émise.
Si le mot-clef ELAS n'est pas renseigné, *Code_Aster* le fera automatiquement en prenant les caractéristiques élastiques du mot-clé MohrCoulombAS.

10.23.1 Syntaxe

```
| MohrCoulombAS = _F  (
                    ♦   YoungModulus   =   young,     [R]
                    ♦   PoissonRatio   =   poisson,   [R]
                    ♦   Cohesion       =   cohesion,  [R]
                    ♦   FrictionAngle  =   phi        [R]
                    ♦   DilatancyAngle =   psi,       [R]
                    ♦   TransitionAngle =  theta_t ,  [R]
                    ♦   TensionCutOff  =   a_tt,      [R]
                    ♦   HardeningCoef  =   reg,       [R]
                     )
```

10.23.1.1 Opérande YoungModulus

Module de Young.

10.23.1.2 Opérande PoissonRatio

Coefficient de Poisson.

10.23.1.3 Opérande Cohesion

Cohésion (scalaire positif).

10.23.1.4 Opérande FrictionAngle

Angle de frottement φ_{pp} (fourni en °).

10.23.1.5 Opérande DilatancyAngle

Angle de dilatance ψ (fourni en °) qui doit être inférieur ou égal à l'angle de frottement interne φ_{pp}. Lorsque $\psi=\varphi_{pp}$, la loi d'écoulement plastique devient associée.

10.23.1.6 Opérande TransitionAngle

Paramètre associé au lissage : angle de Lode de transition θ_T (fourni en °). Il doit être strictement inférieur à 30°. Une valeur typique peut être prise égale à 25°.

10.23.1.7 Opérande TensionCutOff

Paramètre positif associé au lissage : troncature de traction a_{tt} . Si $a_{tt}=0$, le critère retrouve le sommet de la pyramide de Mohr - Coulomb, donc il n'est plus lissé .

10.23.1.8 Opérande Hardening Coef

Paramètre positif ou nul décrivant l'écrouissage agissant sur la cohésion en fonction de la déformation plastique équivalente . S'il est strictement positif, on prendra en général une valeur faible si la finalité est de réduire le régime de réponse instable, cf. [R7.01.4 3] .

10.24 Mot clé facteur KH_CSSM

Loi de comportement élastoplastique en mécanique des sols (géo-matériaux argileux et sableux) adaptée pour des chargements monotones et cycliques, depuis les petites déformations cycliques jusqu'à la ruine (état critique), écrite sous *MFront* . Cette loi de comportement élastoplastique avec une surface de charge de type Cam-Clay modifié [R7.01.4 4] permet p ar exemple d'analyser la capacité portante d'une structure géotechnique, mais aussi la réponse d'une colonne de sol à un champ d'onde .

Cette loi de comportement élastoplastique possède un potentiel hyperélastique (activable ou non) , une seule surface de charge (de type Modified Cam-Clay Bigoni-Piccolroaz) , et deux écrouissages et mécanismes d'écoulement définis par un pseudo-potentiel de dissipation (un écrouissage de type isotrope, un autre écrouissage de type cinématique) avec donc un seul multiplicateur plastique, cf. [R7.01.4 4]. L'état critique est caractérisé par une vitesse de déformation volumique nulle. Comparativement à la loi de type Modified Cam-Clay d'origine [R7.01. 1 4], ce modèle de comportement apporte via la surface de charge de type Modified Cam-Clay Bigoni-Piccolroaz une meilleure capacité de prédiction pour divers types de matériaux et via l' écrouissage de type cinématique une meilleure capacité de prédiction sur des trajets cycliques, adoucissants ou non (accommodation et rochet...) .

L es modules élastiques E et NU (ils ne seront pas utilisés) et d'amortissement sont fournis par le mot-clé ' E LAS ' .

10.24.1 Syntaxe

```
| KH_CSSM = _F    (
                      ♦    ShearModulus    =    G ,          [R]
                      ♦    BulkModulus     =    K ,          [R]
                      ♦    SwellingIndex   =    ka,          [R]
                      ♦    CamClayCSS       =   M            [R]
                      ♦    InitTensionPress =   PT0,         [R]
                      ♦    InitPreconsPress=    PC0 ,        [R]
                      ♦    YieldSurfLinPara=    ABP,         [R]
                      ♦    YieldSurfCapPara=    MBP,         [R]
                      ♦    PlasCompIndex   =    om,          [R]
                      ♦    KHIndex         =    r,           [R]
                      ♦    KHModulus       =    H,           [R]
                       )
```

10.24.1.1 Opérande ShearModulus

Module élastique G de cisaillement initial .

10.24.1.2 Opérande BulkModulus

Module élastique K de compressibilité initial .

10.24.1.3 Opérande SwellingIndex

Indice de gonflement ka, positif, sans dimensions : il permet de piloter l'hyperélasticité en régime élastique : il doit être positif ; si sa valeur est nulle, alors l'élasticité est linéaire. Sinon, le module élastique de compressibilité varie linéairement avec la pression et le module élastique de cisaillement évolue avec la distorsion, cf. [R7.01.44].

10.24.1.4 Opérande CamClayCSS

Coefficient M de pente de la droite d'état critique (type Cam-Clay) , cf. [R7.01.44] .

10.24.1.5 Opérande InitTensionPress

Traction de consolidation initiale PT0. Valeur liée à l'indice des vides, cf. [R7.01.44].

10.24.1.6 Opérande InitPrecontPress

Pression de consolidation initiale PC0, intervenant dans la surface de charge, cf. [R7.01.44].

10.24.1.7 Opérande YieldSurfLinPara

Paramètre ABP positif, strictement compris entre 0 et 2, sans dimensions, associé à la modification de la surface de charge elliptique initiale du modèle de Cam-Clay, selon la forme proposée par Bigoni & Piccolroaz, pour le régime à faibles valeurs de pressions et de cisaillements. Si sa valeur est égale à 1, alors on retrouve la forme elliptique initiale du modèle de Cam-Clay, cf. [R7.01.44].

10.24.1.8 Opérande YieldSurfCapPara

Paramètre MBP strictement supérieur à 1, sans dimensions, caractérisant la forme en « cap » de la surface de charge, c'est-à-dire au régime à fortes valeurs de pressions et de cisaillements. En pratique, pour que l a forme elliptique initiale du modèle de Cam-Clay soit bien déformée en « cap », on prendra MBP supérieur à 2, cf. [R7.01.44].

10.24.1.9 Opérande PlasCompIndex

Paramètre om strictement positif, sans dimensions, pilotant la relation exponentielle de la pression de consolidation avec la déformation volumique, cf. [R7.01.44].

10.24.1.10 Opérande KHIndex

Paramètre r positif ou nul, sans dimensions, pilotant la contribution de l'écrouissage cinématique relativement à l'écrouissage isotrope dans l'expression de la surface de charge, cf. [R7.01.4 4] . Si sa valeur est égale à 0, alors le modèle de comportement ne possède pas d 'écrouissage cinématique.

10.24.1.11 Opérande KHModulus

Paramètre H positif ou nul, égal au module d'écrouissage cinématique linéaire, exprimé en unités de contraintes, cf. [R7.01.44]. Si sa valeur est égale à 0, alors le modèle de comportement ne possède pas d'écrouissage cinématique.

11 Comportements spécifiques aux éléments 1D

11.1 Mot clé facteur ECRO_ASYM_LINE (cf. [R5.03.09])

Il permet de modéliser un comportement à écrouissage isotrope linéaire, mais avec des limites d'élasticité et des modules d'écrouissage différents en traction et en compression. Ceci est utilisé par le modèle de comportement 1D VMIS_ASYM_LINE, utilisable pour des éléments de barre.
Le comportement élastique en traction et compression est le même : même module de Young.
Il y a deux domaines d'écrouissage isotrope définis par R_T et R_C. Les deux domaines sont indépendants l'un de l'autre. Nous adoptons un indice T pour la traction et C pour la compression.

σ_{YT}	Effort limite en traction. En valeur absolue.
σ_{YC}	Effort limite en compression. En valeur absolue.
p_T	Déformation plastique cumulée en traction. Valeur algébrique.
p_C	Déformation plastique cumulée en compression. Valeur algébrique.
E_{TT}	Pente d'écrouissage en traction.
E_{TC}	Pente d'écrouissage en compression.

Les équations du modèle de comportement sont :

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}^p = \dot{\varepsilon} - \overbrace{E^{-1}}^{\cdot}\sigma - \dot{\varepsilon}^{th} \\ \dot{\varepsilon}^p = \dot{\varepsilon}_C^p + \dot{\varepsilon}_T^p \\ \dot{\varepsilon}_C^p = \dot{p}_C \dfrac{\sigma}{|\sigma|} \\ \sigma - R_T(p_T) \le 0 \\ -\sigma - R_C(p_C) \le 0 \end{cases}$$

avec

$$\begin{cases} \dot{p}_C = 0 \text{ si } -\sigma - R_C(p_C) < 0 \\ \dot{p}_C \ge 0 \text{ si } -\sigma = R_C(p_C) \\ \dot{p}_T = 0 \text{ si } \sigma - R_T(p_T) < 0 \\ \dot{p}_T \ge 0 \text{ si } \sigma = R_T(p_T) \end{cases}$$

où :

$\dot{\varepsilon}_C^p$: vitesse de déformation plastique en compressions,

$\dot{\varepsilon}_T^p$: vitesse de déformation plastique en traction.

ε_{th} : déformation d'origine thermique : $\varepsilon_{th} = \alpha(T - T_{ref})$. α est défini sous ELAS.

On remarque que l'on ne peut avoir simultanément plastification en traction et en compression : soit $\dot{p}_C = 0$, soit $\dot{p}_T = 0$, soit les deux sont nulles.

11.1.1 Syntaxe

```
| ECRO_ASYM_LINE = _F (
```

```
♦      DT_SIGM_EPSI =    RT,          [R]
♦      SY_T         =    sigmayT,     [R]
♦      DC_SIGM_EPSI =    RC,          [R]
♦      SY_C         =    sigma yC     [R]
)
```

12 Paramètres pour comportements particuliers

12.1 Mot clé facteur LEMAITRE_IRRA

Caractéristiques (spécifiques à l'irradiation) du fluage des crayons ou assemblages combustibles (comportement LEMAITRE_IRRA).
Les caractéristiques élastiques doivent être définies sous le mot clé ELAS ou ELAS_FO.
La forme uni-axiale de la loi de grandissement est :

$$\varepsilon_g(t)=f(T,\Phi_t)$$

où f est une fonction de la température T exprimée en $°C$ et de la fluence Φ_t exprimée en $10^{24} neutrons/m^2$.

Pour les modélisations 2D et 3D, la loi de grandissement s'écrit (confer [R5.03.08]) :

$$\varepsilon_g(t)=f(T,\Phi_t)\varepsilon_g^0$$

avec :

$$\varepsilon_g^0=\begin{pmatrix}1&0&0\\0&0&0\\0&0&0\end{pmatrix}_{R_1}$$

On doit alors définir à l'aide de l'opérande ANGL_REP du mot clé MASSIF de l'opérateur AFFE_CARA_ELEM les axes locaux correspondant au repère R_1 (voir [U4.42.01]). Cet opérande attend 3 angles nautiques dont on n'utilise que les 2 premiers (le troisième peut donc être quelconque).

Les paramètres de grandissement sont fournis derrière le mot clé GRAN_FO.
On renseigne les quatre mots-clés QSR_K, BETA, PHI_ZERO, L (les autres paramètres du fluage sont identiques à ceux du comportement LEMAITRE) et le comportement en fluage est alors suivant :

$$\dot{p}=\left[\frac{\sigma_{eq}}{p^{1/m}}\right]^n\left(\frac{1}{K}\frac{\Phi}{\Phi_0}+L\right)^{\beta}e^{\frac{-Q}{R(T+T_0)}}\qquad(T_O=273{,}15\,°)$$

où Φ est le flux neutronique calculé à partir de la fluence (voir [R5.03.08]). T est en $°C$.

Dans le cas où l'on souhaite que le comportement ne dépende pas de la fluence, mais comporte quand même le terme en $\exp(-Q/RT)$, il est possible d'utiliser le mot-clé LEMAITRE_IRRA dans STAT_NON_LINE en renseignant le mot-clés LEMAITRE _IRRA dans DEFI_MATERIAU. Il faut alors impérativement affecter UN_SUR_K, A, B, S à zéro et PHI_ZERO à un. Dans ces conditions, il n'est pas nécessaire de définir un champ de fluence.

12.1.1 Syntaxe

```
| LEMAITRE_IRRA   = _F (
                        ♦    N          =    n,          [R]
                        ♦    UN_SUR_K   =    1/K   ,     [R]
                        ♦    UN_SUR_M   =    1/m   ,     [R]
                        ♦    QSR_K      =    Q/R   ,     [R]
                        ♦    BETA       =    beta,       [R]
                        ♦    PHI_ZERO   =    phi0,       [R]
                        ♦    L          =    L,          [R]
                        ◊    GRAN_FO    = Fct_g,    [fonction]
                             )
```

12.2 Mot clé facteur DIS_GRICRA

Ce mot clé permet de définir les paramètres associés au comportement non linéaire de la liaison entre la grille et le crayon dans un assemblage combustible modélisée par un élément discret (cf. [R5.03.17]). Le comportement utilisable dans les commandes STAT_NON_LINE et DYNA_NON_LINE à partir de ces paramètres est DIS_GRICRA .

Les paramètres d'entrée de cette loi sont les suivants :

•Comportement en glissement axial : 5 paramètres (dont un paramètre arbitraire, purement numérique) :

1.rigidité normale du discret KN_AX ;

2.rigidité tangentielle (dans la direction du glissement) KT_AX ;

3.coefficient de frottement de Coulomb COUL_AX ;

4.force de serrage F_SER (limite de glissement = COUL_AX x F_SER) ;

5.paramètre d'écrouissage ET_AX (la loi de comportement peut être assimilée à de la plasticité parfaite. Le paramètre d'écrouissage ne sert qu'à assurer la convergence du calcul ; une valeur par défaut de 10^{-7} lui est affectée) ;

•Comportement en rotation : 8 paramètres (dont un paramètre purement numérique)

1.pentes successives PEN1, PEN2, PEN3 et PEN4 de la courbe $Moment = f(angle)$;

2.angles ANG1, ANG2 et ANG3 des points d'inflexion de la courbe ;

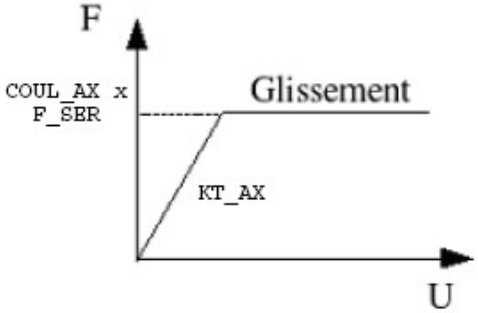
3.paramètre d'écrouissage ET_ROT (paramètre ne servant qu'à assurer la convergence du calcul ; une valeur par défaut de 10^{-7} lui est affectée).

Les forces de serrage peuvent varier en fonction de la température et de l'irradiation. Ces dépendances sont affectées sur les pentes PEN1, PEN2 et PEN3 pour le comportement en rotation et sur la force de serrage F_SER pour le comportement en glissement axial. Les fonctions de dépendance sont définies directement sous forme d'une FORMULE dans le fichier de commande.

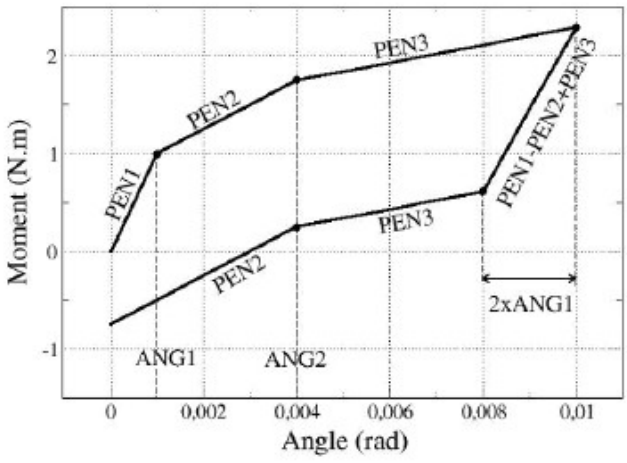
- comportement s'appuyant sur un élément discret à 2 nœuds (modélisation DIS_TR) avec degrés de liberté en translation et en rotation
- contact avec frottement de Coulomb pour les degrés de translation, modélisé par un modèle élastoplastique
- loi de comportement non linéaire en rotation basé sur des considérations géométriques et physiques (cf. [R5.03.17])

Les noms des paramètres suivis du suffixe _FO permettent de renseigner la valeur sous la forme d'une fonction.

Un certain nombre de paramètres supplémentaires, disponibles pour ce comportement mais qui ne figurent pas dans le présent document, sont explicités dans [V6.04.131].



(a) Comportement en translation



(b) Comportement en flexion

12.2.1 Syntaxe

```
             | DIS_GRICRA     = _F  (
      % Comportement 'DIS_GRICRA'

kn_bossette,                          [R]

kt_bossette,                          [R]

kt_bossette,                          [R]

kt_bossette,                          [R]

        kt_bossette,                        [fonction]

      =/kt_bossette,                        [R]

       /1.0E-7,                             [DEFAUT]

      =/kt_bossette     ,                   [R]

       /1.0E-7,                             [DEFAUT]

       kn_ressort,            [R]
      = kt_ressort,                         [R]

      = kt_ressort,                         [R]

       kn_ressort,            [R]
      = kt_ressort,                         [R]

      = kt_ressort,                         [R]

      = kt_ressort,                         [R]

mu_bossette ,           [fonction]

mu_ressort,             [fonction]

mu_ressort,             [fonction]

gamma_bossette    ,     [fonction]

            [fonction]

forc_serrage            [fonction]

forc_serrage            [fonction]
                              )
```

```
                                    ♦ KN_AX           =

                                    ♦ KT_AX           =

                                    ♦ COUL_AX   =

                                     ◊ F_SER          =

                                          ◊ F_SER_FO  =
                                    ◊ ET_AX

                                    ◊ ET_ROT

      ◊ ANG1                        =

                                    ◊ ANG2

                                    ◊ ANG 3

      ◊ PEN1                        =

                                    ◊ PEN2

                                    ◊ PEN3

                                    ◊ PEN4

                                    ◊ ANG1_FO         =

                                    ◊ ANG2_FO         =

                                    ◊ ANG 3 _FO       =

            ◊ PEN1_FO         =

      ◊ PEN2_FO         = gamma_ressort,

                                    ◊ PEN3_FO         =

                                    ◊ PEN4_FO         =
```

12.3 Mot clé facteur DIS_CONTACT

Ce mot clé permet de définir les paramètres associés aux comportements DIS_CHOC et DIS_CONTACT, non linéaires de choc avec frottement de Coulomb associés aux éléments discrets (cf. [R5.03.17]) pour des modélisations DIS_T, DIS_TR, 2D_DIS_T, 2D_DIS_TR s'appuyant sur des mailles POI1 ou SEG2 (élément discret à 1 ou 2 nœuds).

12.3.1 Syntaxe

```
◊  | DIS_CONTACT = _F(
       ◊ RIGI_NOR        = Kn,                                    [R]
       ◊ RIGI_TAN        = Kt,                                    [R]
       ◊ AMOR_NOR        = Cn,                                    [R]
       ◊ AMOR_TAN        = Ct,                                    [R]
       ◊ COULOMB         = mu,                                    [R]
       ◊ DIST_1          = dist1,                                 [R]
       ◊ DIST_2          = dist2,                                 [R]
       ◊ JEU             = d0,                                    [R]
        ◊ INST_COMP_INIT = (t0,t1)                                [R]
)
```

12.3.2 Opérandes RIGI_NOR/RIGI_TAN/AMOR_NOR/AMOR_TAN

RIGI_NOR = Kn
Valeur de la rigidité normale de choc. Si RIGI_NOR est présent c'est cette valeur qui est prise en compte. Si elle n'est pas présente, les éléments discrets auxquels on affecte ce matériau doivent avoir leur raideur définie par ailleurs (par exemple à l'aide de la commande AFFE_CARA_ELEM avec les mots clés DISCRET , 2D_DISCRET ou RIGI_PARASOL).

RIGI_TAN = Kt
Valeur de la rigidité tangentielle de choc.

AMOR_NOR = Cn
Valeur de l'amortissement normal de choc.

AMOR_TAN = Ct
Valeur de l'amortissement tangentiel de choc.

12.3.3 Opérandes COULOMB/DIST_1/DIST_2/JEU/INST_COMP_INIT

COULOMB = mu
Valeur du coefficient de frottement.

DIST_1 = dist1
Distance caractéristique de matière entourant le premier nœud de choc.

DIST_2 = dist2
Distance caractéristique de matière entourant le deuxième nœud de choc (choc entre deux structures mobiles).

JEU = d0
Distance entre le nœud de choc et un obstacle non modélisé (cas d'un choc entre une structure mobile et un obstacle indéformable et immobile).

INST_COMP_INIT = (t0,t1)
Lorsque l'on utilise le comportement DIS_CONTACT , cf. [R5.03.17] , et que le discret est initialement comprimé et en contact, il peut être nécessaire pour partir d'un état équilibré de simuler cette mise en compression progressive. Ce mot clef permet de définir une rampe, si INST est l'instant de calcul : $\mathbf{min}(\max(0.0,(INST-t_0)/(t_1-t_0)),1.0)$. La valeur obtenue multiplie la distance entre les nœuds ou celle entre le nœud et l'obstacle. La distance varie donc entre 0 à t_0 et sa valeur finale à t_1 . Pendant cette phase le frottement n'est pas activé. À la fin de cette phase si le discret est comprimé le seuil de Coulomb est $\mu . N$ où Fx est l'effort de compression dans le discret.

12.4 Mot clé facteur DIS_CHOC_ENDO

Ce mot clé permet de définir les paramètres associés aux comportements CHOC_ENDO et CHOC_ENDO_PENA non linéaires de choc associés aux éléments discrets (cf. [R5.03.17]) pour des modélisations DIS_T s'appuyant sur des mailles SEG2 (élément discret à 2 nœuds).

12.4.1 Syntaxe

```
◊ | DIS_CONTACT = _F(
      ♦ FX          = fx,                                    [R]
      ♦ RIGI_NOR    = rn,                                    [R]
      ♦ AMOR_NOR    = an,                                    [R]
      ◊ DIST_1      = dist1,                                 [R]
      ◊ DIST_2      = dist2,                                 [R]
      ♦ CRIT_AMOR   = ['INCLUS'|'EXCLUS']                    [R]
)
```

12.4.2 Opérandes FX/RIGI_NOR/AMOR_NOR/CRIT_AMOR

FX = fx
Fonction seuil dépendant du déplacement relatif des nœuds du discret.

RIGI_NOR = rn
Fonction décrivant la variation de la raideur dépendant du déplacement relatif des nœuds du discret. Cette fonction est obligatoirement décroissante.

AMOR_NOR = an
Fonction décrivant l'amortissement dépendant du déplacement relatif des nœuds du discret.

CRIT_AMOR = ['INCLUS'|'EXCLUS']
L'amortissement de structure peut être pris en compte de 2 façons différentes. Soit il est pris en compte dans le calcul du seuil, alors l'effort dans le discret (si l'amortissement est différent de 0) est toujours inférieur au seuil. On a donc une réduction du seuil en fonction de la vitesse du choc. Soit il est exclus du calcul du seuil, alors l'effort dans le discret peut être égal au seuil.
Dans tous les cas l'amortissement est pris en compte dans l'effort (cf. [R5.03.17]).

12.4.3 Opérandes DIST_1/DIST_2

DIST_1 = dist1
Distance caractéristique de matière entourant le premier nœud de choc (choc entre deux structures mobiles).

DIST_2 = dist2
Distance caractéristique de matière entourant le deuxième nœud de choc (choc entre deux structures mobiles).

12.5 Mot clé facteur DIS_ECRO_CINE

Ces paramètres de comportement matériau élastoplastique à écrouissage cinématique non linéaire, cf. [R5.03.17], sont à utiliser avec les éléments discrets 2D_DIS_TR, 2D_DIS_T, DIS_TR, DIS_T (cf. opérateur AFFE_MODELE [U4.41.01]). La loi est construite composante par composante du torseur des efforts résultants sur l'élément discret : il n'y a pas de couplage entre les composantes d'efforts (forces et couples), sur lesquelles on peut définir des caractéristiques différentes ; seules les caractéristiques diagonales sont affectées par le comportement. La raideur élastique K_e (qui sert également à l'algorithme non linéaire pour la prédiction) de cette loi de comportement est donnée via les mots-clés K_T_D_L, K_TR_D_L, K_T_D_N, K_TR_D_N de la commande AFFE_CARA_ELEM [U4.42.01] :

Les grandeurs sont toutes exprimées dans le repère local de l'élément ; il est obligatoire de préciser le mot-clé REPERE='LOCAL' dans AFFE_CARA_ELEM [U4.42.01]. L'orientation du discret peut se faire dans AFFE_CARA_ELEM avec les règles habituelles en utilisant le mot-clé ORIENTATION.

L'utilisation de la loi de comportement se fait dans STAT_NON_LINE ou DYNA_NON_LINE sous le mot clé COMPORTEMENT [U4.51.11] avec RELATION = 'DISC_ECRO_CINE'.

On précise que cette loi de comportement n'est pas compatible avec un chargement cyclique alterné.

12.5.1 Syntaxe

```
◊ | DISC_ECRO_CINE = _F(
      ◊/ ♦ LIMY_DX = fy_dx,                                    [R]
         ♦ KCIN_DX = kx_dx,                                    [R]
      ◊/ ♦ PUIS_DX = n_dx,                                     [R]
         ♦ LIMU_DX = fu_dx,                                    [R]
      ◊/ ♦ LIMY_DY = fy_dy,                                    [R]
         ♦ KCIN_DY = kx_dy,                                    [R]
      ◊/ ♦ PUIS_DY = n_dy,                                     [R]
         ♦ LIMU_DY = fu_dy,                                    [R]
      ◊/ ♦ LIMY_DZ = fy_dz,                                    [R]
         ♦ KCIN_DZ = kx_dz,                                    [R]
      ◊/ ♦ PUIS_DZ = n_dz,                                     [R]
         ♦ LIMU_DZ = fu_dz,                                    [R]
      ◊/ ♦ LIMY_RX = fy_rx,                                    [R]
         ♦ KCIN_RX = kx_rx,                                    [R]
      ◊/ ♦ PUIS_RX = n_rx,                                     [R]
         ♦ LIMU_RX = fu_rx,                                    [R]
      ◊/ ♦ LIMY_RY = fy_ry,                                    [R]
         ♦ KCIN_RY = kx_ry,                                    [R]
      ◊/ ♦ PUIS_RY = n_ry,                                     [R]
         ♦ LIMU_RY = fu_ry,                                    [R]
      ◊/ ♦ LIMY_RZ = fy_rz,                                    [R]
         ♦ KCIN_RZ = kx_rz,                                    [R]
      ◊/ ♦ PUIS_RZ = n_rz,                                     [R]
         ♦ LIMU_RZ = fu_rz                                     [R]
)
```

12.5.2 Opérandes

LIMY_DX = fy_dx,
F_y^x : limite élastique dans la direction d'effort x

KCIN_DX = kx_dx,
k_x : « raideur » d'écrouissage cinématique dans la direction d'effort x

PUIS_DX = n_dx ,
n_x : puissance, définissant la forme de la courbe monotone dans la direction d'effort

LIMU_DX = fu_dx,
F_u^x : limite d'écrouissage cinématique, définissant le plateau de la courbe monotone dans la direction d'effort x

12.6 Mot clé facteur DIS_VISC

Ce comportement viscoélastique non linéaire est à utiliser avec les éléments discrets (cf. [R5.03.17]) 2D_DIS_TR , 2D_DIS_T , DIS_TR , DIS_T (cf. opérateur AFFE_MODELE [U4.41.01]). Ce comportement n'affecte que le degré de liberté dx local de l'élément. La valeur de la raideur

élastique K_e (qui sert également à l'algorithme non linéaire pour la prédiction) est donnée via les mots-clés K_T_D_L, K_TR_D_L, K_T_D_N, K_TR_D_N de la commande AFFE_CARA_ELEM [U4.42.01].

Cette loi de comportement visqueuse est utilisable avec les opérateurs STAT_NON_LINE et DYNA_NON_LINE, sous le mot clé COMPORTEMENT [U4.51.11] avec RELATION = 'DIS_VISC'.

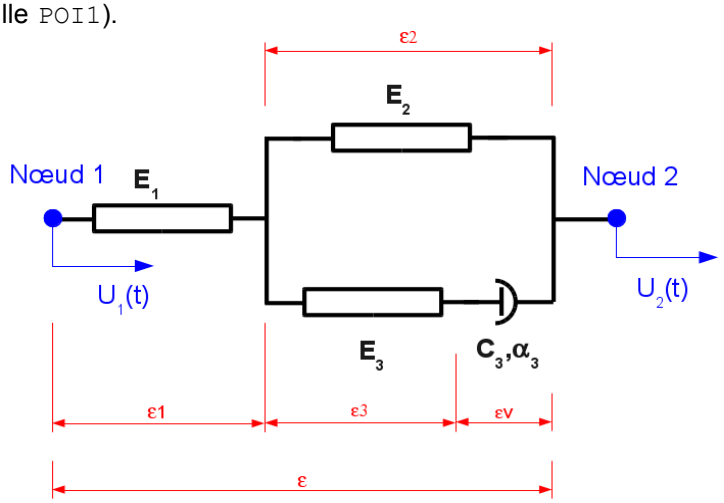
Les grandeurs sont toutes exprimées dans le repère local de l'élément ; il est obligatoire de préciser REPERE='LOCAL' dans AFFE_CARA_ELEM [U4.42.01]. L'orientation du discret peut se faire dans AFFE_CARA_ELEM avec les règles habituelles en utilisant le mot-clé ORIENTATION.

12.6.1 Syntaxe

```
◊ | DIS_VISC = _F(
    ♦ / K1        = k1,                    [R]
      / UNSUR_K1  = usk1,                  [R]
    ♦ / K2        = k2,                    [R]
      / UNSUR_K2  = usk2,                  [R]
    ♦ / K3        = k3,                    [R]
      / UNSUR_K3  = usk3,                  [R]
    ♦ C           = c,                     [R]
    ♦ PUIS_ALPHA  = alpha,                 [R]
)
```

12.6.2 Opérandes

Le comportement DIS_VISC est un comportement rhéologique viscoélastique non linéaire, de type Zener étendu, permettant de schématiser le comportement d'un amortisseur uniaxial, applicable au degré de liberté axial des éléments discrets à deux nœuds (maille SEG2) ou et des éléments discrets à un nœud (maille POI1).



Pour la direction locale x (et seulement celle-là) de l'élément discret, on fournit 5 coefficients. Leurs unités doivent être en accord avec l'unité des efforts, l'unité des longueurs et l'unité de temps du problème.

- K1 : raideur élastique de l'élément 1 du modèle rhéologique,
- K2 : raideur élastique de l'élément 2 du modèle rhéologique,
- K3 : raideur élastique de l'élément 3 du modèle rhéologique,

- UNSUR_K1 : souplesse élastique de l'élément 1 du modèle rhéologique,
- UNSUR_K2 : souplesse élastique de l'élément 2 du modèle rhéologique,
- UNSUR_K3 : souplesse élastique de l'élément 3 du modèle rhéologique,

- PUIS_ALPHA : puissance du comportement visqueux de l'élément α
- C : coefficient du comportement visqueux de l'élément.

Les conditions à respecter pour ces coefficients sont (notamment pour assurer la positivité et la finitude de la matrice tangente) :

$K_1 \geqslant 10^{-8}$; $1/K_1 \geqslant 0$; $K_3 \geqslant 10^{-8}$; $1/K_3 \geqslant 0$;
$1/K_2 \geqslant 10^{-8}$; $K_2 \geqslant 0$; $C \geqslant 10^{-8}$; $10^{-8} \leqslant \alpha \leqslant 1$

De plus, on ne peut avoir à la fois : $1/E_1 = 0$, $1/E_3 = 0$ et $E_2 = 0$ c'est-à-dire le cas de l'amortisseur seul.

12.7 Mot clé facteur DIS_ECRO_TRAC

Le comportement DIS_ECRO_TRAC est un comportement non linéaire, permettant de schématiser le comportement d'un dispositif uniaxial, suivant l'axe local x ou dans le plan tangent yz des éléments discrets à deux nœuds (maille SEG2) ou et des éléments discrets à un nœud (maille POI1).

Le comportement non-linéaire est donné par une courbe $F = fonction(\Delta U)$:
- pour un SEG2, ΔU représente le déplacement relatif des 2 nœuds dans le repère local de l'élément.
- pour un POI1, ΔU représente le déplacement absolu du nœud dans le repère local de l'élément.
- pour un SEG2 ou un POI1 , F représente l'effort exprimé dans le repère local de l'élément.

Cette loi de comportement est utilisable avec les opérateurs STAT_NON_LINE et DYNA_NON_LINE, sous le mot clé COMPORTEMENT [U4.51.11] avec RELATION = 'DIS_ECRO_TRAC'.

Les grandeurs sont toutes exprimées dans le repère local de l'élément. L'orientation du discret peut se faire dans AFFE_CARA_ELEM avec les règles habituelles en utilisant le mot-clé ORIENTATION.

12.7.1 Syntaxe

```
◊ | DIS_ECRO_TRAC = _F(
          ♦ / FX = fx,                                          [fonction]
            /  FTAN = ftan,
          # Si FTAN est donnée
          ♦   ECROUISSAGE = 'ISOTROPE'| 'CINEMATIQUE'             [Texte]
   )
```

12.7.2 Opérande FX

La seule donnée nécessaire est la fonction décrivant le comportement non-linéaire. Cette fonction doit respecter les critères suivant :
- C'est une fonction au sens de code_aster : définie avec l'opérateur DEFI_FONCTION,
- Les interpolations sur les axes des abscisses et des ordonnées sont linéaires,
- Le nom de l'abscisse lors de la définition de la fonction est DX,
- Les prolongements à gauche et à droite de la fonction sont exclus,
- La fonction doit être définie par **au moins** 3 points,
- Le premier point est $(0.0, 0.0)$ et doit être donné,
- La fonction doit être strictement croissante.
- La dérivée de la fonction doit être inférieure ou égale à sa dérivée au point $(0.0, 0.0)$.

Exemples de définition de la fonction :

```
LesX = (0.0 ,   0.2 ,   0.3 ,   0.50)
LesY = (0.0 , 500.0 , 800.0 , 900.0)
```

```
fctsy1 = DEFI_FONCTION( NOM_PARA= 'DX' ,
    ABSCISSE = LesX,
    ORDONNEE = LesY,
)

fctsy2 = DEFI_FONCTION(NOM_PARA='DX',
    VALE = (0.0, 0.0, 0.2, 500.0, 0.3, 800.0, 0.50 , 900.0 ),
)
```

Les deux premiers points de la fonction permettent de définir la pente élastique au comportement. Les unités des abscisses et des ordonnées doivent être cohérentes avec celles du problème :
- L'unité des abscisses doit être homogène à des déplacements,
- L'unité de la fonction doit être homogène à des efforts.

12.7.3 Opérande FTAN

La seule donnée nécessaire est la fonction décrivant le comportement non-linéaire. Cette fonction doit respecter les critères suivant :
- C'est une fonction au sens de code_aster : définie avec l'opérateur DEFI_FONCTION,
- Les interpolations sur les axes des abscisses et des ordonnées sont linéaires,
- Le nom de l'abscisse lors de la définition de la fonction est DTAN,
- Les prolongements à gauche et à droite de la fonction sont exclus,
- La fonction doit être définie par **exactement** 3 points,
- Le premier point est $(0.0, 0.0)$ et doit être donné,
- La fonction doit être strictement croissante.
- La dérivée de la fonction doit être inférieure ou égale à sa dérivée au point $(0.0,0.0)$.

Exemples de définition de la fonction :

```
LesX = (0.0 ,   0.2 ,   0.3 )
LesY = (0.0 , 500.0 , 800.0 )

fctsy1 = DEFI_FONCTION( NOM_PARA= 'DTAN' ,
    ABSCISSE = LesX,
    ORDONNEE = LesY,
)

fctsy2 = DEFI_FONCTION(NOM_PARA='DX',
    VALE = (0.0, 0.0, 0.2, 500.0, 0.3, 800.0 ),
)
```

Les deux premiers points de la fonction permettent de définir la pente élastique au comportement. Les unités des abscisses et des ordonnées doivent être cohérentes avec celles du problème :
- L'unité des abscisses doit être homogène à des déplacements,
- L'unité de la fonction doit être homogène à des efforts.

12.8 Mot clé facteur DIS_BILI_ELAS

Ce mot clef facteur permet d'affecter un comportement élastique bilinéaire à des discrets dans les 3 directions de translation.

Ce comportement est à utiliser avec les éléments discrets (cf. [R5.03.17]), 2D_DIS_T, DIS_T (cf. opérateur AFFE_MODELE [U4.41.01]). La loi est construite composante par composante, il n'y a donc pas de couplage entre les composantes d'efforts, sur lesquelles on peut définir des caractéristiques différentes ; seules les caractéristiques diagonales sont affectées par le comportement. La valeur de la raideur élastique K_e (qui ne sert qu'à l'algorithme non linéaire pour la prédiction) de cette loi de comportement est donnée via les mots-clés K_T_D_L, K_T_D_N de la commande AFFE_CARA_ELEM [U4.42.01].

Cette loi de comportement est utilisable avec les opérateurs STAT_NON_LINE et DYNA_NON_LINE, sous le mot clé COMPORTEMENT [U4.51.11] avec RELATION = 'DISC_BILI_ELAS'.

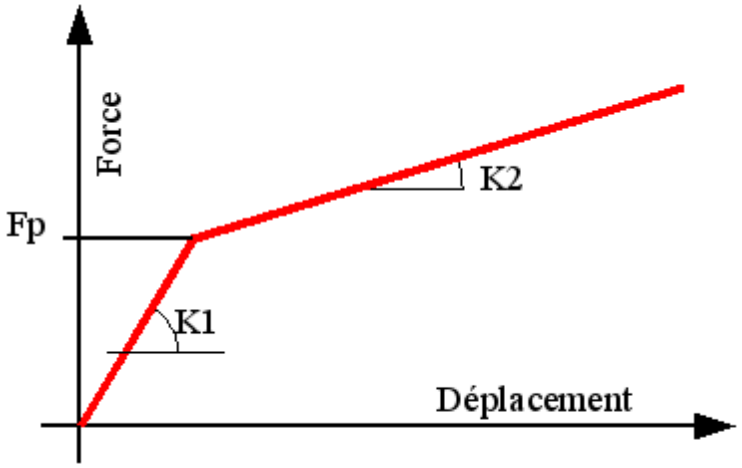
Les grandeurs sont toutes exprimées dans le repère local de l'élément. L'orientation du discret peut se faire dans la commande AFFE_CARA_ELEM avec les règles habituelles en utilisant le mot-clé ORIENTATION.

12.8.1 Syntaxe

```
| DIS_BILI_ELAS = _F(
    ◊ / ♦ KDEB_DX = k1_dx,                                    [fonction]
        ♦ KFIN_DX = k2_dx,                                    [fonction]
        ♦  FPRE_DX = fp _dx ,                                     [ R ]
    ◊ / ♦ KDEB_DY = k1_dy,                                    [fonction]
        ♦ KFIN_DY = k2_dy,                                    [fonction]
        ♦  FPRE_DY = fp _dy ,                                     [ R ]
    ◊ / ♦ KDEB_DZ = k1_dz,                                    [fonction]
        ♦ KFIN_DZ = k2_dz,                                    [fonction]
        ♦  FPRE_DZ = fp _dz,    [ R ]
)
```

12.8.2 Opérandes

La loi de comportement est bilinéaire élastique et nécessite 3 caractéristiques. Les unités des caractéristiques doivent être en accord avec celles du problème analysé : $k1$ et $k2$ sont homogènes à une force par déplacement, Fp est homogène à une force.



KDEB_DX = k1_dx, KDEB_DY = k1_dy, KDEB_DZ = k1_dz
La raideur du comportement lorsque l'effort dans le discret est inférieur Fp.
KFIN_DX = k2_dx, KFIN_DY = k2_dy, KFIN_DZ = k2_dz
La raideur du comportement lorsque l'effort dans le discret est supérieur à Fp.
FPRE_DX = fp_dx, FPRE_DY = fp_dy, FPRE_DZ = fp_dz
L'effort qui définit la transition entre les 2 comportements linéaires.

12.9 Mot clé facteur ASSE_CORN

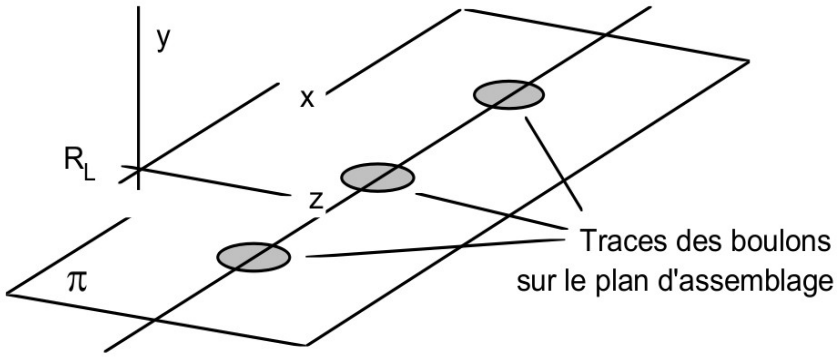
Description des caractéristiques matériau associées au comportement d'un assemblage boulonné [R5.03.32].

12.9.1 Syntaxe

```
|      ASSE_CORN = _F     (
                                        ♦      NU_1          =      nu1,
                [R]
                                        ♦      MU_1          =      mu1,
                [R]
                                        ♦      DXU_1         =      dxu1,
                [R]
                                        ♦      DRYU_1        =      dryu1,
                [R]
                                        ♦      C_1           =      c1,
                [R]
                                        ♦      NU_2          =      nu2,
                [R]
                                        ♦      MU_2          =      mu2,
                [R]
                                        ♦      DXU_2         =      dxu2,
                [R]
                                        ♦      DRYU_2        =dryu2,
                [R]
                                        ♦      C_2           =      c2,
                [R]
                                        ♦      KY                   =      ky,
                      [R]
                                        ♦      KZ                   =      kz,
                      [R]
                                        ♦      KRX           =      krx,
                [R]
                                        ♦      KRZ           =      krz,
                [R
                                        ◊      R_P0          =      /rp0,
                [R]
                                                                    /1.E-4
                                        )
```

12.9.2 Opérandes

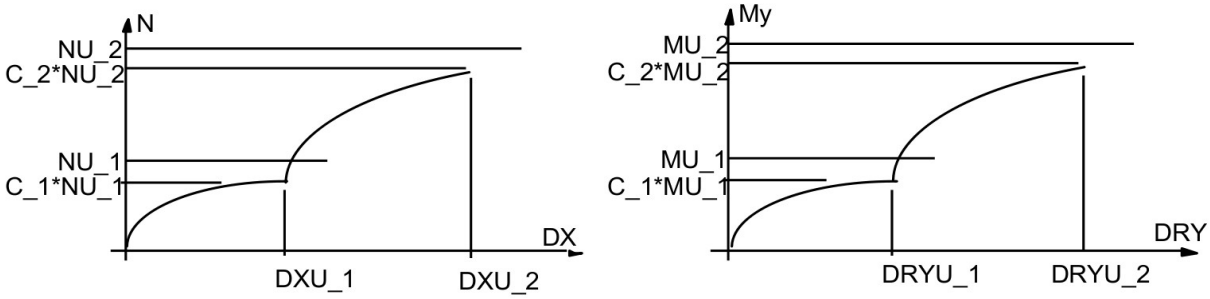
Sur la figure suivante, le plan π représente le plan de l'assemblage. L'axe des boulons est perpendiculaire à ce plan. Le lecteur se reportera à [U4.42.01] AFFE_CARA_ELEM pour l'orientation du repère R_L définissant le plan de l'assemblage.



La relation de comportement de l'assemblage est :

- non linéaire en translation suivant x et en rotation autour de y.
- linéaire suivant les autres degrés de libertés : DY , DZ , DRX , DRZ

Comportements en traction suivant l'axe x et en rotation autour de l'axe y.



Le comportement de la liaison est considéré linéaire dans les autres directions :

KY : raideur en translation suivant Y
KZ : raideur en translation suivant Z
KRX : raideur en rotation autour de X
KRZ : raideur en rotation autour de Z
R_P0 : Pente à l'origine ou de décharge

12.10 Mot clé facteur ARME

Description des caractéristiques matériau associées au comportement d'un armement de ligne aérienne.
Le bras de chaque armement de phase rompue, représenté par un élément discret, a un comportement non linéaire en force-déplacement constitué par la différence entre le déplacement maximal dlp de l'extrémité de l'armement dans la phase plastique et le déplacement élastique limite dle.

12.10.1 Syntaxe

```
| ARME = _F       (
                                    ♦  KYE  =  kye  ,
                  [R]
                                    ♦  DLE  =  dle  ,
                  [R]
                                    ♦  KYP  =  kyp  ,
                  [R]
                                    ♦  DLP  =  dlp  ,
                  [R]
                                    ♦  KYG  =  kyg
                  [R]
                            )
```

12.10.2 Opérandes KYE/DLE

KYE = kye
Pente élastique jusqu'à un effort limite.

DLE = dle
Déplacement limite de la déformation élastique.

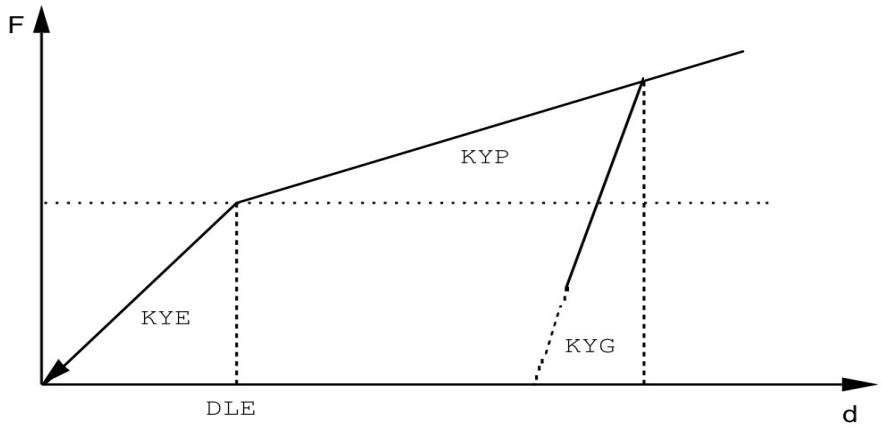
12.10.3 Opérande KYP/DLP

KYP = kyp
Pente plastique jusqu'au déplacement limite DLP.

DLP = dlp
Déplacement limite de la déformation plastique 0.

12.10.4 Opérande KYG

KYG = kyg
Pente de décharge.



12.11 Mot clé facteur RELAX_ACIER

Le phénomène de relaxation des aciers utilisés en précontrainte est réglementé. Les principaux règlements sont : BPEL83, NF-EN-1992-1-1 Octobre 2005, AFCEN-ETCC-2010,

On souhaite pouvoir modéliser des déformations qui vont varier lentement au cours du temps, notamment pour la prise en compte du fluage du béton et des variations de température. On souhaite également prendre en compte l'influence de la température sur le phénomènes de relaxation.
Réglementairement, il serait possible de tenir compte de l'effet du fluage du béton, de la déformation thermique en faisant une combinaison linéaire des différents phénomènes (Cf règlements pour plus de détails). Cette démarche est incompatible avec un calcul aux éléments finis .

Pour que la loi de relaxation soit utilisable dans un code aux éléments finis pour des calculs de structure avec des variations de chargements tels que : fluage du béton, reprise de tension des câbles, prise en compte de l'influence de la thermique, … elle doit être incrémentale et thermodynamiquement correcte.

La formulation adoptée est basée sur celle proposée par J.Lemaitre :

$$\sigma = E.\varepsilon^{e} \qquad \varepsilon = \varepsilon^{e} + \varepsilon^{an}$$

$$\dot{\varepsilon}^{an} = \left\langle \frac{\sigma - R\left(\varepsilon^{an}\right)}{f_{prg}.k} \right\rangle^{n} \quad \text{avec} \quad R\left(\varepsilon^{an}\right) = \frac{f_{prg}.c.\varepsilon^{an}}{\left(1+\left(b.\varepsilon^{an}\right)^{nr}\right)^{\frac{1}{nr}}} \qquad \text{[éq 12.11-1]}$$

La loi de comportement est 1D, et uniquement disponible pour les modélisations de type BARRE, qui sont utilisées pour modéliser les câbles de précontrainte dans l'opérateur DEFI_CABLE_BP.
Pour tenir compte de l'influence de la température sur la relaxation, tous les coefficients de la loi peuvent être des fonctions de la température.

Remarque :

Les paramètres c , b , n et nr sont sans unité, et donc indépendant des unités utilisées pendant l'étude. k est adimensionné par rapport à f_{prg} donc par rapport aux contraintes, mais pas par rapport au temps. En effet $\dot{\varepsilon}^{an}$ est homogène à $[s]^{-1}$, si l'unité de temps est en seconde. Donc si l'on connaît k pour une vitesse dans une unité de temps, il est nécessaire de convertir sa valeur en rapport à l'unité de temps utilisée lors de l'étude.

12.11.1 Syntaxe

```
          RELAX_ACIER =FACT( statut= 'f' ,
      F_PRG                    =SIMP( statut= ' f ' , typ=( fonction_sdaster ,
formule ) ,
                                      fr= "Contrainte limite à rupture " ) ,
      ECOU_ K =SIMP( statut= 'o' , typ=( fonction_sdaster , formule ) ,
                                      fr= " K de la fonction d'écoulement visqueux"
) ,
      ECOU_ N =SIMP( statut= 'o' , typ=( fonction_sdaster , formule ) ,
                                      fr= "Puissance de la fonction d'écoulement
visqueux" ) ,
      ECRO_ N =SIMP( statut= 'o' , typ=( fonction_sdaster , formule ) ,
                                      fr= "Puissance de la fonction d'écrouissage"
) ,
      ECRO_ B =SIMP( statut= 'o' , typ=( fonction_sdaster , formule ) ,
                                      fr= " B de la fonction d'écrouissage" ) ,
      ECRO_ C =SIMP( statut= 'o' , typ=( fonction_sdaster , formule ) ,
                                      fr= "Tangente à l'origine de la fonction
d'écrouissage" ) ,
) ,
```

f_{prg}	Contrainte à rupture du câble. Cette grandeur est facultative, car elle peut être également définie dans les matériaux BPEL_ACIER ou ETCC_ACIER et dans ce cas f_{prg} est une constante. La valeur/fonction donnée sous RELAX_ACIER_CABL est prioritaire.
ECOU_K ECOU_N	Correspond au coefficient k, dans l'équation 12.11-1. Correspond au coefficient n, dans l'équation 12.11-1.
ECRO_N ECRO_B ECRO_C	Correspond au coefficient nr, dans l'équation 12.11-1. Correspond au coefficient b, dans l'équation 12.11-1. Correspond au coefficient c, dans l'équation 12.11-1.

12.12 Mot clé facteur CABLE_GAINE_FROT

Ce matériau concerne uniquement les éléments CABLE_GAINE. Il permet de définir le comportement de frottement entre un câble et sa gaine ou entre un câble et le béton avoisinant. Il est possible de considérer un câble glissant, frottant ou adhérent. Pour son utilisation, voir le comportement KIT_CG dans U4.51.11.

12.12.1 Syntaxe

```
      |  CABLE_GAINE_FROT = _F      (
                                          ♦     TYPE   =     /'GLISSANT',

     /'FROTTANT',

     /'ADHERENT',                        [TXM]
                                          ♦     PENA_LAGR   =     pen    ,
                    [R]
                    # si TYPE='FROTTANT' :
                                          ◊     FROT_LINE   =     fl     ,
                          [R]                                             =
0.d0,                     [DEFAUT]
                                          ◊     FROT_COURB  =     fc     ,
                          [R]                                              =  0.d0,
                    [DEFAUT]
                                     )
```

```
Opérandes TYPE
          ♦     TYPE  =     /'GLISSANT',
                             /'FROTTANT',
                             /'ADHERENT',                    [TXM]
```

Cette opérande permet de définir s'il s'agit d'un câble glissant, frottant ou adhérent.

12.12.2 Opérande PENA_LAGR

```
          ♦     PENA_LAGR   =     pen    ,
```

Cette opérande définit le coefficient de pénalisation à prendre en compte. (Voir R3.08.10, §6.1 pour plus de détails).

12.12.3 Opérande FROT_LINE et FROT_COURB

```
          ◊     FROT_LINE   =     fl     ,
```

Coefficient de frottement rectiligne.

```
          ◊     FROT_COURB= fc     ,
```

Coefficient de frottement courbe.

12.13 Mot clé facteur FONDA_SUPERFI

Le comportement élastoplastique non linéaire d'une fondation superficielle rectangulaire soumise à une sollicitation tridimensionnelle statique ou sismique utilise les paramètres définis pour ce matériau, cf. R5.03.17] et [R5.03.31]. Cette loi de comportement s'applique sur les éléments discrets 3D composé d'un unique nœud en translation et rotation (DIS_TR) affecté d'une matrice de raideur diagonale (K_TR_D_N) au moyen de la relation FONDATION appelée par les opérateurs de résolution de problèmes non linéaires STAT_NON_LINE [R5.03.01] ou DYNA_NON_LINE [R5.05.05].

12.13.1 Syntaxe

```
| FONDA_SUPERFI = _F(
    ♦ LONG_X       = lx,                                        [R]
    ♦ LONG_Y       = ly,                                        [R]
    ♦ PHI          = phi,                                       [R]
    ◊ COHESION     = cohe,                                      [R]
    ◊ RAID_GLIS    = rg,                                        [R]
    ◊ GAMMA_REFE   = gr,                                        [R]
    ♦ CP_SERVICE   = cps,                                       [R]
    ◊ CP_ULTIME    = cpu,                                       [R]
    ◊ DEPL_REFE    = dr,                                        [R]
    ◊ RAID_CP_X    = rcpx,                                      [R]
    ◊ GAMMA_CP_X   = gcpx,                                      [R]
    ◊ RAID_CP_Y    = rcpy,                                      [R]
    ◊ GAMMA_CP_Y   = gcpy,                                      [R]
    ◊ RAID_CP_RX   = rcprx,                                     [R]
    ◊ GAMMA_CP_RX  = gcprx,                                     [R]
    ◊ RAID_CP_RY   = rcpry,                                     [R]
    ◊ GAMMA_CP_RY  = gcpry,                                     [R]
    ◊ DECOLLEMENT  = /'OUI',
                     /' NON' ,                                [DEFAUT]
  )
```

12.13.2 Opérandes LONG_X, LONG_Y

Longueur lx selon l'axe local x de la fondation (obligatoire).
Longueur ly selon l'axe local y de la fondation (obligatoire).

12.13.3 Opérandes PHI, COHESION

PHI = phi
Angle de frottement en degré à l'interface sol/fondation (obligatoire).

COHESION = cohe
Cohésion à l'interface sol/fondation (homogène à une raideur en translation, facultatif).
Par défaut égale à 0.

12.13.4 Opérande RAID_GLIS

Raideur de l'écrouissage du glissement rg (facultatif). Par défaut égale à 0.

12.13.5Opérande GAMMA_REFE

Paramètre gr de l'écrouissage cinématique (homogène à l'inverse d'une distance, facultatif).
Par défaut égal à 0.

12.13.6 Opérande CP_SERVICE, CP_ULTIME

Force limite d'élasticité cps de la fondation (obligatoire).
Force limite ultime cpu de la fondation (facultatif). Par défaut égale à 0.

12.13.7 Opérande DEPL_REFE

Tassement de référence dr pour l'écrouissage isotrope du critère de capacité portante (facultatif).
Par défaut égal à 0.

12.13.8 Opérandes RAID_CP_[X|Y|RX|RY], GAMMA_CP_[X|Y|RY|RY]

RAID_CP_ [X |Y|RX|RY] = rcp [x |y|rx|ry]
Raideur de l'écrouissage cinématique en translation ou en rotation selon x ou ydu critère de capacité portante (homogène à une raideur en translation, facultatif). Par défaut égale à 0.

GAMMA_CP_ [X |Y|RX|RY] = gcp [x |y|rx|ry]
Paramètre de l'écrouissage cinématique en translation ou en rotation selon x ou y du critère de capacité portante (homogène à l'inverse d'une distance, facultatif). Par défaut égal à 0.

12.13.9 Opérande DECOLLEMENT

Paramètre d'activation du mécanisme de décollement si égal à 'OUI'. (Facultatif et par défaut 'NON').

12.14 Mot clé facteur JONC_ENDO_PLAS

Ces paramètres servent à définir, à partir de l'analyse de la section de béton armé : géométrie et caractéristiques des matériaux, cf. [R5 . 0 3. 17], le comportement n on linéaire d'une liaison en flexion hors-plan, de jonction entre un voile et un plancher ou un radier, en béton armé, cf. [U2.02.03], à appliquer sur des éléments discrets de type DIS_TR sur des mailles SEG2 , à deux nœuds. Les moments M , tout comme les raideurs, s'entendent donc en unités de couple (longueur * force).

12.14.1 Syntaxe

```
| JONC_ENDO_PLAS = _F(
    ♦ K E        = k e ,                                    [R]
     ♦ K P        = k p ,                                    [R]
    ♦ K DP       = k dp ,                                   [R]
    ♦ K DM       = k dm ,                                   [R]
    ♦ R DP       = r dp ,                                   [R]
    ♦ R DM       = r dm ,                                   [R]
    ♦ M YP       = m yp ,                                   [R]
    ♦ M YM       = m ym ,                                   [R]
                                    )
```

12.14.2 Opérande KE

Raideur en rotation élastique $K_e>0$. On prendra la même valeur que celle renseignée dans AFFE_CARA_ELEM (DISCRET=(_F(CARA='K_TR_D_*',REPERE='LOCAL',...),),).

12.14.3 Opérande KP

Pente d'écrouissage plastique $K_p \leqslant K_e$.

12.14.4 Opérande KDP

Raideur tangente $K_d^+ \in \left[K_e, K_p \right]$ en phase endommageante pour la flexion positive.

12.14.5 Opérande KDM

Raideur tangente $K_d^- \in \left[K_e, K_p \right]$ en phase endommageante pour la flexion négative.

12.14.6 Opérande RDP

Rotation seuil d'endommagement $\theta_d^+ > 0$ en flexion positive.

12.14.7 Opérande RDM

Rotation seuil d'endommagement $\theta_d^- < 0$ en flexion négative .

12.14.8 Opérande MYP

Seuil de plasticité $M_y^+ \geqslant K_e \theta_d^+$ en flexion positive.

12.14.9 Opérande MYM

Seuil de plasticité $M_y^- \leqslant K_e \theta_d^-$ en flexion négative.

13 Matériau fluide

13.1 Mot clé facteur FLUIDE

Définitions des caractéristiques de fluide constantes.

13.1.1 Syntaxe

```
|      FLUIDE = _F      (
                                    ♦     RHO         =     rho    ,
                [R]
                                    ◊     CELE_R      =     celr,
                [R]
                                    ◊     CELE_C      =     celc,
                [C]
                                    ◊     PESA_Z      =     pz,
                [R]
                                    )
```

13.1.2 Opérande RHO

RHO = rho
Masse volumique du fluide. Pas de vérification.

13.1.3 Opérandes CELE_R/ CELE_C

CELE_R = celr
Célérité de propagation des ondes acoustiques dans le milieu fluide (type réel).
Pas de vérification de l'ordre de grandeur.

CELE_C = celc
Célérité de propagation des ondes acoustiques dans le milieu fluide (type complexe notamment pour un milieu poreux). Pas de vérification de l'ordre de grandeur.

Pour une modélisation en PHENOMENE : ACOUSTIQUE (commande AFFE_MODELE [U4.41.01]) seule la définition de la célérité à l'aide du mot clé CELE_C est valide.

La définition à l'aide du mot clé CELE_R conduit à un arrêt en erreur.

Remarque : lorsqu'on utilise une modélisation de type fluide (3D_FLUIDE par exemple) et que l'on met RHO=0. et CELE_R=0., on obtient des matrices de masse et de rigidité vraiment nulles par CALC_MATR_ELEM. (voir [R4.02.02]).

13.1.4 Opérande PESA_Z

PESA_z = pz,
Accélération de la pesanteur selon l'axe z, utilisée uniquement et obligatoire si la modélisation choisie dans AFFE_MODELE est 2D_FLUI_PESA (ondes de gravité et modes de ballottement dans le fluide).

14 Données matériaux associées à des post-traitements

14.1 Mot clé facteur **FATIGUE**

On pourra se reporter à [R7.04.01] et [R7.04.03] .

14.1.1 Syntaxe

```
|    FATIGUE = _F      (
/◊   WOHLER            =     f_wohl,          [fonction]
/◊   A_BASQUIN         =     A,               [R]
 ◊   BETA_BASQUIN      =     beta,            [R]
/◊   A0                =     a0,              [R]
 ◊   A1                =     a1,              [R]
 ◊   A2                =     a2,              [R]
 ◊   A3                =     a3,              [R]
 ◊   SL                =     SL,              [R]
 ◊ MANSON_COFFIN       =     f_mans,          [fonction]
 ◊   E_REFE            =     Ec,              [R]
 ◊   D0                =     d0,              [R]
 ◊   TAU0              =     tau0,            [R]
                             )
```

14.1.2 Opérande **WOHLER**

Cet opérande permet d'introduire la courbe de Wöhler du matériau sous une forme discrétisée point par point. Cette fonction donne le nombre de cycles à la rupture N_{rupt} en fonction de la demi-amplitude de contrainte $\frac{\Delta\sigma}{2}$. .

La courbe de Wöhler est une fonction pour laquelle l'utilisateur choisit le mode d'interpolation :

- `LOG LOG` : interpolation logarithmique sur le nombre de cycles à la rupture et sur la demi-amplitude de la contrainte (formule de Basquin par morceaux),
- `LIN LIN` : interpolation linéaire sur le nombre de cycles à la rupture et sur la demi amplitude de la contrainte (cette interpolation est déconseillée car la courbe de Wöhler n'est absolument pas linéaire dans ce repère),
- `LIN LOG` : interpolation en linéaire sur la demi-amplitude de contrainte, et logarithmique sur le nombre de cycles à la rupture, ce qui correspond à l'expression donnée par Wöhler.

L'utilisateur doit également choisir le type de prolongement de la fonction à droite et à gauche.

14.1.3 Opérandes **A_BASQUIN / BETA_BASQUIN**

```
A_BASQUIN        = A
BETA_BASQUIN     = beta
```

Ces opérandes permettent d'introduire la courbe de Wöhler du matériau sous la forme analytique de BASQUIN [R7.04.01].

$D = A S_{alt}^{\beta}$ où A et β sont deux constantes du matériau,

S_{alt} = contrainte alternée du cycle = $\frac{\Delta\sigma}{2}$ et D le dommage élémentaire.

14.1.4 Opérandes **A0 / A1 / A2 / A3 / SL**

```
A0   = a0,  A1   = a1, A2    = a2, A3    = a3, SL    = SL
```

Ces opérandes permettent de définir sous forme analytique la courbe de Wöhler en "zone courante" [R7.04.01].

S_{alt} = contrainte alternée = $\frac{1}{2}\frac{E_C}{E}\Delta\sigma$

$$X = log_{10}\left(S_{alt}\right)$$

$$N_{rupt} = 10^{a0+a1x+a2x^2+a3x^3}$$

$$D = \begin{cases} 1/N \text{ si } S_{alt} \geq S_l \\ 0. \text{ sinon} \end{cases}$$

Cette liste d'opérandes permet d'introduire les divers paramètres de cette forme analytique.

$a0$, $a1$, $a2$ et $a3$ constantes du matériau,

S_l limite d'endurance du matériau.

Le module de Young E est introduit dans DEFI_MATERIAU (mot clé facteur ELAS opérande E).

La valeur de Ec , module de Young associé à la courbe de fatigue du matériau est également introduite dans DEFI_MATERIAU sous le mot clé facteur FATIGUE, opérande E_REFE.

14.1.5 Opérande MANSON_COFFIN

MANSON_COFFIN = f_mans
Cet opérande permet d'introduire la courbe de Manson-Coffin du matériau sous une forme discrétisée point par point. Cette fonction donne le nombre de cycles à la rupture en fonction de la demi-amplitude de déformations $\frac{\Delta\varepsilon}{2}$.

14.1.6 Opérande E_REFE

E_REFE = Ec
Cet opérande permet de spécifier la valeur du module de Young associé à la courbe de fatigue du matériau. Cette valeur permet entre autre, de définir la courbe de Wöhler en "zone courante" [R7.04.01].

14.1.7 Opérandes D0/TAU0

D0 = d0
Permet de spécifier la valeur de la limite d'endurance en traction-compression pure alternée. Cette valeur est utilisée dans le calcul des critères de Crossland et Dang Van Papadopoulos [R7.04.01] par la commande de POST_FATIGUE [U4.83.01].

TAU0 = tau0
Permet de spécifier la valeur de la limite d'endurance en cisaillement pur alterné. Cette valeur est utilisée dans le calcul des critères de Crossland et Dang Van Papadopoulos [R7.04.01] par la commande de POST_FATIGUE [U4.83.01].

14.2 Mot clé facteur DOMMA_LEMAITRE

Sous ce mot clé facteur sont regroupées toutes les caractéristiques matériau nécessaires au calcul du dommage de Lemaitre et la loi de Lemaitre-Sermage (option ENDO_ELGA de CALC_CHAMP, [U4.81.04]).

14.2.1 Syntaxe

```
| DOMMA_LEMAITRE = _F      (
```

```
                                    ♦      S = s,
                                [fonction]
                                    ♦      EPSP_SEUIL = Pseuil,
            [fonction]
                                    ◊      EXP_S            =     /     pd,
                        [R]                                                 /
      1.0                       [DEFAUT]
                                     )
```

14.2.2 Opérande S

S = s

S est un paramètre matériau nécessaire au calcul du dommage de Lemaitre. S doit être une fonction du paramètre $TEMP$.

14.2.3 Opérande EPSP_SEUIL

EPSP_SEUIL = Pseuil

Permet de spécifier la valeur du seuil d'endommagement pd , nécessaire au calcul du dommage de Lemaitre.

14.2.4 Opérande EXP_S

EXP_S = pd

Permet de définir la loi de Lemaitre-Sermage, la valeur par défaut (1.0) correspond au calcul du dommage de Lemaitre.

14.3 Mot clé facteur CISA_PLAN_CRIT

Sous ce mot clé facteur sont regroupées toutes les caractéristiques matériau nécessaires à la mise en œuvre des critères avec plans critiques [R7.04.04].

14.3.1 Syntaxe

```
◊     | CISA_PLAN_CRIT = _F   (
                                    ♦ CRITERE =/ 'MATAKE_MODI_AC',
      [TXM]
                                                 / 'DANG_VAN_MODI_AC
',          [TXM]
                                                 / 'MATAKE_MODI_AV',
                  [TXM]
                                                 / 'DANG_VAN_MODI_AV',
            [TXM]
                                                 / 'FATESOCI_MODI_AV',
            [TXM]

                  #Si CRITERE == 'MATAKE_MODI_AC' OU 'MATAKE_MODI_AV' :
                                    ♦ MATAKE_A = a,
                  [R]
                                    ♦ MATAKE_B = b,
                  [R]
                                    ♦ COEF_FLEX_TORS = c_flex_tors,
      [R]
                        #FinSi

                  #Si CRITERE == 'DANG_VAN_MODI_AC' OU 'DANG_VAN_MODI_AV' :
                                    ♦ D_VAN_A = a,
                        [R]
```

```
                                    ♦ D_VAN_B = b,
                        [R]
                                    ♦ COEF_CISA_TRAC = c_cisa_trac,
        [R]
                        #FinSi

                    #Si CRITERE == ' FATESOCI_MODI_AV' :
                                    ♦ FATSOC_A = a,
                    [R]
                                    ♦ COEF_CISA_TRAC = c_cisa_trac,
        [R]
                        #FinSi
                                    )
```

14.3.2 Opérande MATAKE_A

MATAKE_A = a,

Permet de spécifier la valeur du coefficient sans dimension a , présent dans les critères MATAKE_MODI_AC et MATAKE_MODI_AV , confer [R7.04.01] et [U4.83.02].

14.3.3 Opérande MATAKE_B

MATAKE_B = b,

Permet de spécifier la valeur du coefficient b , présent dans les critères MATAKE_MODI_AC et MATAKE_MODI_AV , confer [R7.04.01] et [U4.83.02].

14.3.4 Opérande COEF_FLEX_TORS

COEF_FLEX_TORS = c_flex_tors,
Permet de spécifier la valeur du rapport des limites d'endurance en flexion et torsion alternées, confer [R7.04.01] et [U4.83.02]. Cette valeur doit être supérieure ou égale à un et inférieure ou égale à $\sqrt{3}$. Cet opérande est à utiliser dans les critères : MATAKE_MODI_AC et MATAKE_MODI_AV .

14.3.5 Opérande D_VAN_A

D_VAN_A = a,
Permet de spécifier la valeur du coefficient sans dimension a , présent dans les critères DANG_VAN_MODI_AC et DANG_VAN_MODI_AV , confer [R7.04.01] et [U4.83.02].

14.3.6 Opérande D_VAN_B

D_VAN_B = b,
Permet de spécifier la valeur du coefficient b , présent dans les critères DANG_VAN_MODI_AC et DANG_VAN_MODI_AV , confer [R7.04.01] et [U4.83.02].

14.3.7 Opérande COEF_CISA_TRAC

COEF_CISA_TRAC = c_cisa_trac,
Permet de spécifier la valeur du rapport des limites d'endurance en flexion et torsion alternées, confer [R7.04.01] et [U4.83.02]. Cette valeur doit être supérieure ou égale à un et inférieure ou égale à $\sqrt{3}$. Cet opérande est à utiliser dans les critères : DANG_VAN_MODI_AC , DANG_VAN_MODI_AV et FATESOCI_MODI_AV , confer [R7.04.01] et [U4.83.02].

14.3.8 Opérande FATSOC_A

FATSOC_A = a,

Permet de spécifier la valeur du coefficient a , présent dans le critère FATESOCI_MODI_AV , confer [R7.04.01] et [U4.83.02].

14.4 Mot clé facteur WEIBULL, WEIBULL_FO

Définition des coefficients du modèle de Weibull [R7.02.06].
Brièvement, la probabilité de rupture cumulée de rupture P_r d'une structure s'écrit, dans le cas d'un chargement monotone :

$$P_r = 1 - \exp\left[-\sum_{V_p}\left(\left(\frac{\sigma_I}{\sigma_u}\right)^m \frac{V_p}{V_0}\right)\right]$$

où la sommation porte sur les mailles V_p plastifiées (c'est à dire déformation plastique cumulée supérieure à une valeur choisie arbitrairement p_s) et m, s_u, V_0 sont les paramètres du modèle de Weibull.

Dans le cas d'un trajet de chargement quelconque :

$$P_r(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma_w}{\sigma_u}\right)^m\right]$$

avec :

$$\sigma_{\omega^m} = \sum_V \left[\underset{[u<t,\ \dot{p}(u)>0]}{max}\left\{\tilde{\sigma}_I(u)\right\}\right]^m \frac{V}{V_0},$$

$\dot{p}$ désignant le taux de déformation plastique cumulée, $\tilde{\sigma}_I$ la plus grande contrainte principale à l'instant t [R7.02.06].

Enfin, si la contrainte de clivage dépend de la température (WEIBULL_FO) :

$$P_r(t) = 1 - exp\left[-\left(\frac{\sigma_\omega^0}{\sigma_u^0}\right)^m\right],$$

σ_ω^0 désignant la contrainte de Weibull définie conventionnellement pour σ_u^0 donnée :

$$\sigma_\omega^{0^m} = \sum_V \underset{[u<t,\ \dot{p}(u)>0]}{max}\left[\frac{\sigma_u^0 . \sigma_I(u)}{\sigma_u(\theta(u))}\right]^m \frac{V}{V_0} A^{p^m}$$

$\theta(u)$ désignant la température dans l'élément δV.

14.4.1 Syntaxe

```
  | / WEIBULL       = _F (
                                ♦       M
=     m,                        [R]
                                ♦       SIGM_REFE               =
sigmu,              [R]
                                ♦       VOLU_REFE               =     V0,
              [R]
                                ◊       SEUIL_EPSP_CUMU  =     /ps   ,
       [R]

       /10-6              [DEFAUT]
                                )
    /     WEIBULL_FO = _F   (
```

```
                                        ♦       M
=      m,                               [R]
                                        ♦       SIGM_REFE               =
sigmu,              [fonction]
                                        ♦       SIGM_CNV                =
sigm0u,             [R]
                                        ♦       VOLU_REFE               =      V0,
              [R]
                                        ◊       SEUIL_EPSP_CUMU  =      /ps,
       [R]

       /10-6,               [DEFAUT]
                                        )
```

14.4.2 Opérandes

M = m, SIGM_REFE = sigmu, SIGM_CNV = sigm0u, VOLU_REFE = V0

Paramètres associés au modèle de Weibull.

SEUIL_EPSP_CUMU = ps

Déformation plastique cumulée seuil.

14.5 Mots clés facteur RCCM, RCCM_FO

Définition des grandeurs nécessaires à l'utilisation des méthodes simplifiées définies dans le règlement RCC-M [R7.04.03]. Ces grandeurs sont constantes ou fonction du paramètre 'TEMP'.

14.5.1 Syntaxe

```
|       /     RCCM    = _F (
                                        ◊       SY_02           =      sy,
              [R]
                                        ◊       SM              =      sm,
                    [R]
                                        ◊       SU              =      su,
                    [R]
                                        ◊       SC              =      sc,
                    [R]
                                                ◊       SH              =      sh,
                    [R]
                                        ◊       N_KE            =      h,
                    [R]
                                        ◊       M_KE            =      m,
                    [R]
                                        ◊       A_AMORC         =      a,
                    [R]
                                        ◊       B_AMORC         =      b,
                    [R]
                                        ◊       D_AMORC         =      d,
                    [R]
                                        ◊       R_AMORC         =      r,
                    [R]
                                         )
        /      RCCM_FO = _F (
                                        ◊       SY_02           =      sy,
              [fonction]
                                        ◊       SM              =      sm,
                    [fonction]
                                        ◊       SU              =      su,
                    [fonction]
```

```
                ◊      S                =      s ,
[fonction]
                ◊      SH               =      sh,
[fonction]
                ◊      N_KE       =     h,
[fonction]
                ◊      M_KE       =     m,
[fonction]
                ◊      A_AMORC    =     a,
[fonction]
                ◊      B_AMORC    =     b,
[fonction]
                ◊      D_AMORC    =     d,
[fonction]
                ◊      R_AMORC    =     r,
[fonction]
                 )
```

14.5.2 Opérande SY_02

SY_02 = sy
Limite d'élasticité à 0,2% de déformation plastique à la température de calcul. Cet opérande peut varier en fonction de la température.

14.5.3 Opérandes SM/SU/SH

SM = sm
Contrainte équivalente admissible du matériau à la température de calcul. Cet opérande peut varier en fonction de la température.

SU = su
Résistance à la traction du matériau à la température de calcul. Cet opérande peut varier en fonction de la température.

Sh = sh
Contrainte admissible du matériau à la température ambiante, confer POST_RCCM[U4.83.11].
Contrainte admissible du matériau à la température maximale, confer POST_RCCM[U4.83.11].

14.5.4 Opérande SC

SC = sc
Contrainte admissible du matériau à la température ambiante, confer POST_RCCM [U4.83.11].

14.5.5 Opérande S

S = s
Contrainte admissible du matériau. Cet opérande varie en fonction de la température, confer POST_RCCM [U4.83.11].

14.5.6 Opérandes N_KE/M_KE

N_KE = n, M_KE = m
Ces opérandes permettent de définir les valeurs de n et m deux constantes du matériau.

Ces caractéristiques sont nécessaires pour le calcul du coefficient de concentration élasto-plastique K_e, qui est défini par le RCC-M comme étant le rapport entre l'amplitude de déformation réelle et l'amplitude de déformation déterminée par l'analyse élastique.

$$\begin{cases} K_e = 1 & \text{si} \quad \Delta\sigma \leq 3S_m \\ K_e = 1 + (1-n)\left(\dfrac{\Delta\sigma}{3S_m} - 1\right)(n(m-1)) & \text{si} \quad 3S_m < \Delta\sigma \leq 3S_m \\ K_e = \dfrac{1}{n} & \text{si} \quad 3mS_m \leq \Delta\sigma \end{cases}$$

14.5.7 Opérandes A_AMORC/B_AMORC

A_AMORC = a, B_AMORC = b

Coefficients de la loi d'amorçage.

14.5.8 Opérande D_AMORC

D_AMORC = d
Distance d'extraction des contraintes.

14.5.9 Opérande R_AMORC

R_AMORC = r
Paramètre de la relation entre contrainte et contrainte efficace.

14.6 Mot clé facteur CRIT_RUPT

Définition des quantités nécessaires au critère de rupture en contrainte critique mis en œuvre par le mot-clé POST_ITER/CRIT_RUPT sous COMPORTEMENT. Si la plus grande contrainte principale moyenne dans un élément dépasse un seuil donné sigc, le module d'Young est divisé par le coefficient coef.
Ce critère est disponible pour les lois de comportement VISCOCHAB, VMIS_ISOT_TRAC(_LINE) et VISC_ISOT_TRAC (_LINE) , et validé par les tests SSNV226A,B,C.

14.6.1 Syntaxe

```
CRIT_RUPT    = _F ( ◊  SIGM_C          =     sigc,
     [R]
                                    ◊     COEF        =     coef,
                  [R]    )
```

Opérandes SIGM_C, COEF
Valeur de la contrainte seuil sigc (en unité de contraintes) et du coefficient coef (sans unité).

14.7 Mot clé facteur REST_ECRO

Définition des données nécessaires à la prise en compte du phénomène de restauration d'écrouissage mis en œuvre par le mot-clé POST_INCR/'REST_ECRO' sous COMPORTEMENT. A la fin de chaque pas de temps de calcul, les variables d'écrouissages sont multipliées par la fonction foncmult, à valeurs réelles dans [0,1], et qui dépend de la température et éventuellement du temps.
Ce critère est disponible pour les lois de comportement VMIS_ISOT_TRAC(_LINE), VMIS_CINE_LINE, VMIS_ECMI_LINE, VMIS_CIN1_CHAB et VMIS_CIN2_CHAB, et pour les modélisations 3D, AXIS, D_PLAN et C_PLAN.

14.7.1 Syntaxe

REST_ECRO = _F (

```
                    ♦  FONC_MULT  = foncmult,
                [fonction]
                    )
```

14.7.2 Opérande FONC_MULT

Paramètres de restauration d'écrouissage définis dans la fonction foncmult (sans unité).

14.8 Mot clé facteur VERI_BORNE

Ce mot clé permet une vérification du domaine de validité des paramètres d'une loi de comportement. En effet, l'identification des paramètres de ces lois est toujours faite dans une certaine gamme de déformation et de température. L' objectif est d'avertir l'utilisateur si dans son étude il sort de ce domaine où les paramètres ont été identifiés. Ces bornes sont définies sous le mot clé VERI_BORNE . Le dépassement des bornes au cours du calcul, se traduit par l' émission d'une alarme.

14.8.1 Syntaxe

```
VERI_BORNE = _F (◊     EPSI_MAXI   =     epsi                          [R]
                                   ◊     VEPS_MAXI   =     veps,
                  [R]
                                   ◊     TEMP_MINI   =     tmin,
                  [R]
                                   ◊     TEMP_MAXI   =     tmax,
                  [R]
                              )
```

14.8.2 Opérandes

Valeur des bornes en termes de déformation totale maximum, vitesse de déformation, et températures extrêmes.

14.9 Mots-clés facteurs POST_ROCHE et POST_ROCHE_FO

Matériau dédié uniquement à la macro-commande POST_ROCHE . Il intègre des paramètres matériau liés à la loi de plasticité de Ramberg-Osgood, ainsi que des paramètres issue du RCCM-Rx.

Les paramètres de type fonction peuvent dépendre de la température uniquement. Le champ de température est fourni via AFFE_MATERIAU/AFFE_VARC/CHAM_GD ou EVOL. Il est préférable d'utiliser le mot-clé CHAM_GD, mais si l'on est contraint d'utiliser le mot-clé EVOL, il est alors nécessaire de préciser l'instant à prendre en compte dans POST_ROCHE en donnant le mot-clé INST_TEMP.

14.9.1 Syntaxe

```
      |      POST_ROCHE =_F    (
                   ♦     RAMB_OSGO_FACT    =     K,                    [R]
                   ♦     RAMB_OSGO_EXPO    =     n,                    [R]
                   ◊     RP02_MIN          =     rp02min,              [R]
                   ◊     RM_MIN            =     rmmin,                [R]
                   ◊     RP02_MOY          =     rp02moy,              [R]
                                                  1,25*rp02min,     [DEFAUT]
                   ◊     COEF              =     coef,                 [R]
                                            =     1                 [DEFAUT]
                                                  )

 POST_ROCHE_ FO =_F      (
                   ♦     RAMB_OSGO_FACT    =     K,               [fonction]
                   ♦     RAMB_OSGO_EXPO    =     n,               [fonction]
```

```
◊      RP02_MIN          =      rp02min,          [fonction]
◊      RM_MIN            =      rmmin,            [fonction]
◊      RP02_MOY          =      rp02moy,          [fonction]
                                  1,25*rp02min,      [DEFAUT]
◊      COEF              =      coef,                   [R]
                           =     1                  [DEFAUT]
```

14.9.2 Opérandes liées à la loi Ramberg-Osgood

La loi de plasticité de Ramberg-Osgood est définie par la courbe de déformation en fonction de la contrainte selon l'expression suivante :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{M,p}(\sigma) \qquad \text{avec} \quad \varepsilon_{M,p}(\sigma) = K\left(\frac{\sigma}{E}\right)^{1/n}$$

E correspond au module de Young, K et n sont les paramètres du mot-clé POST_ROCHE .

14.9.3 Opérandes liés à la codification du RCCM-Rx

RP02_MIN : limite conventionnelle d'élasticité minimale à 0,2% de déformation
Ce paramètre est obligatoire :

- sur les parties définies comme « coudes » dans l'opérateur POST_ROCHE
- sur toutes la ligne de tuyauterie si RCCM_RX='OUI' dans POST_ROCHE

Il n'est pas utilisé dans les autres cas.

RM_MIN : résistance à la traction minimale
Ce paramètre est obligatoire sur toutes la ligne de tuyauterie si RCCM_RX='OUI' dans POST_ROCHE .
Il n'est pas utilisé dans les autres cas.

RP02_MOY : limite conventionnelle d'élasticité moyenne à 0,2% de déformation
Ce paramètre est nécessaire sur toutes la ligne de tuyauterie si RCCM_RX='OUI' dans POST_ROCHE , s'il n'est pas fourni dans ce cas, il est considéré égal à 1,25*rp02min. Il n'est pas utilisé dans les autres cas.

COEF : Coefficient adimensionnel
Ce paramètre est utilisé uniquement si RCCM_RX='OUI' dans POST_ROCHE .

15 Données matériaux associées à des comportements externes

15.1 Mots clés facteur MFRONT, MFRONT_FO

Définition des paramètres relatifs à une loi de comportement « utilisateur » définie dans le formalisme MFront [U2.10.02]. Ces grandeurs sont constantes ou fonction du paramètre 'TEMP'. Il est possible de fournir jusqu'à 197 paramètres.

15.1.1 Syntaxe

```
|       /     MFRONT = _F (     ♦     LISTE_COEF  =     (c1,c2,...)
[l_R]
                                       )
        /     MFRONT_FO = _F ( ♦     LISTE_COEF  =     (c1,c2,...)
[l_fonction]
                                       )
```

15.2 Mots clés facteur UMAT, UMAT_FO

Définition des paramètres relatifs à une loi de comportement « utilisateur », c'est-à-dire dont la routine d'intégration du comportement est fournie par l'utilisateur [U2.10.01]. Ces grandeurs sont constantes ou fonction du paramètre 'TEMP'. Il est possible de fournir jusqu'à 197 paramètres.

15.2.1 Syntaxe

```
|       /     UMAT = _F (            ♦     LISTE_COEF  =
(c1,c2,...) [l_R]
                                  )
        /     UMAT_FO = _F (    ♦     LISTE_COEF  =     (c1,c2,...)
[l_fonction]
                                       )
```

16 Mot clé simple MATER

La commande DEFI_MATERIAU peut être ré-entrante mais chaque comportement reste unique. On ne permet en effet pas de remplacer un comportement déjà présent dans le matériau mais seulement enrichir la structure de donnée de caractéristiques matériau supplémentaires.

Exemple d'utilisation :
Seules les caractéristiques thermique du matériau sont définies dans un premier temps. Puis, après la résolution thermique, on ajoute les propriétés mécaniques sous ELAS :

```
ACIER_TH=DEFI_MATERIAU( THER=_F(    LAMBDA=54.6,

     RHO_CP=3710000.0,),);

CHM=AFFE_MATERIAU(           MAILLAGE=MAIL,
                                    AFFE=_F(    TOUT='OUI',
                                                MATER=ACIER_TH,

     TEMP_REF=20.0,),);


TEMPE=THER_LINEAIRE(    MODELE=MODETH, ...


ACIER_TH=DEFI_MATERIAU( reuse=ACIER_TH,
                                    MATER=ACIER_TH,
```

```
                                                ELAS=_F(    E=204000000000.0,
                                                            NU=0.3,
                                                            ALPHA=1.092e-
05,),);

RESUT=MECA_STATIQUE(MODELE=MODMECA, ...
```