

## Opérateur DEFI\_MATERIAU

---

### 1 But

---

Définir le comportement d'un matériau ou les paramètres associés à la fatigue, au dommage, ou aux méthodes simplifiées.

Les lois de comportement admises 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 comportements, tels que élastique, thermique, ...

Produit une Structure de données de type `mater`.

## Table des Matières

1 But.....	1
2 Syntaxe générale.....	12
3 Comportements élastiques généraux.....	16
3.1 Mots clés facteur ELAS, ELAS_FO.....	16
3.1.1 Syntaxe.....	16
3.1.2 Opérandes E/NU .....	16
3.1.3 Opérande RHO .....	16
3.1.4 Opérandes ALPHA/TEMP_DEF_ALPHA/PRECISION.....	16
3.1.5 Opérandes AMOR_ALPHA / AMOR_BETA / AMOR_HYST.....	17
3.1.6 Opérandes K_DESSIC / B_ENDOGE.....	17
3.1.7 Opérande FONC_DESORP.....	18
3.2 Mot clé facteur ELAS_FLUI.....	18
3.2.1 Syntaxe.....	18
3.2.2 Opérandes RHO/E/NU .....	18
3.2.3 Opérandes PROF_RHO_F_INT/PROF_RHO_F_EXIT/COEF_MASS_AJOU.....	19
3.3 Mot clé facteur CABLE.....	19
3.3.1 Syntaxe.....	19
3.3.2 Opérandes d'élasticité.....	19
3.4 Mots clés facteur ELAS_ORTH, ELAS_ORTH_FO.....	19
3.4.1 Syntaxe.....	19
3.4.2 Opérandes d'élasticité.....	20
3.4.3 Opérande RHO.....	21
3.4.4 Opérandes ALPHA_L / ALPHA_T / ALPHA_N.....	21
3.4.5 Opérandes TEMP_DEF_ALPHA / PRECISION.....	22
3.4.6 Critères de rupture.....	22
3.5 Mots clés facteur ELAS_ISTR, ELAS_ISTR_FO.....	22
3.5.1 Syntaxe.....	22
3.5.2 Opérandes d'élasticité.....	23
3.5.3 Opérande RHO.....	24
3.5.4 Opérandes ALPHA_L / ALPHA_N.....	24
3.5.5 Opérandes TEMP_DEF_ALPHA / PRECISION.....	24
3.6 Mot clés facteur ELAS_COQUE, ELAS_COQUE_FO.....	24
3.6.1 Syntaxe.....	24
26	
3.7 Mot clé simple ELAS_HYPER.....	26
3.7.1 Syntaxe.....	26
3.7.2 Opérandes C01, C10 et C20.....	26
3.7.3 Opérande NU et K.....	26
3.7.4 Opérande RHO.....	27
4 Comportements mécaniques non linéaires généraux.....	28

4.1 Mot clé facteur TRACTION.....	28
4.1.1 Syntaxe.....	28
4.1.2 Opérande SIGM.....	28
4.2 Mots clés facteur ECRO_LINE , ECRO_LINE_FO.....	28
4.2.1 Syntaxe.....	28
4.2.2 Opérandes.....	28
4.3 Mots clés facteur PRAGER, PRAGER_FO.....	29
4.3.1 Syntaxe.....	29
4.4 Mots clés facteur ECRO_PUIS, ECRO_PUIS_FO.....	29
4.4.1 Syntaxe.....	29
4.4.2 Opérandes.....	29
4.5 Mots clés facteur CIN1_CHAB, CIN1_CHAB_FO .....	30
4.5.1 Syntaxe.....	30
4.6 Mots clés facteur CIN2_CHAB, CIN2_CHAB_FO .....	31
4.6.1 Syntaxe.....	32
4.7 Mots clés facteurs VISCOCHAB, VISCOCHAB_FO.....	32
4.7.1 Syntaxe.....	33
4.8 Mots clé facteur MEMO_ECRO.....	33
4.8.1 Syntaxe.....	34
4.8.2 Opérandes.....	34
4.9 Mots clés facteur TAHERI, TAHERI_FO.....	34
4.9.1 Syntaxe.....	35
4.10 Mots clés facteurs ECOU_VISC1, ECOU_VISC2, ECOU_VISC3, ECRO_CINE1, ECRO_CINE2, ECRO_ISOT1, ECRO_ISOT2, KOCKS_RAUCH .....	35
4.10.1 Syntaxe.....	37
4.11 Mots clés facteur LEMAITRE, LEMAITRE_FO .....	38
4.11.1 Syntaxe .....	38
4.12 Mot clé facteur VISC_SINH.....	39
4.12.1 Syntaxe.....	39
4.13 Mot clé LEMA_SEUIL .....	39
4.13.1 Syntaxe.....	40
4.14 Mot clé facteur VISC_IRRA_LOG.....	40
4.14.1 Syntaxe.....	41
4.15 Mot clé facteur GRAN_IRRA_LOG.....	41
4.15.1 Syntaxe.....	41
4.16 Mots clés facteur LMARC, LMARC_FO.....	41
4.16.1 Syntaxe .....	42
4.17 Mots clés facteur IRRAD3M.....	43
4.17.1 Syntaxe.....	43
4.17.2 Opérandes R02/RM/EPSI_U/KAPPA.....	43
4.17.3 Opérandes AI02/ZETA_F/ETAI_S.....	43
4.17.4 Opérandes RG0/ALPHA/PHI0/ZETA_G.....	43

5 Comportements liés à l'endommagement et la rupture.....	44
5.1 Mots clés facteur ROUSSELIER, ROUSSELIER_FO.....	44
5.1.1 Syntaxe.....	45
5.2 Mots clés VENDOCHAB / VENDOCHAB_FO .....	45
5.2.1 Syntaxe.....	46
5.3 Mot clé facteur NON_LOCAL.....	47
5.3.1 Syntaxe.....	47
5.3.2 Opérandes LONG_CARACOEFFRIGMINI/C_GONF/PENA_LAGR.....	47
5.4 Mot clé facteur RUPT_FRAG, RUPT_FRAG_FO.....	47
5.4.1 Syntaxe.....	48
5.4.2 Opérande RUPT_FRAG.....	48
5.4.3 Opérande SIGM_C.....	48
5.4.4 Opérande PENADHERENCE.....	48
5.4.5 Opérande PENACONTACT.....	48
5.4.6 Opérandes PENALAGR et RIGI_GLIS.....	48
5.5 Mot clé facteur CORR_ACIER.....	48
5.5.1 Syntaxe.....	48
5.5.2 Opérande D_CORR.....	49
5.5.3 Opérandes ECRO_K, ECRO_M.....	49
5.5.4 Opérande SY .....	49
6 Comportements thermiques.....	50
6.1 Mots clés facteur THER, THER_FO.....	50
6.1.1 Syntaxe.....	50
6.1.2 Opérandes LAMBDA / RHO_CP.....	50
6.2 Mot clé facteur THER_ORTH.....	50
6.2.1 Syntaxe.....	50
6.2.2 Opérandes LAMBDA / RHO_CP.....	51
6.3 Mot clé facteur THER_NL .....	51
6.3.1 Syntaxe.....	51
6.3.2 Opérandes BETA / LAMBDA / RHO_CP.....	51
6.4 Mots clés facteur THER_COQUE, THER_COQUE_FO.....	51
6.4.1 Syntaxe.....	52
6.4.2 Opérandes CONDLMM / CONDLMP / CONDLPP / CONDL_SI / CONDTMM / COND_TMP / COND_TPP / COND_TSI.....	52
6.4.3 Opérandes CONDNMM / COND_NMP / COND_NPP / COND_NSI.....	53
6.4.4 Opérandes CMAS_MM / CMAS_MP / CMAS_PP / CMAS_SI.....	53
7 Comportements spécifiques aux bétons.....	54
7.1 Mot clé facteur THER_HYDR.....	54
7.1.1 Syntaxe.....	54
7.1.2 Opérandes LAMBDA / BETA .....	54
7.1.3 Opérande AFFINITE.....	54
7.1.4 Opérande CHAL_HYDR.....	54

7.1.5 Opérande QSR_K.....	54
7.2 Mot clé facteur SECH_GRANGER.....	55
7.2.1 Syntaxe.....	55
7.2.2 Opérandes A / B / QSR_K / TEMP_0_C.....	55
7.3 Mot clé facteur SECH_MENSI.....	55
7.3.1 Syntaxe.....	55
7.3.2 Opérandes A / B.....	55
7.4 Mot clé facteur SECH_BAZANT.....	56
7.4.1 Syntaxe.....	56
7.4.2 Opérandes D1 / ALPHA_BAZANT / N / FONC_DESORP.....	56
7.5 Mot clé facteur SECH_NAPPE.....	57
7.5.1 Syntaxe.....	57
7.5.2 Opérande FONCTION.....	57
7.6 Mot clé facteur PINTO_MENEGOTTO.....	57
7.6.1 Syntaxe.....	59
7.6.2 Opérandes.....	59
7.7 Mots clés facteur BPEL_BETON, BPEL_ACIER.....	60
7.7.1 Syntaxe.....	60
7.7.2 Opérandes.....	60
7.8 Mot clé facteur BETON_DOUBLE_DP.....	61
7.8.1 Syntaxe.....	61
7.8.2 Opérandes F_C / F_T / COEF_BIAX.....	61
7.8.3 Opérandes ENER_COMP_RUPT / ENER_TRAC_RUPT / COEF_ELAS_COMP.....	62
7.8.4 Opérandes LONG_CARA.....	62
7.8.5 Opérandes COMP_POST_PIC / TRAC_POST_PIC.....	62
7.9 Mot clé facteur GRANGER_FP, GRANGER_FP_INDT, V_GRANGER_FP.....	63
7.9.1 Syntaxe pour le fluage propre.....	63
7.9.2 Opérandes pour le fluage propre.....	63
7.9.3 Syntaxe pour le fluage propre indépendant de la température.....	64
7.9.4 Syntaxe pour le vieillissement.....	64
7.9.5 Opérandes pour le vieillissement.....	64
7.10 Mot clé NADAI_B.....	64
7.10.1 Syntaxe.....	65
7.10.2 Opérandes F_C / F_T.....	65
7.10.3 Opérande CRIT_E_C.....	65
7.10.4 Opérandes EPS_P_C / EPS_R_C / EPSI_R_T.....	65
7.10.5 Opérande FAC_T_C.....	66
7.11 Mot clé LABORD_1D.....	66
7.11.1 Syntaxe.....	66
7.11.2 Opérandes.....	66
7.12 Mot clé facteur MAZARS, MAZARS_FO.....	67
7.12.1 Syntaxe.....	67

7.12.2 Opérandes EPSD0.....	67
7.12.3 Opérandes AC / AT / BC / BT.....	67
7.12.4 Opérande BETA .....	67
7.12.5 Opérande CHI .....	68
7.13 Mot clé BETON_UMLV_FP.....	68
7.13.1 Syntaxe.....	69
7.13.2 Opérande.....	69
7.14 Mot clé facteur BETON_ECRO_LINE.....	69
7.14.1 Syntaxe.....	70
7.14.2 Opérandes.....	70
7.15 Mot clé facteur ENDO_ORTH_BETON.....	70
7.15.1 Syntaxe.....	70
7.15.2 Opérande ALPHA .....	70
7.15.3 Opérandes K0 / K1 / K2.....	70
7.15.4 Opérandes ECROB / ECROD.....	70
7.16 Mots clés facteur GLRC_DM.....	71
7.16.1 Syntaxe.....	71
7.16.2 Opérandes.....	71
7.17 Mot clé BETON_REGLE_PR .....	72
7.17.1 Syntaxe.....	72
7.17.2 Opérandes.....	72
7.18 Mot clé JOINT_BA.....	72
7.18.1 Syntaxe.....	73
7.18.2 Opérandes.....	73
8 Comportements Métallo-Mécaniques.....	75
8.1 Mot clé facteur META_ACIER.....	75
8.1.1 Syntaxe.....	75
8.1.2 Opérandes pour les changements de phases.....	75
8.1.3 Opérandes pour la taille de grains.....	77
8.2 Mot clé facteur META_ZIRC.....	77
8.2.1 Syntaxe.....	77
8.2.2 Opérandes.....	77
8.3 Mot clé facteur DURT_META.....	78
8.3.1 Syntaxe.....	78
8.3.2 Opérandes.....	78
8.4 Mots clés facteur ELAS_META, ELAS_META_FO .....	79
8.4.1 Syntaxe.....	79
8.4.2 Opérandes.....	80
8.5 Mot clé facteur META_ECRO_LINE.....	81
8.5.1 Syntaxe.....	81
8.5.2 Opérandes.....	81
8.6 Mot clé facteur META_TRACTION.....	81

8.6.1 Syntaxe.....	82
8.7 Mot clé facteur META_VISC_FO.....	82
8.7.1 Syntaxe.....	82
8.7.2 Opérandes F1_ETA/F2_ETA/F3_ETA/F4_ETA/C_ETA.....	83
8.7.3 Opérandes F1_N/F2_N/F3_N/F4_N/C_N.....	83
8.7.4 Opérandes F1_C/F2_C/F3_C/F4_C/C_C.....	83
8.7.5 Opérandes F1_M/F2_M/F3_M/F4_M/C_M.....	83
8.8 Mot clé facteur META_PT.....	84
8.8.1 Syntaxe.....	84
8.8.2 Opérandes.....	84
8.9 Mot clé facteur META_RE.....	85
8.9.1 Syntaxe.....	85
8.9.2 Opérandes.....	85
8.10 Mot clé META_LEMA_ANI.....	85
8.10.1 Syntaxe.....	86
8.10.2 Opérandes.....	87
9 Comportements THERMO-HYDRO-MECANIKES et des sols.....	88
9.1 Mot clé simple COMP_THM.....	88
9.2 Mot clé facteur THM_INIT.....	89
9.2.1 Syntaxe.....	89
9.2.2 Opérande TEMP.....	90
9.2.3 Opérande PRE1.....	90
9.2.4 Opérande PRE2.....	90
9.2.5 Opérande PORO/PRES_VAPE/DEGR_SATU.....	90
9.3 Mot clé facteur THM_LIQU.....	90
9.3.1 Syntaxe.....	90
9.3.2 Opérande RHO.....	91
9.3.3 Opérande UN_SUR_K.....	91
9.3.4 Opérande ALPHA.....	91
9.3.5 Opérande CP.....	91
9.3.6 Opérandes VISC/D_VISC_TEMP.....	91
9.4 Mot clé facteur THM_GAZ.....	91
9.4.1 Syntaxe.....	91
9.4.2 Opérande MASS_MOL.....	91
9.4.3 Opérande CP.....	91
9.4.4 Opérande VISC.....	92
9.4.5 Opérande D_VISC_TEMP.....	92
9.5 Mot clé facteur THM_VAPE_GAZ.....	92
9.5.1 Syntaxe.....	92
9.5.2 Opérande MASS_MOL.....	92
9.5.3 Opérande CP.....	92
9.5.4 Opérande VISC.....	92

9.5.5 Opérande D_VISC_TEMP.....	92
9.6 Mot clé facteur THM_AIR_DISS.....	93
9.6.1 Syntaxe.....	93
9.6.2 Opérande CP.....	93
9.6.3 Opérande COEF_HENRY.....	93
9.7 Mot clé facteur THM_DIFFU.....	93
9.7.1 Syntaxe.....	93
9.7.2 Opérandes R_GAZ/RHO/CP/BIOT_COEF.....	94
9.7.3 Opérandes SATU_PRES/D_SATU_PRES.....	94
9.7.4 Opérandes PESA_X/PESA_Y/PESA_Z.....	94
9.7.5 Opérande PERM_IN.....	95
9.7.6 Opérandes PERMIN_X/PERMIN_Y/PERMIN_Z.....	95
9.7.7 Opérandes PERM_LIQU/D_PERM_LIQU_SATU.....	95
9.7.8 Opérandes PERM_GAZ/D_PERM_SATU_GAZ.....	95
9.7.9 Opérandes VG_NVG_PR/VG_SR.....	95
9.7.10 Opérandes VG_SMAX/VG_SATUR.....	95
9.7.11 Opérandes D_PERM_PRES_GAZ.....	95
9.7.12 Opérandes FICKV_T/FICKV_S/FICKV_PG/FICKV_PV.....	95
9.7.13 Opérandes D_FV_T/D_FV_PG.....	95
9.7.14 Opérandes FICKA_T/FICKA_S/FICKA_PA/FICKA_P.....	96
9.7.15 Opérande D_FA_T.....	96
9.7.16 Opérandes LAMB_T/LAMB_S/LAMB_PHI/LAMB_CT.....	96
9.7.17 Opérandes D_LB_T/D_LB_S/D_LB_PHI.....	96
9.7.18 Opérande EMMAG.....	96
9.7.19 Opérande PERM_END.....	96
9.8 Mot clé CAM_CLAY.....	97
9.8.1 Syntaxe.....	97
9.8.2 Opérandes MU/LAMBDA/KAPA.....	97
9.8.3 Opérande M.....	97
9.8.4 Opérande PORO.....	97
9.8.5 Opérandes PRES_CRIT/KCAM.....	97
9.8.6 Opérande PTRAC.....	97
9.9 Mot clé facteur CJS.....	97
9.9.1 Syntaxe.....	98
9.9.2 Opérandes BETA_CJS/RM.....	99
9.9.3 Opérandes N_CJS/KP/RC.....	99
9.9.4 Opérandes A_CJS/R_INIT.....	99
9.9.5 Opérandes B_CJS/C_CJS/PCO/MU_CJS.....	99
9.9.6 Opérandes GAMMA_CJS/PA/Q_INIT.....	100
9.10 Mot clé facteur LAIGLE.....	100
9.10.1 Syntaxe.....	100
9.10.2 Opérandes GAMMA_ULT/GAMMA_E.....	101



9.10.3 Opérande M_ULT/M_E/A_E/M_PIC.....	101
9.10.4 Opérandes A_PIC/ETA/SIGMA_C.....	101
9.10.5 Opérandes GAMMA/KSI.....	101
9.10.6 Opérande GAMMA_CJS.....	101
9.10.7 Opérande SIGMA_P1.....	101
9.10.8 Opérande PA.....	101
9.11 Mot clé facteur LETK.....	101
9.11.1 Syntaxe.....	102
9.11.2 Opérandes PA/ NELAS/SIGMA_C/H0_EXT .....	102
9.11.3 Opérande GAMMA_CJS/X_AMS/ETA/A_0/A_E/A_PIC.....	103
9.11.4 Opérande ETA/A_0/A_E/A_PIC .....	103
9.11.5 Opérandes S_0/S_E/M_0/M_E/M_PIC/M_ULT.....	103
9.11.6 Opérandes XI_E/XI_PIC/MV_MAX/XIV_MAX.....	103
9.11.7 Opérandes A/N.....	103
9.11.8 Opérande SIGMA_P1.....	104
9.11.9 Opérandes MU0_V et XI0_V.....	104
9.11.10 Opérandes MU1 et XI1.....	104
9.12 Mot clé facteur DRUCK_PRAGER.....	104
9.12.1 Syntaxe.....	105
9.12.2 Opérande ECROUISSAGE.....	105
9.12.3 Opérande ALPHA.....	105
9.12.4 Opérande P_ULTM.....	105
9.12.5 Opérande SY.....	105
9.12.6 Opérande H.....	105
9.12.7 Opérande SY_ULTM.....	105
9.12.8 Opérande DILAT.....	105
9.13 Mot clé facteur BARCELONE.....	105
9.13.1 Syntaxe.....	106
9.13.2 Opérandes MU/PORO/LAMBDA/KAPA/M.....	106
9.13.3 Opérandes PRES_CRIT et PA .....	106
9.13.4 Opérandes R/BETA/KC.....	106
9.13.5 Opérandes PCO_INIT/KAPAS/LAMBDA/ALPHAB.....	106
9.14 Mot clé facteur HUJEUX.....	107
9.14.1 Syntaxe.....	107
9.14.2 Opérandes N/BETA/B/D/PHI .....	107
9.14.3 Opérandes ANGDI/PCO/PREF.....	107
9.14.4 Opérandes ACYC/AMON/CCYC/CMON.....	108
9.14.5 Opérandes RD_ELA/RI_ELA.....	108
9.14.6 Opérandes RD_CYC/RI_CYC.....	108
9.14.7 Opérandes RHYS/RMOB/XM/DILA/PTRAC.....	108
9.15 Mot clé facteur HOEK_BROWN.....	108
9.15.1 Syntaxe.....	108

9.15.2 Opérandes GAMMA_RUP/GAMMA_RES.....	109
9.15.3 Opérandes S_END/S_RUP/M_END/M_RUP.....	109
9.15.4 Opérande BETA/ALPHAB.....	109
9.15.5 Opérande PHI_RUP/PHI_RES/PHI_END.....	109
9.16 Mot clé facteur ELAS_GONF.....	109
9.16.1 Syntaxe.....	110
9.16.2 Opérande BETAM.....	110
9.16.3 Opérande PREF.....	110
10 Comportements spécifiques aux éléments 1D.....	111
10.1 Mots clés facteur VMIS_POUTRE, VMIS_POUTRE_FO.....	111
10.1.1 Syntaxe.....	112
10.2 Mot clé facteur ECRO_FLEJOU.....	112
10.2.1 Syntaxe.....	112
10.3 Mot clé facteur ECRO_ASYM_LINE (cf. [R5.03.09]).....	112
10.3.1 Syntaxe.....	113
11 Comportements particuliers.....	114
11.1 Mot clé facteur LEMAITRE_IRRA.....	114
11.1.1 Syntaxe.....	115
11.2 Mot clé facteur LMARC_IRRA.....	115
11.2.1 Syntaxe.....	116
11.3 Mot clé facteur DIS_GRICRA.....	116
11.3.1 Syntaxe.....	117
11.4 Mot clé facteur GATT_MONERIE.....	117
11.4.1 Syntaxe.....	118
11.5 Mot clé facteur DIS_CONTACT.....	118
11.5.1 Syntaxe.....	118
11.5.2 Opérandes RIGI_NOR/RIGI_TAN/AMOR_NOR/AMOR_TAN .....	119
11.5.3 Opérandes COULOMB/DIST_1/DIST_2/JEU .....	119
11.6 Mot clé facteur dis_ECRO_cine.....	119
11.6.1 Syntaxe.....	120
11.6.2 Opérandes.....	120
11.7 Mot clé facteur dis_VISC.....	120
11.7.1 Syntaxe.....	121
11.7.2 Opérandes.....	121
11.8 Mot clé facteur dis_bili_elas.....	121
11.8.1 Syntaxe.....	122
11.8.2 Opérandes.....	122
11.9 Mot clé facteur ASSE_CORN .....	122
11.9.1 Syntaxe.....	122
11.9.2 Opérandes.....	123
11.10 Mot clé facteur ARME .....	124
11.10.1 Syntaxe.....	124

11.10.2 Opérandes KYE/DLE.....	124
11.10.3 Opérande KYP/DLP.....	124
11.10.4 Opérande KYG.....	124
12 Comportement fluide.....	125
12.1 Mot clé facteur FLUIDE.....	125
12.1.1 Syntaxe.....	125
12.1.2 Opérande RHO.....	125
12.1.3 Opérandes CELE_R/ CELE_C.....	125
13 Données Matériaux associées à des post-traitements.....	126
13.1 Mot clé facteur FATIGUE.....	126
13.1.1 Syntaxe.....	126
13.1.2 Opérande WOHLER.....	126
13.1.3 Opérandes A_BASQUIN / BETA_BASQUIN.....	126
13.1.4 Opérandes A0 / A1 / A2 / A3 / SL .....	126
13.1.5 Opérande MANSON_COFFIN.....	127
13.1.6 Opérande E_REFE .....	127
13.1.7 Opérandes D0/TAU0.....	127
13.2 Mot clé facteur DOMMA_LEMAITRE.....	128
13.2.1 Syntaxe.....	128
13.2.2 Opérande S .....	128
13.2.3 Opérande EPSP_SEUIL.....	128
13.2.4 Opérande EXP_S .....	128
13.3 Mot clé facteur CISA_PLAN_CRIT .....	128
13.3.1 Syntaxe.....	128
13.3.2 Opérande MATAKE_A.....	129
13.3.3 Opérande MATAKE_B.....	129
13.3.4 Opérande COEF_FLEX_TORS.....	129
13.3.5 Opérande D_VAN_A.....	129
13.3.6 Opérande D_VAN_B .....	129
13.3.7 Opérande COEF_CISA_TRAC.....	129
13.3.8 Opérande FATSOC_A.....	129
13.4 Mot clé facteur WEIBULL, WEIBULL_FO.....	130
13.4.1 Syntaxe.....	130
13.4.2 Opérandes.....	131
13.5 Mots clés facteur RCCM, RCCM_FO.....	131
13.5.1 Syntaxe.....	131
13.5.2 Opérande SY_02.....	131
13.5.3 Opérandes SM/SU/SH.....	131
13.5.4 Opérande SC.....	131
13.5.5 Opérande S.....	132
13.5.6 Opérandes N_KE/M_KE.....	132
13.5.7 Opérandes A_AMORC/B_AMORC .....	132

<a href="#">13.5.8 Opérande D_AMORC .....</a>	<a href="#">132</a>
<a href="#">13.5.9 Opérande R_AMORC .....</a>	<a href="#">132</a>

## 2 Syntaxe générale

```
ma [mater] = DEFI_MATERIAU (
    reuse = mat, [mater]
# Comportement Elastiques Généraux [$ 3]
    | / ELAS, # voir[$ 3.1]
    | / ELAS_FO,
    | / ELAS_FLUI, # voir[$ 3.2]
    | CABLE, # voir[$ 3.3]
    | / ELAS_ORTH, # voir[$ 3.4]
    | / ELAS_ORTH_FO,
    | / ELAS_ISTR, # voir[$ 3.5]
    | / ELAS_ISTR_FO,
    | / ELAS_COQUE, # voir[$ 3.6]
    | / ELAS_COQUE_FO,
    | ELAS_HYPER, # voir[$ 3.7]

# Comportements Mécaniques Non Linéaires Généraux [$ 4]

    | TRACTION, # voir[$ 4.1]
    | / ECRO_LINE, # voir[$ 4.2]
    | / ECRO_LINE_FO,
    | / PRAGER, # voir[$ 4.3]
    | / PRAGER_FO,
    | / ECRO_PUIS, # voir[$ 4.4]
    | / ECRO_PUIS_FO,
    | / CIN1_CHAB, # voir[$ 4.5]
    | / CIN1_CHAB_FO,
    | / CIN2_CHAB, # voir[$ 4.6]
    | / CIN2_CHAB_FO,
    | / VISCOCHAB, # voir[$ 4.7]
    | / VISCOCHAB_FO,
    | / MEMO_ECRO, # voir[$ 4.8]
    | / TAHERI, # voir[$ 4.9]
    | / TAHERI_FO,
    | ECOU_VISC1, # voir[$4.10]
    | ECOU_VI SC2,
    | ECOU_VISC3,
    | ECRO_CIN1,
    | ECRO_CIN2,
    | ECRO_ISOT1,
    | ECRO_ISOT2,
    | KOCKS_RAUCH,
    | / LEMAITRE, # voir[$4.11]
    | / LEMAITRE_FO,
    | VISC_SINH, # voir[$4.12]
    | / LEMA_SEUIL, # voir[$4.13]
    | / LEMA_SEUIL_FO,
    | VISC_IRRA_LOG, # voir[$4.14]
    | GRAN_IRRA_LOG, # voir[$4.15]
    | / LMARC, # voir[$4.16]
    | / LMARC_FO,
    | IRRAD3M, # voir[$4.17]
```

```
# Comportements liés à l'endommagement et la rupture [$5]
| / ROUSSELIER, # voir[$ 5.1]
| / ROUSSELIER_FO,
| / VENDO_CHAB, # voir[$ 5.2]
| / VENDO_CHAB_FO,
| NON_LOCAL, # voir[$ 5.3]
| / RUPT_FRAG, # voir[$ 5.4]
| / RUPT_FRAG_FO,
| CORR_ACIER, # voir[$ 5.5]

# Comportements Thermiques [$ 6]
| / THER, # voir[$ 6.1]
| / THER_FO,
| / THER_ORTH, # voir[$ 6.2]
| / THER_NL, # voir[$ 6.3]
| / THER_COQU, # voir[$ 6.4]
| / THER_COQU_FO,

# Comportements spécifiques aux bétons [$ 7]
| THER_HYDR, # voir[$ 7.1]
| SECH_GRANGER, # voir[$ 7.2]
| SECH_MENSI, # voir[$ 7.3]
| SECH_BAZANT, # voir[$ 7.4]
| SECH_NAPPE, # voir[$ 7.5]
| PINTO_MENEGOTTO, # voir[$ 7.6]
| BPEL_BETON et BPEL_ACIER, # voir[$ 7.7]
| BETON_DOUBLE_BP, # voir[$ 7.8]
| GRANGER_FP, GRANGER_FP_INDT # voir[$ 7.9]
| et V_GRANGER_FP,

| NADAI_B, # voir[$7.10]
| LABORD_1D, # voir[$7.11]
| / MAZARS, # voir[$7.12]
| / MAZARS_FO,
| BETON_UMLV_FP, # voir[$7.13]
| ENDO_ORTH_BETON, # voir[$7.14]
| | BETON_ECRO_LINE, # voir[$7.15]
| GLRC_DM, # voir[$7.16]
| JOINT_BA, # voir[$7.17]

# Comportements Metallo-Mécaniques [$ 8]
| META_ACIER, # voir[$ 8.1]
| META_ZIRC, # voir[$ 8.2]
| DURT_META, # voir[$ 8.3]
| / ELAS_META, # voir[$ 8.4]
| / ELAS_META_FO,
| META_ECRO_LINE, # voir[$ 8.5]
| META_TRACTION, # voir[$ 8.6]
| META_VISC_FO, # voir[$ 8.7]
| META_PT, # voir[$ 8.8]
| META_RE, # voir[$ 8.9]
| META_LEMA_ANI, # voir[$ 8.10]
```

```
# Comportements Thermo-Hydro-Mécaniques et des sols [$ 9]
```

```
COMP_THM      = / 'LIQU_SATU',      # voir[$ 9.1]
                / 'LIQU_GAZ',
                / 'GAZ',
                / 'LIQU_GAZ_ATM',
                / 'LIQU_VAPE_GAZ',
                / 'LIQU_VAPE',
                / 'LIQU_SATU_GAT',
                / 'LIQU_NSAT_GAT',
                / 'LIQU_AD_GAZ_VAPE',

| THM_INIT,      # voir[$ 9.2]
| THM_LIQU,      # voir[$ 9.3]
| THM_GAZ,      # voir[$ 9.4]
| THM_VAPE_GAZ,  # voir[$ 9.5]
| THM_AIR DISS,  # voir[$ 9.6]
| THM_DIFFU,     # voir[$ 9.7]
| CAM_CLAY,      # voir[$ 9.8]
| CJS,          # voir[$ 9.9]
| LAIGLE,       # voir[$ 9.10]
| LETK,         # voir[$ 9.11]
| DRUCK_PRAGER,  # voir[$ 9.12]
| BARCELONE,     # voir[$ 9.13]
| HUJEUX,       # voir[$ 9.14]
| HOEK_BROWN,    # voir[$ 9.15]
| ELAS_GONF,     # voir[$ 9.15]
```

```
# Comportement spécifiques aux éléments 1D [$ 10]
```

```
| / VMIS_POUTRE,      # voir[$ 10.1]
| / VMIS_POUTRE_FO,
| ECRO_FLEJOU,      # voir[$ 10.2]
| ECRO_ASYM_LINE,   # voir[$ 10.3]
```

```
# Comportements particuliers [$ 11]
```

```
| LEMAITRE_IRRA,     # voir[$ 11.1]
| LMARC_IRRA,        # voir[$ 11.2]
| DIS_)GRICRA,       # voir[$ 11.3]
| GATT_MONERIE,      # voir[$ 11.4]
| DIS_CONTACT,       # voir[$ 11.5]
| DIS_ECRO_CINE,     # voir[$ 11.6]
| DIS_VISC,          # voir[$ 11.7]
| DIS_BILI_ELAS,     # voir [$ 11.8]
| ASSE_CORN,         # voir[$ 11.9]
| ARME,              # voir[$ 11.10]
```

```
# Comportement fluide [$ 12]
```

```
| FLUIDE,           # voir[$ 12.1]
```

```
# Données Matériaux associés à des post-traitements
```

```
# à des post-traitements [$ 13]
```

```
| FATIGUE,          # voir[$ 13.1]
| DOMMA_LEMAITRE,   # voir[$ 13.2]
| CISA_PLAN_CRIT,   # voir[$ 13.3]
| / WEIBULL,        # voir[$ 13.4]
| / WEIBULL_FO,
| / RCCM,           # voir[$ 13.5]
| / RCCM_FO,
)
```

**Remarques :**

La commande DEFI\_MATERIAU est réentrante mais chaque comportement reste unique. On ne permet pas de remplacer un comportement déjà présent dans le matériau, mais seulement d'enrichir le concept.

Pour la plupart des comportements, il est possible de définir des caractéristiques constantes ou bien des caractéristiques dépendant d'une ou deux variables. Nous avons choisi de regrouper les deux mots clés facteurs, les mots clés simples étant identiques dans les deux cas, seuls les arguments se distinguent par le type de concept associé.

Dans la syntaxe de chaque comportement, on adoptera la convention suivante pour indiquer la ou les variables dont peuvent dépendre les concepts de type *fonction*.

```
[fonction *]      'TEMP'  'X', 'Y', 'Z' (deux variables parmi quatre),  
[fonction **]     'TEMP'  
[fonction ***]    'EPSI'   'TEMP'  
[fonction ****]   'ABSC'  
[fonction +]      'INST'  
[fonction ++]     'NORM'  
[fonction +++]    'TEMP'  'IRRA'
```



## 3 Comportements élastiques généraux

### 3.1 Mots clés facteur ELAS , ELAS\_FO

Définition des caractéristiques élastiques linéaires constantes ou fonctions du paramètre 'TEMP'.

#### 3.1.1 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]
    ◇ AMOR_HYST = eta [R]
)
/ ELAS_FO = _F (
    ♦ E = yg, [fonction]
    ♦ NU = nu, [fonction]
    ◇ RHO = rho, [R]
    ◇ 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, [DEFAULT]
    ◇ K_DESSIC = / k, [R]
    / 0.0, [DEFAULT]
    ◇ B_ENDOGE = / e, [R]
    / 0.0, [DEFAULT]
    ◇ FONC_DESORP = f [fonction]
)
```

Les fonctions peuvent dépendre des variables de commandes suivantes :  
'TEMP', 'INST', 'HYDR', 'SECH', 'NEUT1', 'NEUT2'.

#### 3.1.2 Opérandes E/NU

$E = yg$

Module d'Young. On vérifie que  $E \geq 0$ .

$NU = nu$

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

#### 3.1.3 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.

#### 3.1.4 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  $T$  renseigné ALPHA.

Le calcul de la déformation thermique se fait par la formule [R4.08.01] :

$$e^{th}(T) = \hat{\alpha}(T)(T - T_{ref}) \text{ avec } \hat{\alpha}(T) = \frac{\alpha(T)(T - T_{def}) - \alpha(T_{ref})(T_{ref} - T_{def})}{T - T_{ref}}$$
$$\text{et } e^{th}(T_{ref}) = 0$$

#### Remarque :

*Il n'est pas possible d'utiliser une formule pour ALPHA, en raison des modifications à prendre en compte décrites ci-dessus. 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. [DEFAULT]

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  $\alpha(T_{i=1,N})$ ) 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  $T_i = T_{ref}$ .

### 3.1.5 Opérands AMOR\_ALPHA / AMOR\_BETA / AMOR\_HYST

AMOR\_ALPHA = a\_alpha  
AMOR\_BETA = a\_beta

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

AMOR\_HYST = eta

Coefficient  $\eta$  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].

#### Remarque :

*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 engendrer ainsi des coûts de calcul supplémentaires.*

### 3.1.6 Opérands K\_DESSIC / B\_ENDOGE

K\_DESSIC = k

Coefficient de retrait de dessiccation.

K\_ENDOGE = e

Coefficient de retrait endogène.

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

### 3.1.7 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.

## 3.2 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. Réf [U4.35.02]

La masse volumique équivalente de la structure  $\rho_{eq}$  est définie par :

$$\rho_{eq} = \frac{I}{(d_e^2 - d_i^2)} [\rho_i \cdot d_i^2 + \rho_t \cdot (d_e^2 - d_i^2) + \rho_e \cdot d_e^2]$$
$$d_{eq}^2 = \frac{2 \cdot Cm \cdot d_e^2}{\pi}$$

$\rho_i, \rho_e, \rho_t$  sont respectivement la masse volumique du fluide interne, du fluide externe et de la structure.

$d_e, d_i$  sont respectivement le diamètre externe et interne du tube.

$Cm$  est un coefficient de masse ajoutée (définit le confinement).

### 3.2.1 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****]
| )
```

### 3.2.2 Opérandes RHO/E/NU

RHO = rho

Masse volumique du matériau.

E = yg

Module d'Young.

NU = nu

Coefficient de Poisson.

### 3.2.3 Opérands **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  $C_m$ .

## 3.3 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 d'Young **E** et **EC** (module en compression).

Les caractéristiques standard du matériau élastique sont à renseigner sous le mot clé facteur **ELAS**.

### 3.3.1 Syntaxe

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

### 3.3.2 Opérands 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.

## 3.4 Mots clés facteur **ELAS\_ORTH, ELAS\_ORTH\_FO**

Définition des caractéristiques élastiques orthotropes constantes ou fonctions de la température pour les éléments de coque et les éléments massifs isoparamétriques ou les couches constitutives d'un composite (cf. **DEFI\_COQU\_MULT**).

### 3.4.1 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, [DEFAULT]
|         | ◇ ALPHA_T       = / dit, [R]
|         |                   / 0.0, [DEFAULT]
|         | ◇ ALPHA_N       = / din, [R]
|         |                   / 0.0, [DEFAULT]
|         | ◇ RHO           = / rho, [R]
|         |                   / 0.0, [DEFAULT]
```

```

◇ XT = / trl, [R]
      / 1.0, [DEFAULT]
◇ XC = / col, [R]
      / 1.0, [DEFAULT]
◇ YT = / trt, [R]
      / 1.0, [DEFAULT]
◇ YC = / cot, [R]
      / 1.0, [DEFAULT]
◇ S_LT = / cis, [R]
        / 1.0, [DEFAULT]
◇ AMOR_ALPHA = alp, [R]
◇ AMOR_BETA = bet, [R]
◇ AMOR_MYST = 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, [R]
        / 0.0, [DEFAULT]
  ◇ TEMP_DEF_ALPHA = Tdef, [R]
  ◇ PRECISION = /eps, [R]
                /1., [DEFAULT]
  ◇ AMOR_ALPHA = alp, [R]
  ◇ AMOR_BETA = bet, [R]
  ◇ AMOR_MYST = eta [R]
)

```

### 3.4.2 Opérandes d'élasticité

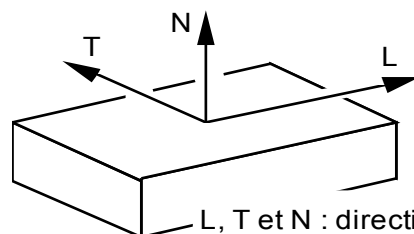
Le lecteur pourra se reporter aux documentations suivantes :

[U4.42.03] DEFI\_COQU\_MULT

[U4.42.01] AFFE\_CARA\_ELEM  
facteur

pour définir le repère d'orthotropie (L, T, N) lié aux éléments.

E\_L = ygl Module d'Young longitudinal.



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

E\_T = ygt Module d'Young transversal.

E\_N = ygn Module d'Young normal.

GL\_T = glt Module de cisaillement dans le plan LT.

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 : 
$$nult = \frac{ygt}{ygl} \cdot nutl$$

`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

$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_L}{ygl} \quad , \quad \text{on a une déformation selon l'axe } T \text{ égale à : } \varepsilon_t = -nult \cdot \frac{\sigma_L}{ygl} \quad .$$

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 :

$$nunt = \frac{ygn}{ygt} \cdot nutn$$

$$nunl = \frac{ygn}{ygt} \cdot nuln$$

### 3.4.3 Opérande `RHO`

`RHO` = `rho`

Masse volumique.

### 3.4.4 Opérands `ALPHA_L` / `ALPHA_T` / `ALPHA_N`

`ALPHA_L` = `dil`

Coefficient de dilatation thermique moyen longitudinal.

`ALPHA_T` = `dit`

Coefficient de dilatation thermique moyen transversal.

`ALPHA_N` = `din`

Coefficient de dilatation thermique moyen normal.

## 3.4.5 Opérandes TEMP\_DEF\_ALPHA / PRECISION

On se reportera au paragraphe [§3.1.4]. Ce mot clé devient obligatoire dès que l'on a renseigné ALPHA\_L , ou ALPHA\_T ou ALPHA\_N.

## 3.4.6 Critères de rupture

Ces différents critères peuvent être utilisés par la commande CALC\_ELEM sous le mot clé 'CRIT\_ELNO\_RUPT' [U4.81.01], [R4.01.01].

XT = trl

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

XC = col

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.

## 3.5 Mots clés facteur ELAS\_ISTR , ELAS\_ISTR\_FO

Définition des caractéristiques élastiques constantes ou fonctions de la température dans le cas de l'isotropie transverse pour les éléments de coque et les éléments massifs isoparamétriques.

En reprenant les mêmes notations que pour l'orthotropie [§3.4], l'isotropie transverse signifie ici, l'isotropie dans le plan (L, T) [R4.01.02].

### 3.5.1 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 ,   [DEFAULT]
    ◇ ALPHA_N       = / din ,    [R]
                        / 0.0 ,   [DEFAULT]
    ◇ RHO           = / rho ,    [R]
                        / 0.0 ,   [DEFAULT]
)
/ 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 ,    [R]
                        / 0.0 ,   [DEFAULT]
    ◇ TEMP_DEF_ALPHA = Tdef ,    [R]
    ◇ PRECISION     = / eps ,    [R]
                        / 1.0 ,   [DEFAULT]
```

## 3.5.2 Opérands d'élasticité

Le lecteur pourra se reporter aux documentations suivantes :

[U4.42.03] DEFI\_COQU\_MULT

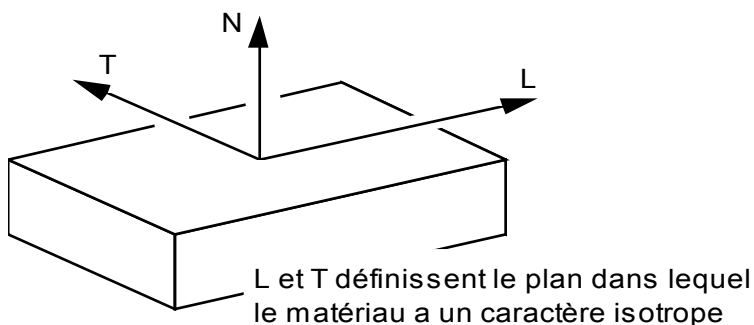
[U4.42.01] AFFE\_CARA\_ELEM

[R4.01.02] Orthotropie

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.

### Remarque :

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



$E_L = ygl$

Module d'Young dans le plan LT.

$E_N = ygn$

Module d'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 le plan LT, mais  $nuln$  n'est pas égal à  $nunl$ .

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

$nunl$  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 :  $nunl \cdot \frac{\sigma_N}{ygn}$ .



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.

### 3.5.3 Opérande RHO

RHO = rho

Masse volumique.

### 3.5.4 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.

### 3.5.5 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.

## 3.6 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].

### 3.6.1 Syntaxe

```
|/ ELAS_COQUE      = _F      (  
  / ELAS_COQUE_FO = _F  
  ◇ 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**]  
  ◇ RHO             = rho , [R] ou [fonction**]  
  ◇ ALPHA           = alpha , [R] ou [fonction**]  
  ◇ M_LLLL          = H1111 , [R] ou [fonction**]  
  ◇ M_LLTT          = H1111 , [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_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         = B1111 , [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      = E1111 , [R] ou [fonction**]
◇ MC_LLTZ      = E1111 , [R] ou [fonction**]
◇ MC_TTLZ      = E1112 , [R] ou [fonction**]
◇ MC_TTTZ      = E2222 , [R] ou [fonction**]
◇ MC_LTLZ      = E2212 , [R] ou [fonction**]
◇ MC_LTTZ      = E1212 , [R] ou [fonction**]
◇ FC_LLLZ      = F1111 , [R] ou [fonction**]
◇ FC_LLTZ      = F1111 , [R] ou [fonction**]
◇ FC_TTLZ      = F1112 , [R] ou [fonction**]
◇ FC_TTTZ      = F2222 , [R] ou [fonction**]
◇ FC_LTLZ      = F2212 , [R] ou [fonction**]
◇ FC_LTTZ      = F1212 , [R] ou [fonction**]
◇ C_LZLZ       = G1313 , [R] ou [fonction**]
◇ C_TZTZ       = G2323 , [R] ou [fonction**]
◇ C_TZTZ       = G1323 , [R] ou [fonction**]
)

```

La matrice de comportement intervenant dans la matrice de rigidité en élasticité homogène isotrope est de la forme :

Membrane :

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

Flexion :

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \begin{vmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{1-\nu}{2}\right) \end{vmatrix}$$

Cisaillement :

$$G = \frac{5Eh}{12(1+\nu)} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

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 d'Young équivalent  $E_{eq}$ , et une épaisseur équivalente  $h_{eq}$  pour retrouver les expressions précédentes.

Les matrices de rigidité sont donc données directement sous la forme :

Membrane :

$$C = \begin{vmatrix} C1111 & C1122 & 0 \\ C1122 & C2222 & 0 \\ 0 & 0 & C1212 \end{vmatrix}$$

Flexion :

$$D = \begin{vmatrix} D1111 & D1122 & 0 \\ D1122 & D2222 & 0 \\ 0 & 0 & D1212 \end{vmatrix}$$

Cisaillement :

$$G = \begin{vmatrix} G11 & 0 \\ 0 & G22 \end{vmatrix}$$

En revanche, on se limite aux cas où le coefficient de dilatation thermique est homogène isotrope.

Ces coefficients sont à fournir dans le repère local de l'élément. Il est défini par le mot-clé ANGL\_REP 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  $CISA_* = 5/12*(Eh/(1+\nu))$  est équivalent au matériau ELAS , modélisation DST.
- Le matériau ELAS\_COQUE , modélisation DST avec  $CISA_* = 5/12*(Eh/(1+\nu))*N$ , 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.

Les matrices de comportement reliant les efforts généralisés aux déformations pour les éléments de plaque et prenant en compte les termes de couplage sont définies de la façon suivante :

Membrane :

$$HM = \begin{vmatrix} H1111 & H1122 & H1112 \\ 0 & H2222 & H2212 \\ 0 & 0 & H1212 \end{vmatrix}$$

Flexion :

$$HF = \begin{vmatrix} A1111 & A1122 & A1112 \\ 0 & A2222 & A2212 \\ 0 & 0 & A1212 \end{vmatrix}$$

Cisaillement :

$$HMF = \begin{vmatrix} B1111 & B1122 & B1112 \\ 0 & B2222 & B2212 \\ 0 & 0 & B1212 \end{vmatrix}$$

Membrane - cisaillement :

$$HMC = \begin{vmatrix} E1113 & E1123 \\ E2213 & E2223 \\ E1213 & E1223 \end{vmatrix}$$

Flexion - cisaillement :

$$HFC = \begin{vmatrix} F1113 & F1123 \\ F2213 & F2223 \\ F1213 & F1223 \end{vmatrix}$$

Cisaillement :

$$HC = \begin{vmatrix} G1313 & G1323 \\ G1323 & G2323 \end{vmatrix}$$

## 3.7 Mot clé simple ELAS\_HYPER

Définition des caractéristiques hyper-élastiques de type Signorini. [R5.03.19]. Les contraintes de Piola Kirchhoff S sont reliées aux déformations de green-Lagrange

$$S = \frac{\partial \Psi}{\partial E} \text{ avec : } \Psi = C01(I_1 - 3) + C10(I_2 - 3) + C20(I_1 - 3)^2 + \frac{1}{2}K(J - 1)^2$$

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

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

### 3.7.1 Syntaxe

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

### 3.7.2 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/m².

• Si C10 et C20 sont nuls, on obtient un matériau de type néo-hookéen.

• Si seul C20 est nul, on obtient un matériau de type Mooney-Rivlin.

Le matériau est élastique incompressible en petites déformations si on prend C10 et C01 tels que

$$6(C01 + C10) = E, \text{ où } E \text{ est le module de Young.}$$

### 3.7.3 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 :

$$K = \frac{6(C01 + C10)}{3(1 - 2\nu)}$$

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.

## 3.7.4 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 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 2 types de données sont définies séparément, sauf quelques exceptions.

### 4.1 Mot clé facteur TRACTION

Définition d'une courbe de traction (élasto-plasticité de von Mises à écrouissage isotrope non linéaire ou élasticité non linéaire).

#### 4.1.1 Syntaxe

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

#### 4.1.2 Opérande SIGM

SIGM = sigm\_f

Courbe  $\sigma$  en fonction de la déformation totale  $\varepsilon$  (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].

**Remarque :**

*Pour les matériaux multiphasés, avec phases métallurgiques, les caractéristiques d'écrouissage se définissent par META\_ECRO\_LINE ou META\_TRACTION [R4.04.04].*

### 4.2 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.

#### 4.2.1 Syntaxe

```
| / ECRO_LINE = _F (
|     ♦ D_SIGM_EPSI = dsde,          [R]
|     ♦ SY =          sigmm          [R]
| )
| / ECRO_LINE_FO = _F (
|     ♦ D_SIGM_EPSI = dsde,          [fonction**]
|     ♦ SY =          sigm          [fonction**]
| )
```

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

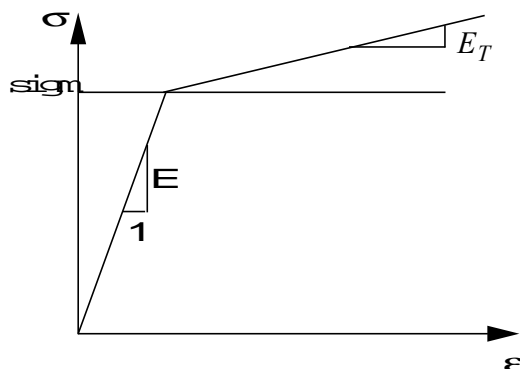
#### 4.2.2 Opérandes

D\_SIGM\_EPSI = dsde (ET)

Pente de la courbe de traction.

SY = sigm

Limite d'élasticité.



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

$$R(p) = s_y + H_p$$

$$\text{avec } H = \frac{E \cdot E_T}{E - E_T}$$

Il faut donc respecter :  $E_T < E$   
(voir par exemple [R5.03.02]).

Le module d'Young E est à préciser par les mots-clés ELAS ou ELAS\_FO.

## 4.3 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, cf. [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.

### 4.3.1 Syntaxe

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

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

## 4.4 Mots clés facteur ECRO\_PUIS, ECRO\_PUIS\_FO

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

### 4.4.1 Syntaxe

```
| / ECRO_PUIS = _F (
|     ♦ 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**]
```

## 4.4.2 Opérandes

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

La courbe d'érouissage est déduite de la courbe uniaxiale reliant les déformations aux contraintes, dont l'expression est :

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

## 4.5 Mots clés facteur CIN1\_CHAB, CIN1\_CHAB\_FO

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

Brièvement ces relations sont :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Remarque :**

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

La définition de  $X$  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.

### 4.5.1 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., [DEFAULT]
|   ♦ C_I = C_I, [R] ou
[fonction**]
|   ◇ K = / k, [R] ou [fonction**]
```

```
[fonction**]
        ◇      W = / 1., [DEFAULT]
                  / w, [R] ou

        ◇      / 0., [DEFAULT]
        ◆      G_0 = G_0, [R] ou [fonction**]
        ◇      A_I = / A_I, [R] ou [fonction**]
                  / 1., [DEFAULT]
    )
```

## Remarque :

Une version viscoplastique du modèle de Chaboche 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.

## 4.6 Mots clés facteur CIN2\_CHAB, CIN2\_CHAB\_FO

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

Brièvement ces relations sont :

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

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

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

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

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

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

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

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

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.



## 4.6.1 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., [DEFAULT]
    ♦ C1_I = C1_I, [R] ou [fonction**]
    ♦ C2_I = C2_I, [R] ou [fonction**]
    ♦ K = / k, [R] ou [fonction**]
    / 1., [DEFAULT]
    ♦ W = / w, [R] ou [fonction**]
    / 0., [DEFAULT]
    ♦ G1_0 = G1_0, [R] ou [fonction**]
    ♦ G2_0 = G2_0, [R] ou [fonction**]
    ♦ A_I = / A_I, [R] ou [fonction**]
    / 1., [DEFAULT]
)
```

### 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.

## 4.7 Mots clés facteurs VISCOCHAB, VISCOCHAB\_FO

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

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

Taux de déformation viscoplastique

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

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

Ecrouissage isotrope

$$\dot{R} = b(Q - R) \dot{p} + \gamma_r (Q_y - R)^m \text{sgn}(Q_y - R)$$

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

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

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

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

Écrouissage cinématique  $X = X_1 + X_2$

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

$$\gamma_i = \gamma_i^0 [a_\infty + (1 - a_\infty) e^{-b p}]$$

## 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  $\langle \dots \rangle$  les crochets de Mc Cawley ( $\langle x \rangle = x$  si  $x \geq 0$ , 0 sinon).

Les variables  $q$  et  $\xi$  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  $\xi$  ne sont pas considérées dans la résolution du système ( $q=0$ ). Sinon, on a la condition suivante sur  $\eta$ :  $0 < \eta \leq 1/2$ .

D'un point de vue thermodynamique, la variable d'écrouissage  $X_i$  est associée à sa variable duale  $\alpha_i$  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.

## 4.7.1 Syntaxe

```
| / VISCOCHAB =
| / VISCOCHAB_FO = _F(
|   ♦ K = k, [R] ou [fonction**]
|   ♦ A_K = alphak, [R] ou [fonction**]
|   ♦ A_R = alphas, [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**]
|   ♦ 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**]
| )
```

## 4.8 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 :

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

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

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

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

## 4.8.1 Syntaxe

```
MEMO_ECRO=_F (
    ◆ MU           = mu           [R]
    ◆ Q_M          = qm           [R]
    ◆ Q_0          = q0           [R]
    ◇ ETA          = / eta        [R]
                                / 0.5, [DEFAULT]
)
```

## 4.8.2 Opérandes

Mu = mu

Coefficient de la loi exponentielle

Q\_M = Qm

Valeur de saturation du paramètre Q représentant l'écrouissage isotrope

Q\_0 = Q0

Valeur initiale du paramètre Q représentant l'écrouissage isotrope

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.

## 4.9 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:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \dot{\varepsilon}^p = \frac{3}{2} \dot{p} \frac{\tilde{\sigma} - X}{(\tilde{\sigma} - X)_{eq}} & \text{avec } (x)_{eq} = \left( \frac{3}{2} x^t x \right)^{1/2} \\ \sigma = \Lambda(\varepsilon - \varepsilon_p) & R = D(A \|\varepsilon\|^\alpha + R_0) \\ (\sigma - X)_{eq} - R = 0 & X = C(S \varepsilon_p - \sigma_p \varepsilon_p^n) \\ \dot{\sigma}_p - \dot{R} - \dot{(X)}_{eq} = 0 & \sigma_p = \text{Max}_t(X_{eq} + R) \\ \dot{\varepsilon}_p^n = 0 & D = 1 - m e^{-bp \left(1 - \frac{\sigma_p}{S}\right)} \\ & C = C_\infty + C_l e^{-bp \left(1 - \frac{\sigma_p}{S}\right)} \end{array} \right.$$

où les différents paramètres du matériau sont  $S, C_\infty, C_l, b, m, A, \alpha, R_0$

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

## 4.9.1 Syntaxe

```
| / TAHERI
| / TAHERI_FO = _F(
|     ♦ R_0      = R,      [R] ou [fonction**]
|     ♦ ALPHA    = a ,     [R] ou [fonction**]
|     ♦ M         = m,      [R] ou [fonction**]
|     ♦ A         = A,      [R] ou [fonction**]
|     ♦ B         = B,      [R] ou [fonction**]
|     ♦ C1        = C1,     [R] ou [fonction**]
|     ♦ C_INF     = Cinf,   [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.

## 4.10 Mots clés facteurs ECOU\_VISC1, ECOU\_VISC2, ECOU\_VISC3, ECRO\_CINE1, ECRO\_CINE2, ECRO\_ISOT1, ECRO\_ISOT2, KOCKS\_RAUCH

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 pour les coefficients réels ou ELAS\_FO pour les coefficients dépendant de la température. 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. Du fait que l'on s'intéresse à chaque fois à une seule direction de glissement, le comportement est mono-dimensionnel. Il peut 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 ECOU\_VISC1 est :

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

La relation d'écoulement ECOU\_VISC2 est:

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

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

La relation d'écoulement ECOU\_VISC3 est :

$$\Delta \gamma_s = g(\tau_s, \alpha_s, \gamma_s, p_s) = \dot{\gamma}_0^* \exp\left(\frac{-\Delta G_0}{kT}\right) \exp\left(\frac{\langle |\tau_s| - \tau_\mu \rangle \Delta V^*}{kT}\right) \cdot \frac{\tau_s}{|\tau_s|},$$

les paramètres sont :  $k$ , Constante de Boltzmann, en eV/K,  $\tau_\mu$  seuil d'écoulement (homogène à une contrainte),  $\dot{\gamma}_0^*$  vitesse d'écoulement initiale,  $\Delta V^*$  volume d'activation,  $\Delta G_0$  gain d'énergie lié au franchissement d'obstacle.

La relation d'écoulement KOCKS-RAUCH s'écrit :

$$\text{Si } |\tau^s| > \tau_0 : \tau_{\text{eff}}^s = \langle |\tau^s| - \tau_0 - \tau_\mu^s \rangle \quad \text{avec} \quad \tau_\mu^s = \frac{(\mu)^2 \sum_u a^{su} r^u}{|\tau^s| - \tau_0 r} \quad \text{et} \quad r^u = \rho^u b^2$$

$$\text{Sinon : } \tau_{\text{eff}}^s = 0 \quad \text{et} \quad \tau_\mu^s = 0$$

$$\text{Si } \tau_{\text{eff}}^s > 0$$

$$\Delta \gamma_s = g(\tau_s, \gamma_s) = \dot{\gamma}_0 \exp\left(\frac{-\Delta G(\tau_{\text{eff}}^s)}{kT}\right) \cdot \frac{\tau_s}{|\tau_s|} \cdot \Delta t$$

$$\Delta G(\tau_{\text{eff}}^s) = \Delta G_0 \left(1 - \left(\frac{\langle \tau_{\text{eff}}^s \rangle}{\tau_R}\right)^p\right)^q$$

$$\Delta \gamma_s = g(\tau_s, \gamma_s) = \left[ \dot{\gamma}_0 \exp\left(-\frac{\Delta G_0}{kT} \left(1 - \left(\frac{\langle |\tau^s| - \tau_0 - \tau_\mu^s \rangle}{\tau_R}\right)^p\right)^q\right) \cdot \frac{\tau_s}{|\tau_s|} \right] \cdot \Delta t$$

On en déduit :

$$\Delta \rho_s = |\Delta \gamma^s| \left( \frac{1}{bd} + \frac{\sum_{u \neq s} \sqrt{r^u}}{b^2 K} - \frac{g_c r^s}{b^3} \right) \quad \text{donc} \quad \Delta r^s = |\Delta \gamma^s| \left( \frac{b}{d} + \frac{\sum_{u \neq s} \sqrt{r^u}}{K} - \frac{g_c r^s}{b} \right) :$$

Les paramètres sont :  $\dot{\gamma}_0, k, \tau_R, \Delta G_0, p, q, \tau_0, b, d, K, g_c$

Les paramètres  $b, d$  et  $g_c$  sont remplacés par  $\frac{b}{d}$  et  $\frac{g_c}{d}$ .

L'érouissage cinématique peut être de la forme ECRO\_CIN1 :

$$\Delta \alpha_s = h(\tau_s, \alpha_s, \gamma_s, p_s) = \Delta \gamma_s - d \cdot \alpha_s \cdot \Delta p_s \quad \text{avec pour paramètre: } d.$$

ou bien ECRO\_CIN2 :

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

L'érouissage isotrope peut par exemple être de la forme ECRO\_ISOT1 :

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

Ou encore ECRO\_ISOT2 :

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

## 4.10.1 Syntaxe

Ces relations sont accessibles dans le **Code\_Aster** en 3D, déformations planes (D\_PLAN), contraintes planes (C\_PLAN) et axisymétrique (AXIS) à partir du mot-clé COMP\_INCR 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].

```
| ECOU_VISC1 = _F (
    ♦ C      = C,          [R]
    ♦ K      = K,          [R]
    ♦ N      = n           [R]
)
| ECOU_VISC2 = _F (
    ♦ C      = C,          [R]
    ♦ K      = K,          [R]
    ♦ N      = n,          [R]
    ♦ A      = a,          [R]
    ♦ D      = d           [R]
)
| ECOU_VISC3 = _F (
    ♦ K      = k,          [R]
    ♦ TAUMU  = taumu,      [R]
    ♦ GAMMA0 = gamma0,     [R]
    ♦ DELTAV = deltaV,     [R]
    ♦ DELTAG0= deltaG      [R]
)
| ECRO_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]
)
| ECRO_ISOT2 = _F (
    ♦ R_0    = R0,         [R]
    ♦ Q1     = Q1,         [R]
    ♦ B1     = b1,         [R]
    ♦ H      = h,          [R]
    ♦ H1     = h1,         [R]
    ♦ H2     = h2,         [R]
    ♦ H3     = h3,         [R]
    ♦ H4     = h4,         [R]
    ♦ H5     = h5,         [R]
    ♦ H6     = h6,         [R]
```

```

        ♦ Q2      = Q2,          [R]
        ♦ B2      = b2          [R]
    )

|   ECRO_CINE1 = _F (

        ♦ D      = D,          [R]
    )

|   ECRO_CINE2 = _F (

        ♦ D      = D,          [R]
        ♦ GM     = M,          [R]
        ♦ PM     = m,          [R]
        ♦ C      = C           [R]
    )

|   KOCKS_RAUCH = _F (

        ♦ K      = k,          [R]
                        (Constante de Boltzmann, en eV/K)
        ♦ TAUR    = taur,       [R]
        ♦ TAU0    = tau0,       [R]
                        ( scission critique initiale)
        ♦ GAMMA0  = gammap0,    [R]
        ♦ DELTAG0 = deltaG0,    [R]
                        ( Gain d'énergie lié au franchissement
                          d'obstacle),
        ♦ BSD     = BsurD       [R]
        ♦ GCB     = GCsurB     [R]
        ♦ KDCS    = K,         [R]
        ♦ P       = p,         [R]
        ♦ Q       = q,         [R]
        # Définition de la matrice d'interaction :
        ♦ H       = h,         [R]
        ♦ H1      = h1,        [R]
        ♦ H2      = h2,        [R]
        ♦ H3      = h3,        [R]
        ♦ H4      = h4,        [R]
        ♦ H5      = h5,        [R]
        ♦ H6      = h6,        [R]
    )

```

## 4.11 Mots clés facteur LEMAITRE, LEMAITRE\_FO

Définition des coefficients de la relation de viscoplasticité non-linéaire de Lemaître [R5.03.08].

Les équations sont les suivantes :

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

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

### 4.11.1 Syntaxe

```
| / LEMAITRE= _F (
    ♦ N          =  n,                [R]
    ♦ UN_SUR_K   =  1/K,              [R]
    ◇ UN_SUR_M   =  / 1/m,            [R]
                                / 0.0, [DEFAULT]
)

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

**Remarque :**

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

## 4.12 Mot clé facteur VISC\_SINH

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

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

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

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

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

Ce modèle de viscosité peut être associé :

- Au mot clé `ROUSSELIER` pour définir la loi de comportement `ROUSS_VISC`
- Au 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 :  $m$ ,  $\epsilon_0$  et  $\sigma_0 > 0$ .

### 4.12.1 Syntaxe

```
| VISC_SINH = _F (
    ♦ M          =  m,
    ♦ EPSI_0     =  epsi0,            [R]
    ♦ SIGM_0     =  sigma0            [R]
)
```

## 4.13 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 :



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

avec :

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

$$\tilde{\sigma} : \text{déviateur des contraintes} \quad \tilde{\sigma} = \sigma - \frac{1}{3} \text{Tr}(\sigma) I$$

$$\sigma_{eq} : \text{contrainte équivalente} \quad \sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2}} \tilde{\sigma} : \tilde{\sigma}$$

$$A(T) : \text{tenseur d'élasticité}$$

et :

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

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

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

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

Quant au paramètre  $\Phi$ , il s'agit du flux de neutrons qui bombarde le matériau. Il doit être renseigné sous le mot clé facteur **AFFE\_VARC** de **AFFE\_MATERIAU**.

Le module d'Young  $E$  et le coefficient de Poisson  $\nu$  sont ceux fournis sous les mots clés facteurs **ELAS** ou **ELAS\_FO**.

## 4.13.1 Syntaxe

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

## 4.14 Mot clé facteur VISC\_IRRA\_LOG

Définition 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 uniaxial) :

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

$\varepsilon_f$  déformation axiale de fluage  
 $\frac{Q}{T}$  énergie d'activation  
température d'activation (en °K)

$\sigma$	contrainte axiale appliquée au tube guide
$\phi t$	flux neutronique ( $10^{+20}$ neutrons / $\text{cm}^2$ )
$\omega$	constante de temps
$A, B$	constantes

## 4.14.1 Syntaxe

```
| VISC_IRRA_LOG =_F (
    ◇ A          = / 1.28D-1, [DEFAULT]
                      / a, [R]
    ◇ B          = / 0.01159, [DEFAULT]
                      / b, [R]
    ◆ FLUX_PHI   = phi, [R]
    ◇ CSTE_TPS   = w, [R]
    ◇ ENER_ACT   = q, [R]
)
```

## 4.15 Mot clé facteur GRAN\_IRRA\_LOG

Définition 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]) :

$$\varepsilon_g = (A_g T + B_g) (\Phi t)^s \text{ où } A_g, B_g \text{ sont des constantes.}$$

### 4.15.1 Syntaxe

```
| GRAN_IRRA_LOG =_F (
    ◇ A          = / 1.28D-1, [DEFAULT]
                      / a, [R]
    ◇ B          = / 0.01159, [DEFAULT]
                      / b, [R]
    ◆ FLUX_PHI   = phi, [R]
    ◇ CSTE_TPS   = w, [R]
    ◇ ENER_ACT   = q, [R]
    ◇ GRAN_A     = Ag, [R]
    ◇ GRAN_B     = Bg, [R]
    ◇ GRAN_S     = S [R]
)
```

## 4.16 Mots clés facteur LMARC, LMARC\_FO

Définitions des coefficients du modèle élasto-viscoplastique développé au LMA-RC pour décrire le comportement viscoplastique orthotrope des tubes de gaines du crayon combustible [R5.03.10].  
Brièvement, les relations de comportement sont :

$$\left\{ \begin{aligned} f &= |\tilde{\sigma} - X| - R_0 = \sqrt{\frac{3}{2}} (\tilde{\sigma} - X)^t M (\tilde{\sigma} - X) \\ \dot{\varepsilon}^{vp} &= \dot{\nu} \frac{\partial f}{\partial \sigma} = \frac{3}{2} \dot{\nu} \frac{M (\tilde{\sigma} - X)}{|\tilde{\sigma} - X|} \quad \dot{\nu} = \sqrt{\frac{2}{3}} (\dot{\varepsilon}^{vp})^t M \dot{\varepsilon}^{vp} = \dot{\varepsilon} \left\{ \sinh \left( \frac{|\tilde{\sigma} - X|}{K} \right) \right\}^n \\ \dot{X} &= p \left( \frac{2}{3} Y(\nu) N \dot{\varepsilon}^{vp} - Q (X - X^{(1)}) \dot{\nu} \right) - \left\{ r_m \sinh \left( \left( \frac{|X|}{X_0} \right)^m \right) \right\} N R \frac{X}{|X|} \\ \dot{X}^{(1)} &= p_1 \left( \frac{2}{3} Y(\nu) N \dot{\varepsilon}^{vp} - Q (X^{(1)} - X^{(2)}) \dot{\nu} \right) \quad \dot{X}^{(2)} = p_2 \left( \frac{2}{3} Y(\nu) N \dot{\varepsilon}^{vp} - Q X^{(2)} \dot{\nu} \right) \end{aligned} \right.$$

avec :  $Y(\nu) = Y_\infty + (Y_0 - Y_\infty) e^{b\nu}$      $|X| = \sqrt{\frac{3}{2}} X^t N X$

**Remarque :**

$\tilde{\sigma}$  représente le déviateur des contraintes et  $|\tilde{\sigma} - X|$  l'équivalent au sens de Hill.  
Les matrices  $M, N, R$  et  $Q$  permettent de décrire l'anisotropie de comportement viscoplastique.

**Remarque :**

Le comportement LMARC avec coefficient d'orthotropie n'est utilisable qu'en axisymétrie, si les coefficients donnés dans l'ordre (R,Z,T) correspondent aux axes globaux X,Y,Z.

## 4.16.1 Syntaxe

```
| / LMARC =
/ LMARC_FO = F (
    ♦ R_0 = R0, [R] ou [fonction**]
    ♦ DE_0 = eps_0, [R] ou [fonction**]
    ♦ N = n, [R] ou [fonction**]
    ♦ K = k, [R] ou [fonction**]
    ♦ Y_0 = y0, [R] ou [fonction**]
    ♦ Y_I = yinfi, [R] ou [fonction**]
    ♦ B = b, [R] ou [fonction**]
    ♦ A_0 = X0, [R] ou [fonction**]
    ♦ RM = rm, [R] ou [fonction**]
    ♦ M = m, [R] ou [fonction**]
    ♦ P = p, [R] ou [fonction**]
    ♦ P1 = p1, [R] ou [fonction**]
    ♦ P2 = p2, [R] ou [fonction**]
    ♦ M11 = M11, [R] ou [fonction**]
    ♦ M22 = M22, [R] ou [fonction**]
    ♦ M33 = M33, [R] ou [fonction**]
    ♦ M66 = M66, [R] ou [fonction**]
    ♦ N11 = N11, [R] ou [fonction**]
    ♦ N22 = M22, [R] ou [fonction**]
    ♦ N33 = N33, [R] ou [fonction**]
    ♦ N66 = N66, [R] ou [fonction**]
    ♦ Q11 = Q11, [R] ou [fonction**]
    ♦ Q22 = Q22, [R] ou [fonction**]
    ♦ Q33 = Q33, [R] ou [fonction**]
    ♦ Q66 = Q66, [R] ou [fonction**]
    ♦ R11 = R11, [R] ou [fonction**]
    ♦ R22 = R22, [R] ou [fonction**]
    ♦ R33 = R33, [R] ou [fonction**]
    ♦ R66 = R66, [R] ou [fonction**]
)
```

## 4.17 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.

### 4.17.1 Syntaxe

```
| IRRAD3M = _F (
    ♦ R02          = R02,          [fonction+++]
    ♦ EPSI_U       = eps i,        [fonction+++]
    ♦ RM           = RM            [fonction+++]
    ♦ AIO          = AIO           [R]
    ◇ ZETA_F       = y0            [fonction+++]
    ♦ ETAI_S       = etai,         [R]
    ♦ RG0          = R,            [fonction+++]
    ♦ ALPHA        = ALPHA,        [R]
    ♦ PHI0         = PHI0,         [R]
    ◇ KAPPA        = / KAPPA       [R]
                                / 0.8 [DEFAULT]
    ◇ ZETA_G       = z0            [fonction+++]
)
```

### 4.17.2 Opérandes R02/RM/EPSI\_U/KAPPA

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

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.

### 4.17.3 Opérandes AIO/ZETA\_F/ETAI\_S

```
AIO = AIO,
ZETA_F = y0.
ETAI_S = etai,
```

Paramètres liés à l'irradiation. y0 est une fonction de la température.

### 4.17.4 Opérandes RG0/ALPHA/PHI0/ZETA\_G

```
ALPHA = ALPHA,
PHI0 = PHI0,
RG0 = R,
ZETA_G = z0
```

Paramètres liés au gonflement.

## 5 Comportements liés à l'endommagement et la rupture

### 5.1 Mots clés facteur ROUSSELIER, ROUSSELIER\_FO

Définition des coefficients du modèle de comportement de rupture ductile de G. 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 :

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

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

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

Avec les coefficients matériaux  $D, \sigma_1, f_0$  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 :

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

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 :

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

deux caractéristiques supplémentaires sont alors nécessaires :  $f_l$  et  $\lambda$ .

- 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.  
Le tableau suivant de correspondance doit être utilisé:

Modélisation	Mots-clés
$D$	D
$\sigma_1$	SIGM_1
$f_0$	PORO_INIT
$f_c$	PORO_CRIT dp
$A$	PORO_ACCE
$A_n$	AN
$f_l$	PORO_LIMI
$\lambda$	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.

## 5.1.1 Syntaxe

```
| / ROUSSELIER =
| / ROUSSELIER_FO=_F (
|   ◆ D = D, [R] ou [fonction**]
|   ◆ SIGM_1 = sigmal, [R] ou [fonction**]
|   ◆ PORO_INIT = f0, [R] ou [fonction**]
|   ◇ PORO_CRIT = / 1.D0, [DEFAULT]
|   / fc, [R]
|   ◇ PORO_ACCE = / 1.D0, [DEFAULT]
|   / A, [R]
|   ◇ AN = / 0.D0, [DEFAULT]
|   / An, [R]
|   ◇ PORO_LIMI = / 0.999, [DEFAULT]
|   / fl, [R]
|   ◇ D_SIGM_EPSI_NORM=/ 1.D0, [DEFAULT]
|   / lambda, [R]
|   ◇ DP_MAXI = / 0.1, [DEFAULT]
|   / dp, [R]
|   ◇ BETA = / 0.85, [DEFAULT]
|   / beta [R]
| )
```

## 5.2 Mots clés VENDOCHAB / VENDOCHAB\_FO

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

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

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  $x$ ,  $\tilde{\sigma}$  représente le déviateur des contraintes et  $\sigma_{eq}$  la contrainte équivalente de Von Mises.

## 5.2.1 Syntaxe

```
| / VENDUCHAB =
  / VENDUCHAB_FO = _F (
    ♦ S = s, [R] ou [fonction**]
    ♦ ALPHA_D = alpha, [R] ou [fonction**]
    ♦ BETA_D = beta, [R] ou [fonction**]
    ♦ N = N, [R] ou [fonction**]
    ♦ UN_SUR_M = UnsM, [R] ou [fonction**]
    ♦ UN_SUR_K = UnsK, [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.

Paramètre matériau	Symbole dans les équations	Mot clé dans Aster
Seuil de viscoplasticité	$S$	'S'
Coefficient 1 de la contrainte équivalente de fluage	$\alpha$	'ALPHA_D'
Coefficient 2 de la contrainte équivalente de fluage	$\beta$	'BETA_D'
Premier exposant de la loi viscoplastique	$N$	'N'
Deuxième exposant de la loi viscoplastique	$1/M$	'UN_SUR_M'
Coefficient de la loi viscoplastique	$1/K$	'UN_SUR_K'
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  $\chi(\sigma)$  MPa. Si  $K_D$  ne dépend que de  $\chi(\sigma)$ , il faut utiliser DEFI\_NAPPE de toute façon en introduisant par exemple 2 fois le même jeu de données en contrainte pour deux valeurs différentes de la température.

## 5.3 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 le fascicule [R5.04].

### 5.3.1 Syntaxe

```
| NON_LOCAL = _F (
|   ◇ LONG_CARA           = long,           [R]
|   ◇ COEF_RIGI_MINI     = coef,           [R]
|   ◇ C_GONF             = gonf,           [R]
|   ◇ PENA_LAGR          = pena,           [R]
| )
```

### 5.3.2 Opérands LONG\_CARA/COEF\_RIGI\_MINI/C\_GONF/PENA\_LAGR

LONG\_CARA = long

Détermine la longueur caractéristique ou échelle de longueur interne au matériau.

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 d'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 uniquement sur cette partie et donc de régulariser la variable de gonflement si on utilise la modélisation INCO\_GD.

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 noeuds (DDLs spécifiques au non local) et un champ aux points de Gauss (variable interne ou déformation).

Une valeur par défaut de 1000 est implantée. Il est déconseillé de diminuer cette valeur (perte de précision pour la résolution).

## 5.4 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 dans un milieu élastique fragile, voir [R7.02.11]. 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 mot clé est utilisé par les comportements RUPT\_FRAG, CZM\_\*.



## 5.4.1 Syntaxe

```

◇ | / RUPT_FRAG = _F (
    ♦ GC = gc, [R]
    ◇ SIGM_C = sigm, [R]
    ◇ PENA_ADHERENCE = pad, [R]
    ◇ PENA_CONTACT = /pco, [R]
    /1., [DEFAULT]
    ◇ PENA_LAGR = /pla, [R]
    /100., [DEFAULT]
    ◇ RIGI_GLIS = /pgl, [R]
    /10., [DEFAULT]
)
/ RUPT_FRAG_FO = _F (
    ♦ GC = gc, [fonction**]
    ◇ SIGM_C = sigm, [fonction**]
    ◇ PENA_ADHERENCE = pad, [fonction**]
    PENA_CONTACT = pco, [fonction**]
)

```

## 5.4.2 Opérande RUPT\_FRAG

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

## 5.4.3 Opérande SIGM\_C

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

## 5.4.4 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 de la modélisation PLAN\_FISSURE. Ils ne sont pas utilisés pour le critère de Griffith, c'est pourquoi ils apparaissent comme facultatifs au niveau du catalogue.*

## 5.4.5 Opérande PENA\_CONTACT

Petit paramètre de régularisation.

## 5.4.6 Opérandes PENA\_LAGR et RIGI\_GLIS

Paramètre de pénalisation du lagrangien ( $p_{la} \geq .01$ ) et rigidité en mode de glissement.

## 5.5 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 elasto-plastique endommageable à écrouissage isotrope et s'appuie sur le modèle de Lemaître [R7.01.20].

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\sigma_{eq}}{1-D} - R(p) - \sigma_y > 0 \\ \dot{\varepsilon}^p = \frac{3}{2} \frac{\dot{\lambda}}{1-D} \frac{\tilde{\sigma}}{\sigma_{eq}} \\ \dot{r} = \dot{\lambda} = \dot{p} (1-D) \\ R = k p^{1/m} \end{array} \right. \quad \text{Dans le domaine plastique} \quad D = 0, \text{ sinon } D = \frac{D_c}{p_R - p_D} (p - p_D)$$

## 5.5.1 Syntaxe

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

## 5.5.2 Opérande D\_CORR

Coefficient d'endommagement critique.

## 5.5.3 Opérandes ECRO\_K, ECRO\_M

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

## 5.5.4 Opérande SY

Limite d'élasticité initiale, notée  $\sigma_y$  dans les équations.

## 6 Comportements thermiques

Les divers comportements thermiques s'excluent mutuellement.

### 6.1 Mots clés facteur THER, THER\_FO

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

#### 6.1.1 Syntaxe

```

/ THER = _F (
    ◇ RHO_CP = cp, [R]
    ◆ LAMBDA = lambda [R]
)
/ THER_FO = _F (
    ◇ RHO_CP = cp, [fonction+]
    ◆ LAMBDA = lambda [fonction+]
)
    
```

#### 6.1.2 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 :

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

### 6.2 Mot clé facteur THER\_ORTH

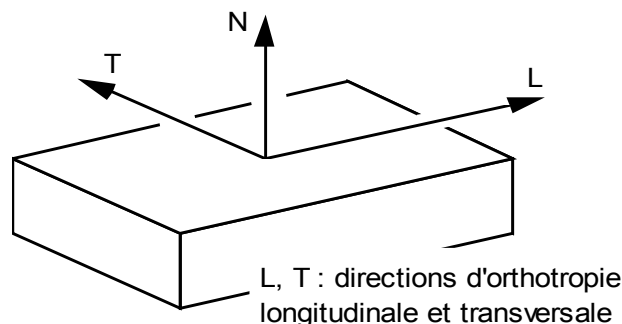
Définition des caractéristiques thermiques pour un matériau orthotrope.

Le lecteur pourra se reporter aux documentations suivantes :

[U4.42.03] DEFI\_COQU\_MULT

[U4.42.01] AFFE\_CARA\_ELEM

pour définir la direction longitudinale associée aux coques ou au 3D non isotrope.



#### 6.2.1 Syntaxe

```

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

## 6.2.2 Opérandes LAMBDA / RHO\_CP

LAMBDA\_L = la1  
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.

## 6.3 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]).

$$\dot{\rho} - (\lambda(T) \cdot \text{grad } T) = f$$

### 6.3.1 Syntaxe

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

## 6.3.2 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.

#### Remarque:

*Il n'est pas possible d'utiliser une formule pour RHO\_CP, cette fonction devant être intégrée pour obtenir BETA. L'utilisateur, s'il désire utiliser une formule, doit d'abord la tabuler à l'aide la commande CALC\_FONC\_INTERP.*

LAMBDA = lambda  
Conductivité thermique isotrope fonction de la température.

## 6.4 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.  
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 11, 12 et 13. 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.

## 6.4.1 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+]
)
```

## 6.4.2 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 11*P1*P1
COND_LMP = a1112
terme lié à l'intégrale de 11*P1*P2
COND_LPP = a1122
terme lié à l'intégrale de 11*P2*P2
COND_LSI = a1123
terme lié à l'intégrale de 11*P2*P3
COND_TMM = a2211
terme lié à l'intégrale de 12*P1*P1
COND_TMP = a2212
terme lié à l'intégrale de 12*P1*P2
COND_TPP = a2222
terme lié à l'intégrale de 12*P2*P2
COND_TSI = a2223
terme lié à l'intégrale de 12*P2*P3
```

## 6.4.3 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  $\omega_{+}$  et  $\omega_{-}$ , défini dans la note [R3.11.01], on a pour le tenseur de conductivité transverse :

```
COND_NMM = b11  
terme lié à l'intégrale de 13*P1*P1  
COND_NMP = b12  
terme lié à l'intégrale de 13*P1*P2  
COND_NPP = b22  
terme lié à l'intégrale de 13*P2*P2  
COND_NSI = b23  
terme lié à l'intégrale de 13*P2*P3
```

## 6.4.4 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 RHOC*P1*P1  
CMAS_MP = c12  
terme lié à l'intégrale de RHOC*P1*P2  
CMAS_PP = c22  
terme lié à l'intégrale de RHOC*P2*P2  
CMAS_SI = c23  
terme lié à l'intégrale de RHOC*P2*P3
```

## 7 Comportements spécifiques aux bétons

### 7.1 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].

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

$$\frac{d\xi}{dt} = A(\xi) \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad \text{éq 7.1-2}$$

#### 7.1.1 Syntaxe

```
| THER_HYDR = _F (
    ♦ LAMBDA      = lambda,      [fonction**]
    ◇ BETA        = beta,        [fonction**]
    ♦ AFFINITE    = A,           [fonction]
    ♦ CHALHYDR    = Q,           [R]
    ♦ QSR_K       = QsR          [R]
)
```

#### 7.1.2 Opérands LAMBDA / BETA

LAMBDA = lambda

Conductivité thermique isotrope fonction de la température.

BETA = beta

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

#### 7.1.3 Opérande AFFINITE

AFFINITE = A

Fonction du degré d'hydratation déterminée par un essai calorimétrique du béton (fonction de la grandeur HYDR).

#### 7.1.4 Opérande CHAL\_HYDR

CHAL\_HYDR = Q

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

#### 7.1.5 Opérande QSR\_K

QSR\_K

Constante d'Arrhénius exprimée en degré Kelvin.

$$QSR\_K = \frac{E_a}{R}$$

## 7.2 Mot clé facteur SECH\_GRANGER

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).

### 7.2.1 Syntaxe

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

### 7.2.2 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 L. Granger :

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

A= a

Coefficient de diffusion variant de  $0.5 \cdot 10^{-13}$  et  $2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$  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.

## 7.3 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 simplifiée du cas général, constituant la loi de Mensi.

### 7.3.1 Syntaxe

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

### 7.3.2 Opérandes A / B

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

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

A= a



Coefficient de diffusion variant de  $0.5 \cdot 10^{-13}$  et  $2 \cdot 10^{-13}$  m<sup>2</sup>/s pour le béton.

B= b

Coefficient de l'ordre de 0.05 pour le béton.

## 7.4 Mot clé facteur SECH\_BAZANT

Définition des paramètres caractérisant le coefficient de diffusion intervenant dans l'équation non linéaire du séchage proposée par Bazant (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). Cette formulation constitue la loi de Bazant.

### 7.4.1 Syntaxe

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

### 7.4.2 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  $3 \cdot 10^{-13}$  m<sup>2</sup>/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.

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'.*

## 7.5 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.

### 7.5.1 Syntaxe

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

### 7.5.2 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.

## 7.6 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 :

- $\sigma = Ee$  tant que  $\sigma \leq \sigma_y$  ;  $E$  défini sous `ELAS`
- $\sigma = \sigma_y$  pour  $\frac{\sigma_y}{E} \leq e \leq e_h$
- $\sigma = \sigma_u - (\sigma_u - \sigma_y) \left( \frac{\varepsilon_u - \varepsilon}{\varepsilon_u - \varepsilon_h} \right)^4$  pour  $\varepsilon_h \leq \varepsilon < \varepsilon_u$   
( $\varepsilon$  ne peut pas dépasser  $\varepsilon_u$ )

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

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

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

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

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

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

$$\varepsilon_y^n = \varepsilon_r^{n-1} + \frac{\sigma_y^n - \sigma_r^{n-1}}{E}$$

$$\sigma_y^n = \sigma_y^{n-1} \cdot \text{sign}(\varepsilon_y^{n-1} - \varepsilon_r^{n-1}) + \varepsilon_H (\varepsilon_r^{n-1} - \varepsilon_y^{n-1})$$

La variable  $\xi$  est définie par :

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

où  $\varepsilon_r^{n-1}$  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  $n-1$  et  $n$ .

$b$  représente soit la valeur fournie par l'utilisateur (mot clé EP\_SUR\_E) soit, à défaut :

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

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

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

$\xi'$  représente la plus grande « excursion plastique » au cours du chargement:  $\xi' = \max_n (\varepsilon_r^n - \varepsilon_y^n)$  et

$$\sigma_\infty = 4 \frac{\sigma_y}{L/D}$$

Dans le cas du flambage, on ajoute à  $\sigma_y^n$  la valeur  $\sigma_s^* = \gamma_s b E \frac{b - b_c}{1 - b_c}$  avec

$$\gamma_s = \frac{11 - L/D}{10 \left( e^{\frac{cL}{D}} - 1 \right)}.$$

## 7.6.1 Syntaxe

```
| PINTO_MENEGOTTO = _F (
    ♦ SY = sigm, [R]
    ♦ EPSI_ULTM = epsu, [R]
    ♦ SIGM_ULTM = sigmu, [R]
    ◇ ELAN = / L/D, [R]
    / 4., [DEFAULT]
    ♦ EPSP_HARD = epsh, [R]
    ◇ R_PM = / R0, [R]
    / 20., [DEFAULT]
    ◇ EP_SUR_E = b, [R]
    ◇ A1_PM = / a1, [R]
    / 18.5, [DEFAULT]
    ◇ A2_PM = / a2, [R]
    / 0.15, [DEFAULT]
    ◇ A6_PM = / a6, [R]
    / 620., [DEFAULT]
    ◇ C_PM = / c, [R]
    / 0.5, [DEFAULT]
    ◇ A_PM = / a, [R]
    / 0.006 [DEFAULT]
)
```

## 7.6.2 Opérandes

SY = sigm

Limite d'élasticité initiale, notée  $\sigma_y$ , dans les équations.

EPSI\_ULTM = epsu, notée  $\varepsilon_u$  dans les équations.

Déformation ultime.

SIGM\_ULTM = sigmu, notée  $\sigma_u$  dans les équations.

Contrainte ultime.

◇ ELAN = L/D

Elancement de la barre (>5 : flambage).

EPSP\_HARD = epsh, notée  $\varepsilon_h$  dans les équations.

Déformation correspondant à la fin du palier plastique.

◇ EP\_SUR\_E = b

Ratio pente d'écrouissage/module d'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  $\gamma_s$

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  $R_0$  (20. Par défaut).

Le module d'Young  $E$  et le coefficient de dilatation thermique  $\alpha$  sont à préciser par les mots-clés ELAS ou ELAS\_FO.

## 7.7 Mots clés facteur BPEL\_BETON, BPEL\_ACIER

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

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

### 7.7.1 Syntaxe

```
| / BPEL_BETON = _F (
    ◇ PERT_FLUA = / xflu, [R]
                  / 0., [DEFAULT]
    ◇ PERT_RETR = / xret, [R]
                  / 0. [DEFAULT]
)
/ BPEL_ACIER = _F (
    ◇ RELAX_1000 = / rh1000, [R]
                  / 0., [DEFAULT]
    ◇ MU0_RELAX = / mu0, [R]
                  / 0., [DEFAULT]
    ◇ F_PRG = fprg, [R]
    ◇ FROT_COURB = / f, [R]
                  / 0., [DEFAULT]
    ◇ FROT_LINE = / phi, [R]
                  / 0. [DEFAULT]
)
```

### 7.7.2 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.

$PERT\_FLUA = x_{flu}$

Taux forfaitaire de perte de tension par fluage du béton, par rapport à la tension initiale.

$\Delta F_{flu} = x_{flu} \cdot F_0$  où  $F_0$  désigne la tension initiale définie 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.

$PERT\_RETR = x_{ret}$

Taux forfaitaire de perte de tension par retrait du béton, par rapport à la tension initiale.

$\Delta F_{ret} = x_{ret} \cdot F_0$  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.

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

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\_COORB = f

Coefficient de frottement du câble sur le béton en partie courbe, en  $\text{rad}^{-1}$ . La valeur par défaut est 0.

FROT\_LINE = phi

Coefficient de frottement par unité de longueur, en partie droite. La valeur par défaut est 0.

## 7.8 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].

### 7.8.1 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,          [fonction]
    ♦ LONG_CARA      = l_cara,        [R]
    ♦ ECRO_COMP_P_PIC = /'LINEAIRE', [DEFAULT]
                                /'PARABOLE', [TXM]
    ♦ ECRO_TRAC_P_PIC = /'LINEAIRE', [DEFAULT]
                                /'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 Drucker Prager. En complément de ces caractéristiques, le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, et le coefficient de dilatation thermique  $\alpha$ , 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 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  $\theta$ , 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.

### 7.8.2 Opérands 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  $\beta$ .

## 7.8.3 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.

## 7.8.4 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'écroutissage ultime en traction suivant la formule (pour un écroutissage post-pic linéaire) :

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

Dans le cas particulier d'un maillage contenant des mailles adjacentes dont les dimensions sont très différentes, les écroutissages 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. Le 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 LONG\_CARA doit être réservée 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

$(G_t, \text{LONG\_CARA})$  tel que  $\frac{2 \cdot G_t(\theta)}{l_c \cdot f'_t(\theta)}$  vaille la valeur qu'il souhaite pour l'écroutissage ultime en

traction  $\kappa_u$ . (La valeur usuelle de la déformation associée à l'écroutissage ultime en traction d'un béton moyen est de 5.E-4).

## 7.8.5 Opérandes COMP\_POST\_PIC / TRAC\_POST\_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.





## 7.9 Mot clé facteur GRANGER\_FP, GRANGER\_FP\_INDT, V\_GRANGER\_FP

Définition des paramètres matériaux pour le modèle viscoélastique de Granger, modélisant le fluage propre du béton. Il existe 3 relations de comportement : la première GRANGER\_FP ne prend pas en compte le phénomène de vieillissement, la deuxième GRANGER\_FP\_INDT est identique sans effet de la température, la troisième V\_GRANGER\_FP rend compte du vieillissement. Cf [R7.01.01].

En 1D et en fluage, le modèle s'écrit :  $\varepsilon_{fl}(t) = J(t, t_c, T, h) \cdot \sigma_0$  avec

$$J(t, t_c, T, h) = h \cdot \frac{T - (T_{ref} - 45)}{45} \cdot k(tc_{eq}) \cdot \sum_{s=0}^n J_s \left( 1 - \exp\left(\frac{t_{eq} - t_c}{\tau_s}\right) \right)$$

$t_c$  désigne le temps de chargement

$h = c^{-1}(C)$ , ou  $C$  est la courbe isotherme de désorption permettant de passer du séchage  $C$  à l'hygrométrie  $h$ .

$$t_{eq}(t) = \int_{s=t_0}^t \exp\left(-\frac{U_c}{R} \left(\frac{1}{T(s)} - \frac{1}{293}\right)\right) ds$$

$$k(tc_{eq}) = \frac{28^{0.2} + 0.1}{tc_{eq}^{0.2} + 1} \quad \text{dans le cas où on prend en compte le phénomène de vieillissement,}$$

$$k(tc_{eq}) = 1 \quad \text{sinon} \quad tc_{eq}(t_c) = \int_{s=t_0}^{t_c} \exp\left(-\frac{u_v}{R} \left(\frac{1}{T(s)} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) ds$$

### Remarques :

$T_{ref}$  est la température de référence, elle est choisie par l'utilisateur à l'aide de la commande AFPE\_MATERIAU.

Ce comportement peut être associé aux effets de dilatation et de retrait thermique définis par les opérandes K\_DESSIC et B\_ENDOGE sous le mot clé ELAS\_FO.

Pour GRANGER\_FP\_INDT, la température n'intervient pas. Donc le terme multiplicatif  $\frac{T - (T_{ref} - 45)}{45}$  est supprimé, de même que la dépendance de  $t_{eq}(t)$  à la température.

### 7.9.1 Syntaxe pour le fluage propre

```
| GRANGER_FP = _F (
|   ◇ J1      = J1,      [R]
|   ◇ J2      = J2,      [R]
|   ◇ J3      = J3,      [R]
|   ◇ J4      = J4,      [R]
|   ◇ J5      = J5,      [R]
|   ◇ J6      = J6,      [R]
|   ◇ J7      = J7,      [R]
|   ◇ J6      = 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]
|   ◇ QSR_K  = qsr       [R]
| )
```

### 7.9.2 Opérandes pour le fluage propre

J1 = J1

```
...  
...  
J8      =    J8
```

8 coefficients matériaux de la fonction de fluage, homogènes à un temps.

```
TAUX_1 =tau1  
...  
...  
TAUX_8 =tau8
```

8 coefficients de «retard» de la fonction de fluage, homogènes à un temps.

```
QSR_K    =    Uc/R
```

Constante énergie d'activation intervenant dans le terme temps équivalent  $t_{eq}$  modélisant l'effet de la température sur la cinétique de fluage.

### 7.9.3 Syntaxe pour le fluage propre indépendant de la température

La syntaxe est identique au cas avec effet de la température, sans le mot clé QSR\_K.

### 7.9.4 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_GRANGER_FP =_F      (  
                                ⋄ QSR_VEIL    = USR,                [R]  
                                ⋄ FONC_V      = k(tceq),           [fonction,  
                                                                formule]  
                                )
```

### 7.9.5 Opérands pour le vieillissement

```
QSR_VEIL = USR
```

Constante énergie d'activation intervenant dans le terme temps de charge équivalent  $t_{ceq}$  modélisant l'effet de la température sur le vieillissement  $\frac{u_v}{R}$ .

```
FONC_V = k (tceq)
```

Fonction de vieillissement.

## 7.10 Mot clé NADAI\_B

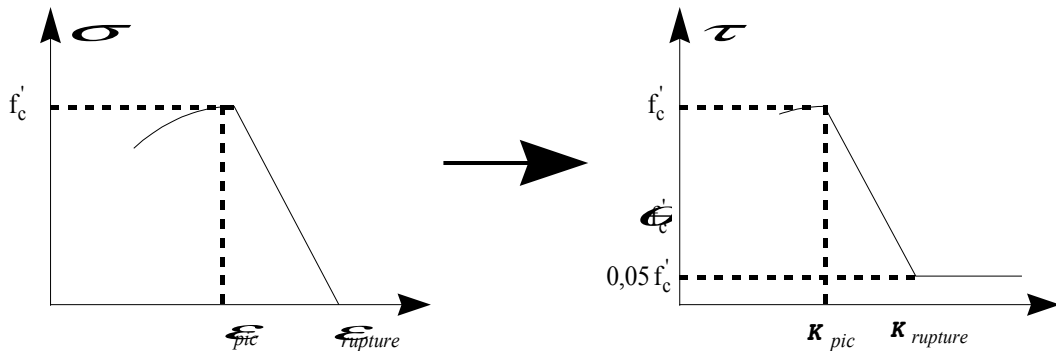
La loi de comportement NADAI\_B est un modèle de comportement du béton intégrant des déformations plastiques en compression et un modèle de fissuration en traction. Ce modèle permet de représenter le comportement du béton sous chargement cyclique, une attention particulière étant apportée à la gestion des ouvertures et fermetures des fissures.

Pour le comportement en compression, la modélisation est développée dans le cadre de l'élastoplasticité standard : seuil de réversibilité (type Drucker-Prager), écoulement plastique normal associé.

Pour le comportement en traction, le modèle se situe dans le cadre de la fissuration répartie. Un seuil de réversibilité en traction est défini. La première fissuration est détectée en un point géométrique donné quand les contraintes dépassent le seuil en traction pour la première fois. Le point est alors déclaré fissuré, la direction de la fissure étant la direction perpendiculaire à la contrainte principale majeure à cet instant. La loi de comportement du béton en ce point devient alors une loi orthotrope, les axes d'orthotropie étant ceux parallèles et perpendiculaires à la fissure (dont l'orientation de changera plus)

Les paramètres de la loi sont déterminés à partir d'un essai en compression uniaxial, de la résistance en traction du béton :  $f'_t$  et de la déformation à rupture en traction :  $\varepsilon_{rupture}^{traction}$

De la courbe contrainte-déformation en compression, on déduit la courbe contrainte-déformation plastique en compression.



Essai de compression uniaxial

Courbe contrainte-déformation plastique

De la courbe courbe contrainte-déformation plastique en compression, on déduit :

- $f'_c$  contrainte limite en compression
- $q$  paramètre tel que  $q f'_c$  définit la surface de charge initiale en compression
- $K_{pic}$  déformation plastique au pic (epc)
- $K_{rupture}$  déformation plastique à rupture (erc)

L'utilisateur qui ne disposerait pas des essais nécessaires pour fournir ces données peut utiliser les règlements qui permettent d'estimer une valeur du module d'Young, du coefficient de Poisson, de la limite en traction en fonction de la contrainte limite en compression.

## 7.10.1 Syntaxe

Nous indiquons ci dessous la correspondance entre les mots clé du comportement `NABAI_B` et les paramètres définis ci dessus :

```
| NABAI_B : _F (
    ♦ F_C      = , [R]
    ♦ F_T      = , [R]
    ♦ CRIT_E_C = theta, [R]
    ♦ EPSP_P_C = epc, [R]
    ♦ EPSP_R_C = erc, [R]
    ♦ EPSI_R_T = ert, [R]
    ♦ FAC_T_C  = f [R]
)
```

Le module d'Young  $E_0$  et le coefficient de Poisson  $\nu$  sont ceux fournis sous le mot clé facteur ELAS.

## 7.10.2 Opérandes `F_C` / `F_T`

`F_C` =  $f'_c$  contrainte limite en compression  $f'_c \geq 0$  .  
`F_T` =  $f'_t$  : contrainte limite en traction valeur recommandée 0,1  $f'_t \geq 0$  .

## 7.10.3 Opérande `CRIT_E_C`

`CRIT_E_C` = theta  
 paramètre permettant de définir la surface de charge initiale en compression. Valeur recommandée 0,3 (0.  $\square$  theta  $\square$  1.0) .

## 7.10.4 Opérandes `EPSP_P_C` / `EPSP_R_C` / `EPSI_R_T`

`EPSP_P_C` = epc

Déformation plastique ou pic.  $E_{pc}$  ☐ 0.

$EPSP\_R\_C$  =  $erc$

Déformation plastique à rupture. Valeur recommandée 0,0005.  $erc$  ☐ 0.

$EPSI\_R\_T$  =  $ert$

Déformation à rupture en traction. Valeur recommandée 0,0005.  $ert$  ☐ 0.

## 7.10.5 Opérande **FAC\_T\_C**

$FAC\_T\_C$  =  $f$

facteur de transfert de cisaillement. Valeur recommandée 0,4. 0. ☐  $\theta$  ☐ 1.0.

## 7.11 Mot clé **LABORD\_1D**

Ce modèle de comportement non linéaire du béton est employé dans des situations uniaxiales sous l'effet de chargements monotones et cycliques. Le modèle est décrit dans la cadre de formulation thermodynamique des processus irréversibles. Il permet de tenir compte de l'endommagement du béton en traction et en compression, séparément, gère l'ouverture et la re-fermeture des fissures, et tient compte de la déformation non réversible.

Ce modèle a été développé pour être employé avec les éléments de poutre multifibres [R7.01.07].

### Remarque :

| La prise en compte de l'effet d'un chargement thermique n'est pas possible pour le moment.

### 7.11.1 Syntaxe

```
◇ | LABORD_1D = _F (
    ◇ Y01      = Y01 ,           [R]
    ◇ Y02      = Y02 ,           [R]
    ◇ A1       = A1 ,           [R]
    ◇ A2       = A2 ,           [R]
    ◇ B1       = B1 ,           [R]
    ◇ B2       = B2 ,           [R]
    ◇ BETA1    = beta1 ,        [R]
    ◇ BETA2    = beta2 ,        [R]
    ◇ SIGF     = sigf           [R]
)
```

### 7.11.2 Opérandes

$Y01$  =  $Y01$

Seuil d'évolution de la variable d'endommagement sous traction

$Y02$  =  $Y02$

Seuil d'évolution de la variable d'endommagement sous compression

$A1$  =  $A1$

Paramètre multiplicateur décrivant la cinétique d'évolution de la variable d'endommagement sous traction

$A2$  =  $A2$

Paramètre multiplicateur décrivant la cinétique d'évolution de la variable d'endommagement sous compression

$B1$  =  $B1$

Paramètre de puissance décrivant la cinétique d'évolution de la variable d'endommagement sous traction

$B2$  =  $B2$

Paramètre de puissance décrivant la cinétique d'évolution de la variable d'endommagement sous compression

$BETA1$  =  $\beta_{a1}$

Paramètre décrivant l'amplitude de la déformation anélastique sous traction

$BETA2$  =  $\beta_{a2}$

Paramètre décrivant l'amplitude de la déformation anélastique sous compression

SIGF = sigf

Paramètre indiquant la contrainte d'ouverture et de re-fermeture de fissure

## 7.12 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 (cf. [R7.01.08]). Les paramètres peuvent être fonction de la température, utiliser alors MAZARS\_FO. Attention, en pratique, on considère que les paramètres dépendent de la température maximale vue par le matériau.

### 7.12.1 Syntaxe

```
| MAZARS
  MAZARS_FO = _F(
    ♦ EPSD0 = epsd0,      [R] ou [fonction**]
    ♦ AC     = Ac,        [R] ou [fonction**]
    ♦ AT     = At,        [R] ou [fonction**]
    ♦ BC     = Bc,        [R] ou [fonction**]
    ♦ BT     = Bt,        [R] ou [fonction**]
    ♦ BETA   = beta,      [R]
    ♦ CHI    = chi        [R]
  )
```

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.

### 7.12.2 Opérandes EPSD0

EPSD0 = epsd0

Seuil d'endommagement en déformation  $(0.5 \cdot 10^{-4} < \varepsilon_{d0} < 1.5 \cdot 10^{-4})$ .

### 7.12.3 Opérandes AC / AT / BC / BT

AC = Ac

Coefficient permettant de fixer l'allure de la courbe post-pic en compression. Introduit une asymptote horizontale qui est l'axe des  $\varepsilon$  pour  $A_c = 1$  et l'horizontale pour passant par le pic pour  $A_c = 0$  (généralement  $1 < A_c < 1.5$ ).

AT = At

Coefficient permettant de fixer l'allure de la courbe post-pic en traction. Introduit une asymptote horizontale qui est l'axe des  $\varepsilon$  pour  $A_t = 1$  et l'horizontale passant par le pic pour  $A_t = 0$  (généralement  $0.7 < A_t < 1$ ).

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 ( $B_c < 10^4$ ) ou une phase préliminaire d'accroissement de contrainte suivie d'une décroissance plus ou moins rapide (généralement  $10^3 < B_c < 2 \cdot 10^3$ ).

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 ( $B_t < 10^4$ ) ou une phase préliminaire

d'accroissement de contrainte suivie d'une décroissance plus ou moins rapide (généralement  $10^4 < Bt < 10^5$ ).

## 7.12.4 Opérande BETA

BETA = beta

Paramètre de correction pour le cisaillement. Valeur conseillé 1.06.

## 7.12.5 Opérande CHI

CHI = chi

Dans le cadre du couplage BETON\_UMLV\_FP 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 du béton, c'est pourquoi la valeur à utiliser se situe plutôt autour de 0.4/0.7.

## 7.13 Mot clé BETON\_UMLV\_FP

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 :  $\varepsilon^s = h \cdot f(\sigma^s)$  et, partie déviatorique :  $\underline{\underline{\varepsilon}}^d = h \cdot f(\underline{\underline{\sigma}})$

Où  $h$  désigne l'humidité relative interne.

Le modèle de comportement BETON\_UMLV\_FP 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 :

$$\varepsilon^{fs} = \underbrace{\varepsilon_r^{fs}}_{\text{partie réversible}} + \underbrace{\varepsilon_i^{fs}}_{\text{partie irréversible}}$$

Le processus de déformation sphérique du fluage est gouverné par le système d'équations couplées suivant :

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_r^{fs} = \frac{1}{\eta_r^s} \cdot [h \cdot \sigma^s - k_r^s \cdot \varepsilon_r^{fs}] - \dot{\varepsilon}_i^{fs} \\ \dot{\varepsilon}_i^{fs} = \frac{1}{\eta_i^s} \langle [k_r^s \cdot \varepsilon_r^{fs} - (k_r^s + k_i^s) \cdot \varepsilon_i^{fs}] - [h \sigma^s - k_r^s \cdot \varepsilon_r^{fs}] \rangle^+ \end{cases}$$

où  $k_r^s$  désigne la rigidité apparente associée au squelette formé par des blocs d'hydrates à l'échelle mésoscopique;  $\eta_r^s$  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  $\eta_i^s$  viscosité apparente associée au mécanisme de diffusion interfoliaire.

(Les crochets  $\langle \rangle^+$  désignent l'opérateur de Mac Cauley:  $\langle x \rangle^+ = \frac{1}{2}(x + |x|)$ )

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 :

$$\underbrace{\underline{\underline{\varepsilon}}}_{\substack{\text{déformation} \\ \text{déviatorique} \\ \text{totale}}}^{fd} = \underbrace{\underline{\underline{\varepsilon}}_r}_{\substack{\text{contribution} \\ \text{eau} \\ \text{absorbée}}}^{fd} + \underbrace{\underline{\underline{\varepsilon}}_i}_{\substack{\text{contribution} \\ \text{eau} \\ \text{libre}}}^{fd}$$

La  $j^{\text{ème}}$  composante principale de la déformation déviatorique totale est régie par le système d'équations suivants :

$$\tilde{\sigma}^j \left( 1 + \frac{\eta_r^d}{\eta_i^d} \right) + \frac{k_r^d}{\eta_i^d} \tilde{\sigma}^j = \eta_r^d \ddot{\varepsilon}^{d,j} + k_r^d \dot{\varepsilon}^{d,j}$$

où  $k_r^d$  désigne la rigidité associée à la capacité de l'eau absorbée à transmettre des charges (*load bearing water*);  $\eta_r^d$  la viscosité associée à l'eau adsorbée par les feuillets d'hydrates et  $\eta_i^d$  désigne la viscosité associée à l'eau libre.

## 7.13.1 Syntaxe

```
| BETON_UMLV_FP : _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]
    ♦ ETA_ID    = ETA_ID,        [R]
    ◇ ETA_FD    = ETA_FD         [R]
)
```

## 7.13.2 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

$\eta_r^s$  viscosité apparente associée au mécanisme de diffusion au sein de la porosité capillaire

ETA\_IS = ETA\_IS

$\eta_i^s$  viscosité apparente associée au mécanisme de diffusion interlamellaire

ETA\_RD = ETA\_RD

$\eta_r^d$  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`.

## 7.14 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`).

### 7.14.1 Syntaxe

```
| BETON_ECRO_LINE = _F (
    ♦ D_SIGM_EPSI = dsde, [R]
    ♦ SYT = sigt, [R]
    ♦ SYC = sigc, [R]
)
```

### 7.14.2 Opérandes

`D_SIGM_EPSI` = `dsde` (ET)

Pente de la courbe de traction.

`SYT` = `sigt`

Contrainte maximum en traction simple.

`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 d'Young  $E$  est à préciser par les mots-clés `ELAS` ou `ELAS_FO`.

## 7.15 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.

### 7.15.1 Syntaxe

```
| ENDO_ORTH_BETON = _F (
    ♦ ALPHA = / alpha, [R]
    / 0.9, [DEFAULT]
    ♦ K0 = k0, [R]
    ♦ K1 = k1, [R]
    ♦ K2 = / k2, [R]
    / 0.0007, [DEFAULT]
    ♦ ECROB = ecrob, [R]
    ♦ ECROD = ecrod [R]
)
```

### 7.15.2 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.

### 7.15.3 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  $7.10^{-4}$ .

## 7.15.4 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. Permet de contrôler la forme du pic en traction.

ECROD = ecrod

Terme de l'énergie bloquée (équivalente à une énergie d'écrouissage) relatif à l'évolution de l'endommagement de compression. Permet de contrôler la forme du pic en compression.

Le module d'Young E et le coefficient de Poisson  $\nu$  sont à préciser par les mots-clés ELAS ou ELAS\_FO.

Dans le cas d'un calcul non local avec la formulation GRAD\_EPSI, la longueur caractéristique est à préciser derrière le mot-clé NON\_LOCAL.

## 7.16 Mots clés 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 formulé en terme de relations déformation/contrainte généralisées (extension membranaire, flexion et effort membranaire, moment fléchissant).

### 7.16.1 Syntaxe

```
| GLRC_DM = _F (
    ♦ SYT          = Nf,          [R]
    ♦ SYF          = Mf,          [R]
    ♦ GAMMA_T      = Gmt,         [R]
    ♦ GAMMA_F      = Gmf,         [R]
    ◇ EF           = Ef,          [R]
    ◇ NUF          = Nuf,         [R]
)
```

### 7.16.2 Opérandes

SYT = Nf

Contrainte correspondant à l'effort membranaire du seuil d'endommagement en traction simple.

SYF = Mf

Moment fléchissant du seuil d'endommagement en flexion simple.

GAMMA\_T = Gmt

Pente endommageante relative par rapport à la pente élastique en traction simple ( $0 < \gamma_{MT} < 1$ ).

GAMMA\_F = Gmf

Pente endommageante relative par rapport à la pente élastique en flexion simple ( $0 < \gamma_F < 1$ ).

EF = Ef

Module d'Young effectif en flexion.

NUF = Nuf

Coefficient de Poisson effectif en flexion.

## 7.17 Mot clé 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 :

$$\begin{aligned}
 &\bullet \text{En traction :} \quad \begin{cases} \sigma = E \varepsilon & \text{si } 0 < \varepsilon < \frac{\sigma_y^t}{E} \\ \sigma = \sigma_y^t + E_T \left( \varepsilon - \frac{\sigma_y^t}{E} \right) & \text{si } \frac{\sigma_y^t}{E} < \varepsilon < \frac{\sigma_y^t}{E} \left( 1 - \frac{E}{E_T} \right) \\ \sigma = 0 & \text{sinon} \end{cases} \\
 &\bullet \text{En compression :} \quad \begin{cases} \sigma = \sigma_y^c \left( 1 + \frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_c} \right)^n & \text{si } \varepsilon < \varepsilon_c \\ \sigma = \sigma_y^c & \text{sinon} \end{cases}
 \end{aligned}$$

### 7.17.1 Syntaxe

```

| BETON_REGLE_PR = _F (
|     ♦ DSIGM_EPSI = Et [R]
|     ♦ SYT = Syt [R]
|     ♦ SYC = Syc [R]
|     ♦ EPSC = Epsc [R]
|     ♦ N = N [ R]
| )
    
```

### 7.17.2 Opérandes

DSIGM\_EPSI = Et  
Module tangent post-pic en traction  $E_t$  (négatif).  
SYT = Syt  
Contrainte ultime en traction  $\sigma_y^t$ .  
SYC = Syc  
Contrainte ultime en compression  $\sigma_y^c$ .  
EPSC = Epsc  
Déformation ultime en compression  $\varepsilon_c$ .  
N = n  
Exposant de la loi d'écrouissage en compression

## 7.18 Mot clé JOINT\_BA

Ce 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.

## 7.18.1 Syntaxe

```
◇ | JOINT_BA = _F(  
    ♦ HPEN = / HPEN, [R]  
    / 1.0, [DEFAULT]  
    ♦ GTT = GTT, [R]  
    ♦ GAMD0 = Gam0, [R]  
    ♦ AD1 = ad1, [R]  
    ♦ BD1 = / bd1, [R]  
    / 0.5, [DEFAULT]  
  
    ♦ GAMD2 = Gam2, [R]  
    ♦ AD2 = ad2, [R]  
    ♦ BD2 = / bd2, [R]  
    / 1.0 [DEFAULT]  
  
    ♦ VIFROT = vifrot, [R]  
    ♦ FA = alpha, [R]  
    ♦ FC = c, [R]  
    ♦ EPSTR0 = EPSN, [R]  
    ♦ ADN = adn, [R]  
    ♦ BDN = / bdn, [R]  
    / 1.0 [DEFAULT]  
  
)
```

## 7.18.2 Opérandes

HPEN = HPEN

Paramètre de pénétration entre surfaces par écrasement du béton.

On vérifie que  $HPEN > 0.0 \text{ E}+0$ .

GTT = GTT

Module de rigidité de la liaison.

On vérifie que  $G_{\text{beton}} \leq GTT \leq G_{\text{acier}}$ .

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  $1.E-4 < Gam2 < 1.E+0$ .

AD2 = ad2

Paramètre d'évolution de l'endommagement en région 2 (résistance maximale de la liaison et dégradation en frottement).

On vérifie que  $AD2 < 1.E-6$ .

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  $BD2 < 1.E-1$ .

VIFROT = vifrot

Paramètre matériau décrivant l'influence du frottement des fissures.

On vérifie que  $VIFROT < 0.0 E+0$ .

FA = alpha

Paramètre matériau lié à l'écroutissage cinématique par frottement des fissures.

On vérifie que  $FA < 0.0 E+0$ .

FC = c

Paramètre décrivant l'influence du confinement sur la résistance de la liaison.

On vérifie que  $FC < 0.0 E+0$ .

EPSTRO = EPSN

Seuil de déformation élastique sur la direction normale avant la rupture. On vérifie que  $1.E-4 < EPSN < 1.E+0$ .

ADN = adn

Paramètre de l'endommagement dans la direction normale par ouverture de la fissure.

On vérifie que  $ADN < 1.E-10$ .

BDN = bdn

Paramètre de puissance décrivant l'évolution de la variable d'endommagement dans la direction normale.

On vérifie que  $BDN < 1.E-1$ .

## 8 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),  $\alpha$   
le zircaloy peut comporter (au plus) trois phases métallurgiques différentes (phase froide 1 = phase  $\alpha$  pure, phase froide 2 = phase  $\alpha$  mélange et une phase chaude = phase  $\beta$ ).

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 COMP\_INCR.

### 8.1 Mot clé facteur META\_ACIER

Paramètres à renseigner pour la métallurgie de l'acier.

#### 8.1.1 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]
| )

```

#### 8.1.2 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  $\alpha$  de la loi de Koistinen-Marburger 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.

$$TAUX\_1 = t1$$

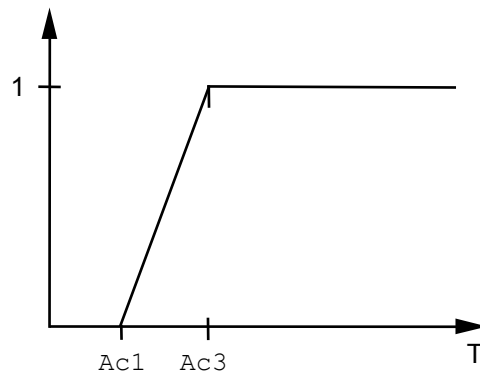
Valeur de la fonction "retard" (cf. [R4.04.01])  $\tau(T)$  intervenant dans le modèle de transformation austénitique à la température  $AC1$ .

$$TAUX\_3 = t3$$

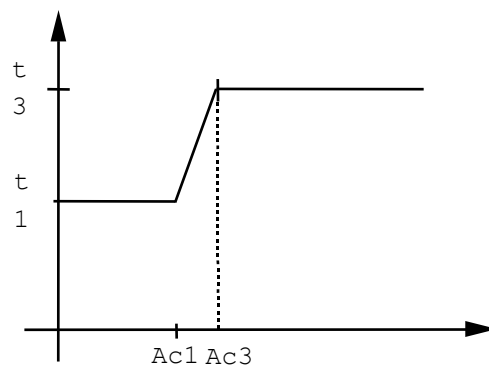
Valeur de la fonction "retard" (cf. [R4.04.01])  $\tau(T)$  intervenant dans le modèle de transformation austénitique à la température  $AC3$ .

L'évolution de la proportion d'austénite est alors définie par :  $\dot{Z} = \frac{Z - Z_{eq}(T)}{\tau(T)}$

avec:  $Z_{eq}(T)$



et  $\tau(T)$



## 8.1.3 Opérandes pour la taille de grains

Les quatre opérandes suivants entraînent le calcul de taille de grains s'ils sont renseignés.

LAMBDA0 = 10

Paramètre matériau intervenant dans le modèle d'évolution de taille de grain ci-dessous.

$$\frac{dD}{dt} = \frac{1}{\lambda} \left( \frac{1}{D} - \frac{1}{D_{\text{lim}}} \right) \text{ avec } \left\{ \begin{array}{l} \lambda = \lambda_0 \exp\left(\frac{Q_{\text{app}}}{RT}\right) \\ D_{\text{lim}} = D_{10} \exp\left(-\frac{W_{\text{app}}}{RT}\right) \end{array} \right.$$

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.

## 8.2 Mot clé facteur META\_ZIRC

Paramètres à renseigner pour la métallurgie du zircaloy (cf. [R4.04.04]).

### 8.2.1 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]
| )
```

### 8.2.2 Opérandes

TDEQ = teqd

Température de début de transformation  $\alpha \Leftrightarrow \beta$  à l'équilibre

$\alpha$  : phase à froid hexagonale compacte

$\beta$  : phase à chaud cubique centrée

N = n

Paramètre matériau relatif au modèle donnant la proportion de  $\beta$  en fonction de la température, à l'équilibre.

K = K

Paramètre matériau relatif au modèle donnant la proportion de  $\beta$  en fonction de la température, à l'équilibre.

T1C = t1c

Température de début de transformation  $\alpha$  en  $\beta$  au chauffage.

T1C = t1c

Paramètre matériau intervenant dans le calcul de la température de début de transformation  $\alpha$  en  $\beta$  au chauffage.

T2C = t2c

Paramètre matériau intervenant dans le calcul de la température de début de transformation  $\alpha$  en  $\beta$  au chauffage.

AC = Ac

Paramètre matériau intervenant dans le modèle d'évolution de  $\beta$  au chauffage.

M = m

Paramètre matériau intervenant dans le modèle d'évolution de  $\beta$  au chauffage.

T2R = t2r

Paramètre matériau intervenant dans le calcul de la température de début de transformation  $\beta$  en  $\alpha$  au refroidissement.

T2R = t2r

Paramètre matériau intervenant dans le calcul de la température de début de transformation  $\beta$  en  $\alpha$  au refroidissement.

AR = Ar

Paramètre matériau intervenant dans le modèle d'évolution de  $\beta$  au refroidissement.

BR = Br

Paramètre matériau intervenant dans le modèle d'évolution de  $\beta$  au refroidissement.

QSR\_K = qsr

Constante d'Arrhénius exprimé en degré Kelvin.

## 8.3 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  $i$

### 8.3.1 Syntaxe

```
| DURT_META = _F (
|   ♦ F1_DURT = HVf1, [R]
|   ♦ F2_DURT = HVf2, [R]
|   ♦ F3_DURT = HVf3, [R]
|   ♦ F4_DURT = HVf4, [R]
|   ♦ C_DURT  = HVa   [R]
| )
```

### 8.3.2 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 = Hv<sub>f</sub>4

Micro-dureté de la phase à froid F4 (martensite pour l'acier).

C\_DURT = HV<sub>f</sub>1

microdureté pour la phase à chaud (austénite pour l'acier).

## 8.4 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 soit constants par rapport à la température ELAS\_META, soit 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.

### 8.4.1 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',
    ♦ EPSF_EPSC_TREF=deltae, [R]
    ◇ TEMP_DEF_ALPHA=Tda, [R] (_FO)
    ◇ PRECISION = / eps, [R]
                    / 1., [DEFAULT]
    ◇ 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]
)
```

## 8.4.2 Opérandes

E = young

Module d'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 Tref (définie dans AFFE\_MATERIAU) et la phase métallurgique de référence, de sorte que la déformation thermique soit considérée nulle à Tref 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.

$$\sigma_y = (1 - f(z)) \sigma_y^\gamma + f(z) \sigma_y^\alpha$$

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.

$$\sigma_c = (1 - f(z)) \sigma_c^y + f(z) \sigma_c^x$$

## 8.5 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.

### 8.5.1 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**]
| )

```

### 8.5.2 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

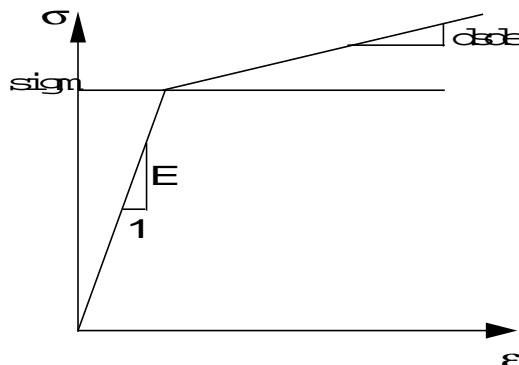
Pente de la courbe de traction pour la phase froide 3.

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 d'Young E est à préciser par les mots-clés META\_ELAS ou META\_ELAS\_FO.

## 8.6 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.

## 8.6.1 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**]  
)
```

### 8.6.1.1 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  $\sigma$  fonction de  $\varepsilon$  mais de la courbe  $R$  fonction de  $p$ . On passe de l'une à l'autre en effectuant les calculs suivants:  
 $R = \sigma - \text{limite d' élasticité}$ ,  $p = \varepsilon - (\sigma / E)$ .

## 8.7 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  $\eta$ , 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.

### 8.7.1 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**]
)
```

## 8.7.2 Opérandes F1\_ETA/F2\_ETA/F3\_ETA/F4\_ETA/C\_ETA

F1\_ETA = eta1

Paramètre  $\eta$  de la loi d'écoulement visco-plastique, pour la phase froide 1.

F2\_ETA = eta2

Paramètre  $\eta$  de la loi d'écoulement visco-plastique, pour la phase froide 2.

F3\_ETA = eta3

Paramètre  $\eta$  de la loi d'écoulement visco-plastique, pour la phase froide 3.

F4\_ETA = eta4

Paramètre  $\eta$  de la loi d'écoulement visco-plastique, pour la phase froide 4.

C\_ETA = etac

Paramètre  $\eta$  de la loi d'écoulement visco-plastique, pour la phase à chaud.

## 8.7.3 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.

## 8.7.4 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.

## 8.7.5 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.

## 8.8 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 :  $\Delta \varepsilon^{pt} = \frac{3}{2} \sigma \sum_{i=1}^{i=4} K_i F'_i(Z_i) \langle \Delta Z_i \rangle$

### 8.8.1 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**]
| )
```

### 8.8.2 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.

## 8.9 Mot clé facteur META\_RE

Définition des caractéristiques utilisées dans la modélisation du phénomène de restauration d'écroissage d'un matériau qui subit des changements de phases métallurgiques (voir [R4.04.02]).

### 8.9.1 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]
)
```

### 8.9.2 Opérandes

C\_F1\_THETA=Tgf, C\_F2\_THETA=Tgp, C\_F3\_THETA=Tgb,  
C\_F4\_THETA=Tgm

Constantes caractérisant le taux d'écroissage 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'écroissage.

F1\_C\_THETA=Tfg, F2\_C\_THETA=Tpg, F3\_C\_THETA=Tbg,  
F4\_C\_THETA=Tmg

Constantes caractérisant le taux d'écroissage 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'écroissage.

## 8.10 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 dans le repère cylindrique  $(r, \theta, z)$  :

Partition des déformations :  $\varepsilon = \varepsilon^e + \alpha \Delta T \text{Id} + \varepsilon^v$

Loi d'écoulement de la déformation visqueuse :  $\dot{\varepsilon}^v = \dot{\rho} \frac{M : \sigma}{\sigma_{eq}}$

Critère de Hill :  $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma : M : \sigma}$

Matrice de Hill  $M$  :

$$M_{(r,\theta,z)} = \begin{bmatrix} M_{rrrr} & M_{rr\theta\theta} & M_{rrzz} & 0 & 0 & 0 \\ M_{rr\theta\theta} & M_{\theta\theta\theta\theta} & M_{\theta\theta zz} & 0 & 0 & 0 \\ M_{rrzz} & M_{\theta\theta zz} & M_{zzzz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_{r\theta r\theta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{rzrz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{\theta z \theta z} \end{bmatrix}$$

$$\text{avec} \begin{cases} M_{rrrr} + M_{rr\theta\theta} + M_{rrzz} = 0 \\ M_{rr\theta\theta} + M_{\theta\theta\theta\theta} + M_{\theta\theta zz} = 0 \\ M_{rrzz} + M_{\theta\theta zz} + M_{zzzz} = 0 \end{cases}$$

Loi des mélanges sur la matrice  $M$  :

$$M = \begin{cases} M^c & \text{si } 0.00 \leq Z_f \leq 0.01 \\ M^2 = Z_f M^l + (1 - Z_f) M^c & \text{si } 0.01 \leq Z_f \leq 0.99 \\ M^l & \text{si } 0.99 \leq Z_f \leq 1.00 \end{cases}$$

$$Z_f = Z_1 + Z_2; \quad Z_c = Z_3 = 1 - Z_f$$

$$\text{Vitesse de déformation équivalente : } \dot{p} = \left( \frac{\sigma_{eq}}{a p^m} \right)^n e^{-Q/T}$$

$$\text{ou de manière équivalente : } \sigma_{eq} = \underbrace{a \left( e^{Q/T} \right)^{1/n} p^m \dot{p}^{1/n}}_{\text{contrainte visqueuse } \sigma_v} = \sigma_v$$

Loi des mélanges sur la contrainte visqueuse  $\sigma_v$  :

$$\sigma_{eq} = \sigma_v = \sum_{i=1}^3 f_i(Z_\alpha) \sigma_{vi} \quad \text{avec} \quad \sigma_{vi} = a_i \left( e^{Q_i/T} \right)^{1/n_i} p^{m_i} \dot{p}^{1/n_i}$$

**Remarque :**

dans le cas isotrope, on a

$$M_{rrrr} = M_{\theta\theta\theta\theta} = M_{zzzz} = 1$$

$$M_{r\theta r\theta} = M_{rzrz} = M_{\theta z \theta z} = 0.75$$

## 8.10.1 Syntaxe

```
| 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]
)

```

## 8.10.2 Opérandes

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

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\_Mxx\_xx', soit pour la phase chaude (3) 'C\_Mxx\_xx'.

### Remarque :

Les coefficients 'F1\_Q', 'F2\_Q' et 'C\_Q' sont en degré Kelvin.

## 9 Comportements THERMO-HYDRO-MECANIQUES et des sols

### 9.1 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_VAPE
<b>THM_INIT</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>
PRE1	O	O	O	O	O	O	O
PRE2		O			O	O	
PORO	O	O	O	O	O	O	O
TEMP	T	O	O	T	O	O	O
PRES_VAPE					O	O	O
<b>THM_DIFFU</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>
R_GAZ		O	O		O	O	O
RHO	O	O	O	O	O	O	O
BIOT_COEF	O	O	O	O	O	O	O
PESA_X	O	O	O	O	O	O	O
PESA_Y	O	O	O	O	O	O	O
PESA_Z	O	O	O	O	O	O	O
SATU_PRES				O		O	O
D_SATU_PRES				O		O	O
PERM_LIQU				O		O	O
D_PERM_LIQU_SATU				O		O	O
PERM_GAZ						O	O
D_PERM_SATU_GAZ						O	O
D_PERM_PRES_GAZ						O	O
VG_N / VG_PR / VG_SR							
VG_SMAX / VG_SATUR							
FICKV_T					O	O	
FICKV_PV							
FICKV_PG							
FICKV_S							
D_FV_T							
D_FV_PG							
FICKA_T						O	
FICKA_PA							
FICKA_PL							
FICKA_S							
D_FA_T							
CP	T	T	T	T	T	T	T
PERM_IN/PERM_END/ PERM_X	O	O	O	O	O	O	O
PERM_Y							
PERM_Z							
LAMB_T	T	T	T	T	T	T	T
LAMB_S							
LAMB_PHI							
LAMB_CT							
D_LB_T							
D_LB_S							
D_LB_PHI							
<b>THM_LIQU</b>	<b>O</b>	<b>O</b>		<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>
RHO	O	O		O	O	O	O
UN_SUR_K	O	O		O	O	O	O
VISC	O	O		O	O	O	O
D_VISC_TEMP	O	O		O	O	O	O
ALPHA	T	T		T	T	T	T
CP	T	T		T	T	T	T
<b>THM_GAZ</b>		<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	
MASS_MOL		O	O	O	O	O	
VISC		O	O	O	O	O	
D_VISC_TEMP		O	O	O	O	O	
CP		T	T	T	T	T	
<b>THM_VAPE_GAZ</b>					<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>
MASS_MOL					O	O	O
CP					O	O	O
VISC					O	O	O
D_VISC_TEMP					O	O	O
<b>THM_AIR DISS</b>						<b>O</b>	
CP						O	
COEF_HENRY						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_VAPE' ,
              / 'LIQU_VAPE' ,

```

## 9.2 Mot clé facteur THM\_INIT

Pour tous les comportements ThermoHydroMécaniques, il permet de décrire l'état initial de la structure (cf. [R7.01.11] et [R7.01.14]).

### 9.2.1 Syntaxe

```

| THM_INIT = _F (
    ◇ TEMP      = temp,          [R]
    ◆ PRE1      = pre1,          [R]
    ◇ PRE2      = pre2,          [R]
    ◆ PORO      = poro,          [R]
    ◇ PRES_VAPE = pvap,          [R]
    ◇ DEGR_SATU = ds,            [R]
    ◇ PRES_ATMO = patm           [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_GAZ_ATM	GAZ	LIQU_VAPE_GAZ	LIQU_GAZ	LIQU_AD_GAZ_VAPE
$PRE1$	$p_l$	$-p_l$	$p_g$	$p_c = p_g - p_l$	$p_c = p_g - p_l$	$p_c = p_g - p_l$
$PRE2$			$p_g$	$p_g$	$p_g$	$p_g$

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`.

L'utilisateur doit être très prudent dans la définition des valeurs de `THM_INIT` : en effet, la définition de plusieurs matériaux avec des valeurs différentes des quantités définies sous `THM_INIT` conduit à des valeurs initiales discontinues de la pression et de la température, ce qui n'est en fait pas compatible avec le traitement général qui est fait de ces quantités. Nous conseillons donc à l'utilisateur la démarche suivante :

- si au départ, on a un champ uniforme de pression ou de température, on le rentre directement par le mot clé `THM_INIT`,
- si on a un champ non uniforme, on entre par exemple une référence par le mot clé `THM_INIT` de la commande `DEFI_MATERIAU`, et les valeurs initiales par rapport à cette référence par le mot clé `ETAT_INIT` de la commande `STAT_NON_LINE`.

## 9.2.2 Opérande TEMP

Température de référence  $T^{ref}$ .

La valeur de la température de référence entrée derrière le mot clé `VALE_REF` de la commande `AFFE_VARC` est ignorée.

## 9.2.3 Opérande PRE1

Pour les comportements : `LIQU_SATU`, `ELAS_THM` et pression de liquide de référence.

Pour le comportement : `GAZ` pression de gaz de référence.

Pour le comportement : `LIQU_GAZ_ATM` pression de liquide de référence changée de signe.

Pour les comportements : `LIQU_VAPE_GAZ`, `LIQU_AD_GAZ_VAPE` et `LIQU_GAZ` pression capillaire de référence.

## 9.2.4 Opérande PRE2

Pour les comportements : `LIQU_VAPE_GAZ`, `LIQU_AD_GAZ_VAPE` et `LIQU_GAZ` et pression de gaz de référence.

## 9.2.5 Opérande PORO/PRES\_VAPE/DEGR\_SATU

`PORO` = poro  
Porosité initiale.

`PRES_VAPE` = pvap

Pour les comportements : `LIQU_VAPE_GAZ`, `LIQU_AD_GAZ_VAPE` et `LIQU_GAZ` et pression de vapeur initiale.

`DEGR_SATU` = ds

Pour tous les comportements non saturés : degré de saturation initial.

## 9.3 Mot clé facteur THM\_LIQU

Ce mot clé concerne tous les comportements THM faisant intervenir un liquide (cf. [R7.01.11]).

### 9.3.1 Syntaxe

```
| THM_LIQU= _F (
|   ◆ RHO           = rho,           [R]
|   ◆ UN_SUR_K      = usk,           [R]
|   ◇ ALPHA         = alp,           [R]
|   ◇ CP            = cp,            [R]
|   ◆ VISC           = vi,           [fonction **]
```

```
♦ D_VISC_TEMP = dvi, [fonction **]  
)
```

## 9.3.2 Opérande RHO

Masse volumique du liquide pour la pression définie sous le mot clé PRE1 du mot clé facteur THM\_INIT.

## 9.3.3 Opérande UN\_SUR\_K

Inverse de la compressibilité du liquide :  $K_l$ .

## 9.3.4 Opérande ALPHA

Coefficient de dilatation du liquide :  $\alpha_l$

Si  $p_l$  désigne la pression du liquide,  $\rho_l$  sa masse volumique et  $T$  la température, le

comportement du liquide est : 
$$\frac{d\rho_l}{\rho_l} = \frac{dp_l}{K_l} - 3\alpha_l dT$$

## 9.3.5 Opérande CP

Chaleur massique à pression constante du liquide.

## 9.3.6 Opérandes VISC/D\_VISC\_TEMP

VISC = vi

Viscosité du liquide. 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.

## 9.4 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.

### 9.4.1 Syntaxe

```
| THM_GAZ = _F (  
    ♦ MASS_MOL      = Mgs,      [R]  
    ♦ CP             = cp,       [R]  
    ♦ VISC           = vi,       [fonction **]  
    ♦ D_VISC_TEMP    = dvi,      [fonction **]  
)
```

### 9.4.2 Opérande MASS\_MOL

Masse molaire du gaz sec  $M_{gs}$ .

Si  $p_{gs}$  désigne la pression du gaz sec,  $\rho_{gs}$  sa masse volumique,  $R$  la constante des gaz

parfaits et  $T$  la température, le comportement du gaz sec est : 
$$\frac{p_{gs}}{\rho_{gs}} = \frac{RT}{M_{gs}}$$

### 9.4.3 Opérande CP

Chaleur massique à pression constante du gaz sec.

## 9.4.4 Opérateur VISC

Viscosité du gaz sec. Fonction de la température.

## 9.4.5 Opérateur 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.

## 9.5 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 (cf. [R7.01.11]). Les coefficients renseignés ici concernent la vapeur.

### 9.5.1 Syntaxe

```
| THM_VAPE_GAZ = _F (
    ◇ MASS_MOL      = m ,           [R]
    ◇ CP             = cp ,         [R]
    ◇ VISC           = vi ,         [fonction **]
    ◇ D_VISC_TEMP    = dvi ,        [fonction **]
)
```

### 9.5.2 Opérateur MASS\_MOL

MASS\_MOL = m

Masse molaire de la vapeur  $M_{vp}$ .

Si est  $M_{vp}$  désigne la pression du vapeur,  $\rho_{vp}$  sa masse volumique, la constante  $R$  des gaz

parfaits et  $T$  la température, le comportement de la vapeur est :  $\frac{p_{vp}}{\rho_{vp}} = \frac{RT}{M_{vp}}$ .

### 9.5.3 Opérateur CP

CP = cp

Chaleur massique à pression constante du vapeur.

### 9.5.4 Opérateur VISC

VISC = v

Viscosité de la vapeur. Fonction de la température.

### 9.5.5 Opérateur 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.

## 9.6 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.

### 9.6.1 Syntaxe

```
| THM_AD_GAZ_VAPE = _F (
    ♦ CP = cp, [R]
    ♦ COEF_HENRY = h, [fonction **]
)
```

### 9.6.2 Opérande CP

CP = cp

Chaleur massique à pression constante de l'air dissous.

### 9.6.3 Opérande COEF\_HENRY

COEF\_HENRY = h

Constante de Henry  $K_H$ , permettant de relier la concentration molaire d'air dissous  $C_{ad}^{ol}$  (moles/m<sup>3</sup>) à la pression d'air sec :

$$C_{ad}^{ol} = \frac{p_{as}}{K_H}$$

## 9.7 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.

### 9.7.1 Syntaxe

```
| THM_DIFFU = _F (
    ♦ R_GAZ = rgaz, [R]
    ♦ RHO = rho, [R]
    ♦ CP = cp, [R]
    ♦ BIOT_COEF = bio, [R]
    ♦ PESA_X = px, [R]
    ♦ PESA_Y = py, [R]
    ♦ PESA_Z = pz, [R]
    ♦ PERM_IN = perm, [fonction]
    ♦ PERMIN_X = ox, [fonction]
    ♦ PERMIN_Y = ox, [fonction]
    ♦ PERMIN_Z = ox, [fonction]
    ♦ SATU_PRES = sp, [fonction]
    ♦ D_SATU_PRES = dsp, [fonction]
    ♦ PERM_LIQU = perm1, [fonction]
    ♦ D_PERM_LIQU_SATU = dperm, [fonction]
    ♦ PERM_GAZ = permg, [fonction]
    ♦ D_PERM_SATU_GAZ = dspg, [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, [DEFAULT]
```

```

◇ FICKV_PG      = /fvpg,      [fonction]
                  /1,          [DEFAULT]
◇ FICKV_S       = /fvs,        [fonction]
                  /1,          [DEFAULT]
◇ D_FV_T        = /dfvt,      [fonction]
                  /0,          [DEFAULT]
◇ D_FV_PG       = /dfvpg,     [fonction]
                  /0,          [DEFAULT]
◇ FICKA_T       = fat,         [fonction]
◇ FICKA_PA      = /fapv,      [fonction]
                  /1,          [DEFAULT]
◇ FICKA_PL      = /fapg,      [fonction]
                  /1,          [DEFAULT]
◇ FICKA_S       = /fas,        [fonction]
                  /1,          [DEFAULT]
◇ D_FA_T       = /dfat,      [fonction]
                  /0,          [DEFAULT]
◇ LAMB_T        = /lambt,     [fonction]
                  /0,          [DEFAULT]
◇ LAMB_S       = /lambs,     [fonction]
                  /1,          [DEFAULT]
◇ LAMB_PHI     = /lambp,     [fonction]
                  /1,          [DEFAULT]
◇ LAMB_CT      = /lambct,    [fonction]
                  /0,          [DEFAULT]
◇ D_LB_S       = /dlambs,    [fonction]
                  /0,          [DEFAULT]
◇ D_LB_T       = /dlambt,    [fonction]
                  /0,          [DEFAULT]
◇ D_LB_PHI     = /dlambp,    [fonction]
                  /0,          [DEFAULT]
◇ SIGMA_T      = st,         [fonction]
◇ D_SIGMA_T    = dst,        [fonction]
◇ PERM_G_INTR  = pgi,        [fonction]
◇ CHAL_VAPO    = cv,         [fonction **]
◇ EMMAG        = em,         [R]
◇ PERM_END     = perment     [fonction]
)

```

## 9.7.2 Opérandes R\_GAZ/RHO/CP/BIOT\_COEF

R\_GAZ = rgaz

Constante des gaz parfaits.

RHO = rho

Pour les comportements hydrauliques masse volumique homogénéisée.

CP = cp

Pour les comportements thermiques chaleur massique à contrainte constante du solide seul.

BIOT\_COEF = bio

Coefficient de Biot.

## 9.7.3 Opérandes SATU\_PRES/D\_SATU\_PRES

Pour les comportements de matériaux non saturés (LIQU\_VAPE\_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.

## 9.7.4 Opérandes PESA\_X/PESA\_Y/PESA\_Z

PESA\_X = px, PESA\_Y = py, PESA\_Z = pz,



Pesanteur selon x, y ou z, utilisé uniquement si la modélisation choisie dans AFPE\_MODELE inclut 1 ou 2 variable de pression.

## 9.7.5 Opérande PERM\_IN

Perméabilité intrinsèque : fonction de la porosité(dans le cas isotrope).

La perméabilité au sens classique  $K$ , dont la dimension est celle d'une vitesse se calcule de la façon suivante :

$$K = \frac{K_{int} K_{rel}}{\mu} \rho_l g \text{ où } K_{int} \text{ est la perméabilité intrinsèque, } K_{rel} \text{ la perméabilité relative, } \mu \text{ la}$$

viscosité,  $\rho_l$  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.

## 9.7.6 Opérandes PERMIN\_X/PERMIN\_Y/PERMIN\_Z

Dans le cas orthotrope, composante en x,y et z du tenseur de perméabilité intrinsèque. Dans ce cas, PERMIN\_Y et PERMIN\_Z sont obligatoires.

## 9.7.7 Opérandes PERM\_LIQU/D\_PERM\_LIQU\_SATU

Perméabilité et dérivée de la perméabilité relative au liquide : fonction de la saturation.

## 9.7.8 Opérandes PERM\_GAZ/D\_PERM\_SATU\_GAZ

Perméabilité et dérivée de la perméabilité relative au gaz : fonction de la saturation et de la pression de gaz.

## 9.7.9 Opérandes VG\_N/VG\_PR/VG\_SR

Pour les comportements de matériaux non saturés (LIQU\_VAPE\_GAZ, LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE, LIQU\_GAZ, LIQU\_GAZ\_ATM) et dans le cas où la loi hydraulique est HYDR\_VGM (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.

## 9.7.10 Opérandes VG\_SMAX/VG\_SATUR

Pour les comportements de matériaux non saturés (LIQU\_VAPE\_GAZ, LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE, LIQU\_GAZ, LIQU\_GAZ\_ATM) et dans le cas où la loi hydraulique est HYDR\_VGM (voir doc. 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 doc. 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 doc. R7.01.11).

## 9.7.11 Opérandes D\_PERM\_PRES\_GAZ

Dérivée de la perméabilité au gaz par rapport à la pression de gaz : fonction de la saturation et de la pression de gaz.

## 9.7.12 Opérandes 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\_PV. Dans le cas de LIQU\_VAPE\_GAZ et LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE, seul FICKV\_T est obligatoire.

## 9.7.13 Opérandes 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.

## 9.7.14 Opérandes 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.

## 9.7.15 Opérande D\_FA\_T

Pour le comportement LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE, dérivée du coefficient FICKA\_T par rapport à la température.

## 9.7.16 Opérandes LAMB\_T/LAMB\_S/LAMB\_PHI/LAMB\_CT

LAMB\_T = lambt

Pour le comportement THER\_POLY partie multiplicative de la conductivité thermique du mélange dépendant de la température (cf. [R7.01.11]).

Pour le comportement THER\_HOMO conductivité thermique du mélange. Cet opérande est obligatoire dans le cas thermique.

LAMB\_S = lambs, LAMB\_PHI = lambp

Pour le comportement THER\_POLY partie multiplicative (égale à 1 par défaut) de la conductivité thermique du mélange dépendant respectivement de la saturation, de la porosité.

LAMB\_CT = lambct

Pour le comportement THER\_POLY partie de la conductivité thermique du mélange constante et additive (cf. [R7.01.11]). Cette constante est égale à zéro par défaut.

## 9.7.17 Opérandes D\_LB\_T/D\_LB\_S/D\_LB\_PHI

D\_LB\_T = dlambt

Pour le comportement THER\_POLY dérivée de la partie de la conductivité thermique du mélange dépendant de la température par rapport à la température.

Pour le comportement THER\_HOMO dérivée de la conductivité thermique du mélange par rapport à la température.

D\_LB\_S = dlambs, D\_LB\_PHI = dlambp

Pour le comportement THER\_POLY dérivée de la partie de la conductivité thermique du mélange dépendant respectivement de la saturation, de la porosité.

## 9.7.18 Opérande EMMAG

Coefficient d'emménagement. Ce coefficient n'est pris en compte que dans les cas des modélisation avec mécanique.

## 9.7.19 Opérande PERM\_END

Perméabilité fonction de l'endommagement, utilisé par les comportements mécaniques avec endommagement.

## 9.8 Mot clé CAM\_CLAY

Le modèle de Cam-Clay est un modèle élasto-plastique 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.

### 9.8.1 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]
)
```

### 9.8.2 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).

### 9.8.3 Opérande M

Pente de la droite d'état critique.

### 9.8.4 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.

### 9.8.5 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 ( $kcam > 0.$ ).

### 9.8.6 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 ( $ptrac < 0.$ ).

## 9.9 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.

## 9.9.1 Syntaxe

```

| 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	$Q_{init}$	$R_{init}$	$n$	$K^p$	$\gamma$	$\beta$	$R_c$	$A$
Mot clé	Q_INIT	R_INIT	N_CJS	KP	PCO	BETA_CJS	RC	A_CJS
					= pcoGAMMA_CJS			
CJS1	F				O	O		
CJS2	F	F	O	O	O	O	O	O
CJS3	F		O	O	O	O	O	

Symbol e	$b$	$R_m$	$\mu$	$p_{co}$	$c$	$P_a$
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  $G_o$ .

## 9.9.2 Opérandes `BETA_CJS/RM`

Pour niveaux CJS1, CJS2 CJS3.

`BETA_CJS` = `beta`

Paramètre  $\beta$ . Contrôle la variation de volume plastique dans le mécanisme déviatoire.

`RM` = `rm`

Valeur maximale d'ouverture du domaine de réversibilité déviatoire.

## 9.9.3 Opérandes `N_CJS/KP/RC`

Pour niveaux CJS2 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  $R$  :

$$\dot{e}_v^{dp} = -\beta \left( \frac{s_{II}}{s_{II}^c} - I \right) \frac{|s_{ij} \dot{e}_{ij}^{dp}|}{s_{II}} \quad s_{II}^c = -\frac{R_c I_1}{h(\theta_s)}$$

## 9.9.4 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`.

## 9.9.5 Opérandes `B_CJS/C_CJS/PCO/MU_CJS`

Pour niveaux CJS3.

`B_CJS` = `b`

Contrôle l'écrouissage cinématique du mécanisme déviatoire :

$$\dot{X}_{ij} = -\frac{I}{b} \dot{\lambda}^d \left[ dev \left( \frac{\partial f^d}{\partial X_{ij}} \right) - I_1 f X_{ij} \right] \left( \frac{I_1}{3P_a} \right)^{-1.5}$$

C\_CJS = c

Contrôle l'évolution de la pression critique :  $p_c = p_{co} \exp(-c \varepsilon_v)$  .

PCO = pco

Pression critique initiale :  $p_c = p_{co} \exp(-c \varepsilon_v)$  .

MU\_CJS = mu

Contrôle la valeur de rupture de la variable R :  $R_r = R_c + m \ln\left(\frac{3p_c}{I_1}\right)$

## 9.9.6 Opérands GAMMA\_CJS/PA/Q\_INIT

Pour niveaux CJS1 CJS2 CJS3.

GAMMA\_CJS = g

Contrôle la forme du critère :  $h(\theta_s) = \left(1 + \gamma \cos(3\theta_s)\right)^{1/6} = \left(1 + \gamma \sqrt{54} \frac{\det(\underline{s})}{s_{II}^3}\right)^{1/6}$

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 :

$$Q_{init} = -3c \cotan(\varphi)$$

## 9.10 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 dilataance 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.

### 9.10.1 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_pl,  [R]
    ♦ PA        = pa         [R]
)
```

## 9.10.2 Opérandes GAMMA\_ULT/GAMMA\_E

GAMMA\_ULT = gamma\_ult

Paramètre  $\gamma_{ult}$  : Déformation déviatoire plastique correspondant au palier.

GAMMA\_E = gamma\_e

Paramètre  $\gamma_e$  : Déformation déviatoire plastique correspondant à la disparition complète de la cohésion.

## 9.10.3 Opérande M\_ULT/M\_E/A\_E/M\_PIC

M\_ULT = m\_ult

Paramètre  $m_{ult}$  : Valeur de  $m$  du critère ultime atteinte  $\gamma_{ult}$ .

M\_E = m\_e

Paramètre  $m_e$  : Valeur de  $m$  du critère intermédiaire atteinte en  $\gamma_e$ .

A\_E = a\_e

Paramètre  $a_e$  : Valeur de  $a$  du critère intermédiaire atteinte en  $\gamma_e$ .

M\_PIC = m\_pic

Paramètre  $m_{pic}$  : Valeur de  $m$  du critère de pic atteinte au pic de contrainte.

## 9.10.4 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  $\eta$  : Exposant régulant l'écrouissage.

SIGMA\_C = sigma\_c

Paramètre  $s_c$  : Résistance en compression simple.

## 9.10.5 Opérandes GAMMA/KSI

GAMMA = gamma, KSI = ksi

Paramètres  $\gamma$  et  $\xi$  : Paramètres réglant la dilatace.

Une condition à respecter est que le rapport  $\gamma/\xi$  reste inférieur à 1. Dans le cas des roches dures très résistantes, soumises à des contraintes de confinement relativement faibles, la variation de la dilatace  $\sin \psi$  (en fonction de l'état des contraintes - voir [R7.01.15]) peut tendre vers  $\gamma/\xi$ , ce qui justifie cette condition.

## 9.10.6 Opérande GAMMA\_CJS

Paramètre  $\gamma_{cjs}$  : paramètre de forme de la surface de charge dans le plan déviatoire.

## 9.10.7 Opérande SIGMA\_P1

Paramètre  $\sigma_{pl}$  : intersection du critère intermédiaire et du critère de pic.

## 9.10.8 Opérande PA

Pression atmosphérique. Doit être donnée positive.

**Remarque :**

Les paramètres  $M_E$ ,  $A_E$ ,  $A_{PIC}$ ,  $SIGMA_{P1}$ ,  $SIGMA_C$  et  $M_{PIC}$  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.

## 9.11 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.

## 9.11.1 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 = mvmax, [R]
    ♦ XIV_MAX = xivmax, [R]
    ♦ A = A, [R]
    ♦ N = n, [R]
    ♦ SIGMA_P1 = sp1, [R]
    ♦ SIGMA_P2 = sp2, [R]
    ♦ MU0_V = mu0v, [R]
    ♦ XI0_V = xi0v, [R]
    ♦ MU1 = mul, [R]
    ♦ XI1 = xil, [R]
)
```

## 9.11.2 Opérandes PA/ NELAS/SIGMA\_C/H0\_EXT

PA = pa S\_0 = s0

Paramètre  $P_a$  : pression atmosphérique.

NELAS = nelas

Paramètre  $n_{elas}$  : exposant de la loi de variation des modules élastiques K et G.

SIGMA\_C = sigc

Paramètre  $\sigma_c$  : résistance en compression simple (l'unité d'une contrainte)..

H0\_EXT = h0

Paramètre  $H_{0ext}$  : paramètre pilotant la résistance à la traction



## 9.11.3 Opérande GAMMA\_CJS/X\_AMS/ETA/A\_0/A\_E/A\_PIC

GAMMA\_CJS = gcjs

Paramètre  $\gamma_{cjs}$  : paramètre de forme du critère dans le plan déviatoire (entre 0 et 1).

XAMS = xams

Paramètre  $x_{ams}$  : paramètre non nul intervenant dans les lois d'écrouissage pré pic.

## 9.11.4 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.

## 9.11.5 Opérandes 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.

## 9.11.6 Opérandes XI\_E/XI\_PIC/MV\_MAX/XIV\_MAX

XI\_E = xie

Paramètre  $\xi_e$  : niveau d'écrouissage sur le seuil intermédiaire.

XI\_PIC = xip

Paramètre  $\xi_{pic}$  : 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  $\xi_{v-max}$  : niveau d'écrouissage pour atteindre le seuil viscoplastique maximal.

## 9.11.7 Opérandes 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.

## 9.11.8 Opérande SIGMA\_P1

SIGMA\_P1 = sp1

Paramètre  $\sigma_{PI}$  : correspond à l'abscisse du point d'intersection de la limite de clivage et du seuil de pic.

## 9.11.9 Opérands MU0\_V et XI0\_V

MU0\_V = mu0v, XI0\_V = xi0v

Paramètres  $\mu_{0v}$  et  $\xi_{0v}$  : paramètres réglant la dilatace des mécanismes pré pic et viscoplastiques

Les conditions à respecter sur ces paramètres sont :

$$\mu_{0v} < \xi_{0v} \quad \text{ou} \quad \begin{cases} \mu_{0v} > \xi_{0v} \\ \frac{s_0^{a_{pic}}}{s_0^{a_0}} \leq \frac{1 + \mu_{0v}}{\mu_{0v} - \xi_{0v}} \quad \text{avec} \quad s^{pic} = 1 \end{cases}$$

## 9.11.10 Opérands MU1 et XI1

MU1 = mu1, XI1 = xi1

Paramètres  $\mu_I$  et  $\xi_I$  : paramètres réglant la dilatace des mécanismes post pic. Une condition à respecter est que le rapport  $\mu_I/\xi_I$  reste inférieur ou égal à 1.

## 9.12 Mot clé facteur DRUCK\_PRAGER

La loi de DRUCKER\_PRAGER [R7.01.16] est un modèle de comportement pour la mécanique des sols, elle est définie par la relation :

$$\sigma_{eq} + \alpha I_I - R(p) \leq 0$$

où

$\sigma_{eq}$  est une fonction du déviateur des contraintes effectives  $\sigma'$ ,

$I_I = Tr(\sigma')$  est la trace des contraintes effectives,

$\alpha$  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 :

$$\begin{aligned} 0 < p < p_{ult} & \quad R(p) = hp + \sigma_y \\ p \geq p_{ult} & \quad R(p) = h p_{ult} + \sigma_y \end{aligned}$$

Dans le cas parabolique,  $R(p) = \sigma_y f(p)$  où la fonction  $f(p)$  est donnée par :

$$\begin{aligned} 0 < p < p_{ult} & \quad f(p) = \left( 1 - \left( 1 - \sqrt{\frac{\sigma_{yult}}{\sigma_y}} \right) \frac{p}{p_{ult}} \right)^2 \\ p \geq p_{ult} & \quad f(p) = \frac{\sigma_{yult}}{\sigma_y} \end{aligned}$$

## 9.12.1 Syntaxe

```
|   DRUCKER_PRAGER   = _F (
                                ♦ ECROUISSAGE   =/'LINEAIRE' ,
                                                /'PARABOLIQUE' ,   [TXM]
                                ♦ ALPHA           = alpha ,           [R]
                                ♦ P_ULTM          = p_ult ,           [R]
                                ♦ SY              = sy ,             [R]
                                ◇ H               = h ,               [R]
                                ◇ SY_ULTM         = sy_ult ,          [R]
                                ◇ DILAT           = ang ,            [R]
                                )
```

## 9.12.2 Opérande ECROUISSAGE

ECROUISSAGE =/'LINEAIRE' ,/'PARABOLIQUE'  
Permet de définir le type d'érouissage souhaité.

## 9.12.3 Opérande ALPHA

ALPHA = alpha

Désigne le coefficient de dépendance en pression. On rappelle que l'opérande ALPHA est relié à l'angle de frottement  $\varphi$  par la relation :  $\alpha = \frac{2 \sin(\varphi)}{3 - \sin(\varphi)}$ .

## 9.12.4 Opérande P\_ULTM

P\_ULTM = p\_ult

Désigne la déformation plastique cumulée ultime.

## 9.12.5 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  $\varphi$  de la façon suivante :  $SY = \frac{6C \cos(\varphi)}{3 - \sin(\varphi)}$ .

## 9.12.6 Opérande H

H = h

Désigne le module d'érouissage,  $h < 0$  si la loi est adoucissante. Cette opérande est obligatoire pour un érouissage de type linéaire (opérande ECROUISSAGE = 'LINEAIRE').

## 9.12.7 Opérande SY\_ULTM

SY\_ULTM = sy\_ult Désigne la contrainte ultime. Cette opérande est obligatoire pour un érouissage de type parabolique (opérande ECROUISSAGE = 'PARABOLIQUE').

## 9.12.8 Opérande DILAT

DILAT = ang

Désigne l'angle de dilatace (par défaut égal à zéro).

## 9.13 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.

## 9.13.1 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]  
    ♦ LAMBDA_S    = Lambdas,    [R]  
    ♦ ALPHAB      = alphab      [R]  
)
```

## 9.13.2 Opérands 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.

## 9.13.3 Opérands PRES\_CRIT et PA

PRES\_CRIT = pc, PA = pa  
Pression critique égale à la moitié de la pression de consolidation et pression atmosphérique.

## 9.13.4 Opérands 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).

## 9.13.5 Opérands PC0\_INIT/KAPAS/LAMBDA\_S/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.  
LAMBDA\_S = 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 [R7.01.17].

Terme correctif facultatif et adimensionnel permettant de mieux prendre en compte des résultats expérimentaux. Par défaut, il est calculé par le *Code\_Aster* en fonction de la pente de la droite d'état critique, du coefficient de gonflement et du coefficient de compressibilité.

## 9.14 Mot clé facteur HUJEUX

Loi de comportement élasto-plastique en mécanique des sols (géomatériaux 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.

### 9.14.1 Syntaxe

```
| 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 [DEFAULT]
)
```

### 9.14.2 Opérandes 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.

### 9.14.3 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).

## 9.14.4 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.

## 9.14.5 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.

## 9.14.6 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.

## 9.14.7 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.

## 9.15 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.

### 9.15.1 Syntaxe

```
| 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]
)
```

## 9.15.2 Opérandes 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.

## 9.15.3 Opérandes S\_END/S\_RUP/M\_END/M\_RUP

S\_END = send

Valeur du produit  $S \cdot \text{SIGMA}_c^{**2}$  atteinte à l'initiation d'endommagement.

S\_RUP = srup

Valeur du produit  $S \cdot \text{SIGMA}_c^{**2}$  atteinte en GAMMA\_RUP.

M\_END = mend

Valeur du produit  $M \cdot \text{SIGMA}_c$  atteinte à l'initiation d'endommagement.

M\_RUP = mrup

Valeur du produit  $M \cdot \text{SIGMA}_c$  atteinte en GAMMA\_RUP.

## 9.15.4 Opérande BETA/ALPHAHB

BETA = beta

Paramètre caractérisant le comportement post-rupture du matériau.

ALPHAHB = alphahb

Paramètre caractérisant le comportement post-rupture du matériau.

## 9.15.5 Opérande 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).

## 9.16 Mot clé facteur ELAS\_GONF

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 ELAS\_GONF 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 d'incompressibilité du matériau

$b$  est le coefficient de Biot

$A$  est un paramètre homogène à une pression

$\beta_m$  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 : 
$$\frac{P_{gf}(s_0)}{A} = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\beta_m}} \operatorname{Erf}\left(\frac{s_0}{A}\sqrt{\beta_m}\right) + \frac{I}{2\beta_m} \left(1 - e^{-\beta_m\left(\frac{s_0}{A}\right)^2}\right)$$

On doit avoir  $P_{gf} = P_{gf}^\infty$ . On sait que  $\operatorname{Erf}(\infty) = 1$  et donc : 
$$\frac{P_{gf}(s_0)}{A} = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\beta_m}} + \frac{I}{2\beta_m}$$

Dans Aster, la loi est programmée de manière incrémentale sous la forme :

$$\Delta \tilde{\sigma} = K_0 \Delta \varepsilon_v + b \Delta PG$$

en introduisant la fonction pression de gonflement en saturé et non saturé :

$$PG(Pc) = \begin{cases} A \left( \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\beta_m}} \right) \operatorname{Erf}\left(\frac{s_0}{A}\sqrt{\beta_m}\right) + \frac{I}{2\beta_m} \left(1 - e^{-\beta_m\left(\frac{s_0}{A}\right)^2}\right) & \text{si } S < I \\ Pc & \text{si } S = I \end{cases}$$

## 9.16.1 Syntaxe

```
| ELAS_GONF = _F (
    ♦ BETAM    = betam,                [R]
    ♦ PREF     = pref                  [R]
),
```

## 9.16.2 Opérande BETAM

Paramètre matériau sans dimension correspondant au  $\beta_m$  de la loi ci-dessus. L'identification se fait en recherchant la pression de gonflement.

## 9.16.3 Opérande PREF

Paramètre homogène à une pression correspondant au  $A$  de la loi ci-dessus.



## 10 Comportements spécifiques aux éléments 1D

### 10.1 Mots clés facteur VMIS\_POUTRE, VMIS\_POUTRE\_FO

Paramètres définissant le critère de plasticité global intervenant dans le comportement élastoplastique des éléments de poutre (Modélisations POU\_D\_E, POU\_D\_T, POU\_D\_TG). (Voir [R5.03.30]).

Le critère de plasticité est défini par :

$$G(T, q^p, p) = F(T, q^p) - R(p) \leq 0$$

avec

$$F(T, q^p) = N_p \sqrt{\frac{N^2}{N_p^2} + A_y(c_y^p) \cdot M_y^2 + A_z(c_z^p) \cdot M_z^2 + \frac{M_x^2}{M_{px}^2}}$$

$R(p)$  peut être calculée à partir de ECRO\_FLEJOU ou ECRO\_LINE.

En ce qui concerne la flexion, les fonctions  $A_y(c_y^p)$  et  $A_z(c_z^p)$  permettent le passage progressif du moment de début de plastification de la section (en général,  $M_{ey} = \frac{I_y \sigma_y}{z_{max}}$  et  $M_{ez} = \frac{I_z \sigma_y}{y_{max}}$ ) au moment limite  $M_{py} = \lambda M_{ey}$  ( $M_{pz} = \lambda M_{ez}$ ). Ces moments sont à introduire directement par l'utilisateur, ils ne sont pas calculés par le code en fonction de la limite d'élasticité  $\sigma_y$  et de la géométrie de la section. La valeur de  $\lambda$  dépend de la forme de la section : les valeurs classiques sont :

- 1.5 pour une section rectangulaire
- $\frac{4}{p}$  pour une section circulaire creuse
- $\frac{16}{3p}$  pour une section circulaire pleine.

Les fonctions  $A_y(c_y^p)$  et  $A_z(c_z^p)$  sont définies par les moments caractéristiques précédents, et les paramètres numériques  $\alpha_y, \beta_y, \alpha_z, \beta_z$  :

$$\begin{cases} A_y(X_y^p) = \frac{\left(X_y^p\right)^{\alpha_y} + \frac{\beta_y}{M_{py}^2}}{\left(X_y^p\right)^{\alpha_y} + \beta_y} \\ A_z(X_z^p) = \dots \end{cases}$$

L'effort normal limite est caractérisé par  $N_p = S \sigma_y$ . Le moment de torsion limite est  $M_{px} = C \sigma_y$ .

## 10.1.1 Syntaxe

```
| / VMIS_POUTRE
/ VMIS_POUTRE_FO = _F (
    ♦ NP = Np, [R] ou [fonction**]
    ♦ MEY = Mey, [R] ou [fonction**]
    ♦ MPY = Mpy, [R] ou [fonction**]
    ♦ CAY = ay, [R] ou [fonction**]
    ♦ CBY = by, [R] ou [fonction**]
    ♦ MEZ = Mez, [R] ou [fonction**]
    ♦ MPZ = Mpz, [R] ou [fonction**]
    ♦ CAZ = az, [R] ou [fonction**]
    ♦ CBZ = bz, [R] ou [fonction**]
    ♦ MPX = Mpx 2 [R] ou [fonction**]
)
```

## 10.2 Mot clé facteur ECRO\_FLEJOU

Définition de la courbe d'écrouissage  $R(p)$  :

$$R(p) = S \sigma_L = S \left( \sigma_y + \frac{H_p \cdot p}{\left( 1 + \left( \frac{p}{e_u} \right)^\alpha \right)^{\frac{1}{\alpha}}} \right)$$

avec  $H = \frac{E \cdot E_p}{E - E_p}$   
soit  $E_p = \frac{E \cdot H}{E + H}$   
il faut donc respecter  $E_p < E$

$$e_u = \frac{\sigma_u - \sigma_y}{E_p}$$

Cette courbe a l'avantage de présenter une asymptote horizontale égale à  $\sigma_u$  (cf. [R5.03.30]).

### 10.2.1 Syntaxe

```
/ ECRO_FLEJOU = _F (
    ♦ EP = ep, [R]
    ♦ SY = sy, [R]
    ♦ SU = su, [R]
    ♦ PUISS = alpha [R]
)
```

## 10.3 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 d'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.

$\sigma_{YT}$	Effort limite en traction. En valeur absolue.
$\sigma_{YC}$	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 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\varepsilon}^p = \dot{\varepsilon} - \overbrace{E^{-1} \sigma}^{\dot{\varepsilon}^{th}} \\ \dot{\varepsilon}^p = \dot{\varepsilon}_C^p + \dot{\varepsilon}_T^p \\ \dot{\varepsilon}_C^p = \dot{p}_C \frac{\sigma}{|\sigma|} \\ \sigma - R_T(p_T) \leq 0 \\ -\sigma - R_C(p_C) \leq 0 \end{array} \right. \quad \text{avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} \dot{p}_C = 0 \text{ si } -\sigma - R_C(p_C) < 0 \\ \dot{p}_C \geq 0 \text{ si } -\sigma = R_C(p_C) \\ \dot{p}_T = 0 \text{ si } \sigma - R_T(p_T) < 0 \\ \dot{p}_T \geq 0 \text{ si } \sigma = R_T(p_T) \end{array} \right.$$

où :

$\dot{\varepsilon}_C^p$  : vitesse de déformation plastique en compressions,

$\dot{\varepsilon}_T^p$  : vitesse de déformation plastique en traction.

$\varepsilon_{th}$  : déformation d'origine thermique :  $\varepsilon_{th} = \alpha(T - T_{ref})$  .  $\alpha$  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.

## 10.3.1 Syntaxe

```
| ECRO_ASYM_LINE = _F (
    ♦ DT_SIGM_EPSI = RT, [R]
    ♦ SY_T = sigmayT, [R]
    ♦ DC_SIGM_EPSI = RC, [R]
    ♦ SY_C = sigma yC [R]
)
```

## 11 Comportements particuliers

### 11.1 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 uniaxiale de la loi de grandissement est :

$$\varepsilon_g(t) = (aT + b) \cdot \left( \int_0^t \Phi d\tau \right)^S$$

où  $F$  est le flux neutronique et  $\int_0^t \Phi d\tau$  la fluence.  $T$  est en °C.

Dans le cas où l'on adopte une modélisation 1D (le comportement est alors appliqué à un élément de poutre dans la direction axiale, cf. [R5.03.09]), cette forme uniaxiale est utilisée telle quelle.

En revanche, pour les modélisations 2D et 3D, la loi de grandissement s'écrit (cf. [R5.03.08]) :

$$\varepsilon_g(t) = (aT + b) \cdot \left( \int_0^t \Phi d\tau \right)^S \varepsilon_g^0$$
$$\text{avec : } \varepsilon_g^0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}_{R_i}$$

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  $R_i$  (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 grandissements sont fournis derrière les mots clés GRAN\_A, GRAN\_B et GRAN\_S. 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 :

$$\dot{p} = \left[ \frac{\sigma_{eq}}{p^{1/m}} \right]^n \left( \frac{1}{K} \frac{\Phi}{\Phi_0} + L \right)^\beta e^{\frac{-Q}{R(T+T_0)}} \quad (T_0 = 273,15^\circ)$$

où  $F$  est le flux neutronique calculé à partir de la fluence (voir [R5.03.08] ou [R5.03.09] selon la modélisation).  $T$  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, uniquement pour les modélisations 2D et 3D, 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.

## 11.1.1 Syntaxe

```
| LEMAITRE_IRRA = _F (
    ♦ N = n, [R]
    ♦ UN_SUR_K = 1/K, [R]
    ◇ UN_SUR_M = / 1/m, [R]
    / 0.0, [DEFAULT]
    ◇ QSR_K = / Q/R, [R]
    / 0.0, [DEFAULT]
    ◇ BETA = / beta, [R]
    / 0.0, [DEFAULT]
    ◇ PHI_ZERO = / phi0, [R]
    / 1.10E+20, [DEFAULT]
    ◇ L = / L, [R]
    / 0.0, [DEFAULT]
    ◇ GRAN_A = / a, [R]
    / 0., [DEFAULT]
    ◇ GRAN_B = / b, [R]
    / 0.0, [DEFAULT]
    ◇ GRAN_S = / s, [R]
    / 0. [DEFAULT]
)
```

## 11.2 Mot clé facteur LMARC\_IRRA

Modèle élasto-viscoplastique développé au LMA-RC pour décrire le comportement viscoplastique orthotrope des tubes de gaines du crayon combustible [R5.03.10], complété par les paramètres de grandissement fournis derrière les mots clés GRAN\_A, GRAN\_B et GRAN\_S.

Brièvement, les relations de comportement sont :

$$\left\{ \begin{aligned} f &= |\tilde{\sigma} - X| - R_0 = \sqrt{\frac{3}{2}} (\tilde{\sigma} - X)^t M (\tilde{\sigma} - X) \\ \dot{\varepsilon}^{vp} &= \dot{\nu} \frac{\partial f}{\partial \sigma} = \frac{3}{2} \dot{\nu} \frac{M (\tilde{\sigma} - X)}{|\tilde{\sigma} - X|} \quad \dot{\nu} = \sqrt{\frac{2}{3}} (\dot{\varepsilon}^{vp})^t M^{-1} \dot{\varepsilon}^{vp} = \dot{\varepsilon}_0 \left\{ \sinh \left( \frac{|\tilde{\sigma} - X|}{K} \right) \right\}^n \\ \dot{X} &= p \left( \frac{2}{3} Y(\nu) N \dot{\varepsilon}^{vp} - Q (X - X^{(1)}) \dot{\nu} \right) - \left\{ r_m \sinh \left( \left( \frac{|X|}{X_0} \right)^m \right) \right\} N R \frac{|X|}{X} \\ X^{(1)} &= p_1 \left( \frac{2}{3} Y(\nu) N \dot{\varepsilon}^{vp} - Q (X^{(1)} - X^{(2)}) \dot{\nu} \right) \quad X^{(2)} = p_2 \left( \frac{2}{3} Y(\nu) N \dot{\varepsilon}^{vp} - Q X^{(2)} \dot{\nu} \right) \end{aligned} \right.$$

avec :  $Y(\nu) = Y_\infty + (Y_0 - Y_\infty) e^{b\nu}$      $|X| = \sqrt{\frac{3}{2}} X^t N X$

**Remarque :**

$\tilde{\sigma}$  représente le déviateur des contraintes et  $|\tilde{\sigma} - X|$  l'équivalent au sens de Hill.  
Les matrices  $M$ ,  $N$ ,  $R$  et  $Q$  permettent de décrire l'anisotropie de comportement viscoplastique.

## 11.2.1 Syntaxe

```
| LMARC_IRRA= _F (
    ♦ R_0          = R0, [R]
    ♦ DE_0         = eps 0, [R]
    ♦ N            = n, [R]
    ♦ K            = k, [R]
    ♦ Y_0          = y0, [R]
    ♦ Y_I          = yinfi, [R]
    ♦ B            = b, [R]
    ♦ A_0          = X0, [R]
    ♦ RM           = rm, [R]
    ♦ M            = m, [R]
    ♦ P            = p, [R]
    ♦ P1           = p1, [R]
    ♦ P2           = p2, [R]
    ♦ M11          = M11, [R]
    ♦ M22          = M22, [R]
    ♦ M33          = M33, [R]
    ♦ M66          = M66, [R]
    ♦ N11          = N11, [R]
    ♦ N22          = M22, [R]
    ♦ N33          = N33, [R]
    ♦ N66          = N66, [R]
    ♦ Q11          = Q11, [R]
    ♦ Q22          = Q22, [R]
    ♦ Q33          = Q33, [R]
    ♦ Q66          = Q66, [R]
    ♦ R11          = R11, [R]
    ♦ R22          = R22, [R]
    ♦ R33          = R33, [R]
    ♦ R66          = R66, [R]
    ◇ GRAN_A      = /a, [R]
                    /0.0, [DEFAULT]
    ◇ GRAN_B      = /b, [R]
                    /0.0, [DEFAULT]
    ◇ GRAN_S      = /s, [R]
                    /0.0 [DEFAULT]
)
```

## 11.3 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 : 6 paramètres (dont un paramètre purement numérique)

- 1) pentes successives PEN1, PEN2 et PEN3 de la courbe Moment = f(angle) ;
- 2) angles ANG1 et ANG2 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 et PEN2 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])

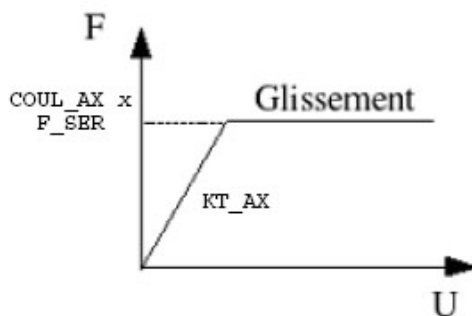
Les noms des paramètres suivis du suffixe \_FO permettent de renseigner la valeur sous la forme d'une fonction.

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].

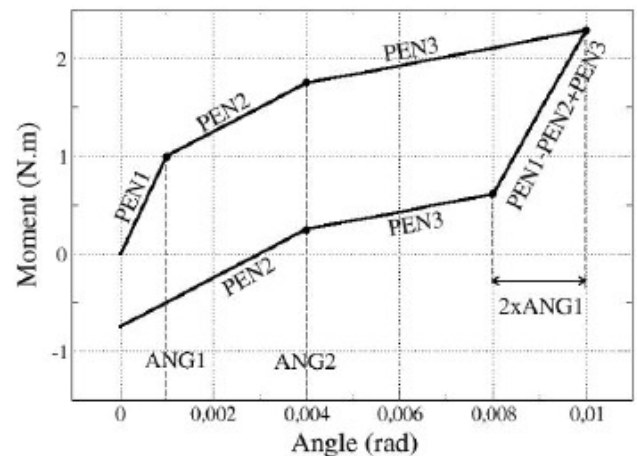
## 11.3.1 Syntaxe

```
| DIS_GRICRA = _F (
% Comportement 'DIS_GRICRA'

♦ KN_AX      = kn_bossette,      [R]
♦ KT_AX      = kt_bossette,      [R]
♦ COUL_AX    = kt_bossette,      [R]
♦ F_SER      = kt_bossette,      [R]
```



(a) Comportement en translation



(b) Comportement en flexion

```
♦ F_SER_FO   = kt_bossette,      [fonction]
♦ ET_AX      = /kt_bossette,     [R]
              /1.0E-7,          [DEFAULT]
♦ ET_ROT     = /kt_bossette,     [R]
              /1.0E-7,          [DEFAULT]
♦ ANG1       = kn_ressort,       [R]
♦ ANG2       = kt_ressort,       [R]
♦ ANG1_FO    = mu_bossette,     [fonction]
♦ ANG2_FO    = mu_ressort,      [fonction]
♦ PEN1_FO    = gamma_bossette,  [fonction]
♦ PEN2_FO    = gamma_ressort,   [fonction]
♦ PEN3_FO    = forc_serrage     [fonction]
```

## 11.4 Mot clé facteur GATT\_MONERIE

Loi de comportement thermo-mécanique du combustible "Gatt-Monerie" afin de simuler des essais d'indentation [R5.03.08]. Cette loi de comportement est une loi élasto-viscoplastique isotrope sans écrouissage dont les spécificités sont :

- le potentiel de dissipation est la somme de deux potentiels de type Norton (sans seuil),
- le combustible présentant une porosité résiduelle susceptible d'évoluer en compression (densification), ce potentiel dépend, en plus de la contrainte équivalente, de la contrainte hydrostatique.

Les deux variables internes de ce modèle sont la déformation plastique cumulée et la fraction volumique de porosité.

## 11.4.1 Syntaxe

```
◇ | GATT_MONERIE = _F (

    ◆ D_GRAIN      = d_grain,          [R]
    ◆ PORO_INIT    = poro_init ,      [R]
    ◇ EPSI_01      = /eps1,           [R]
                                /2.7252E-10, [DEFAULT]
    ◇ EPSI_02      = /eps2,           [R]
                                /9.1440E-41  [DEFAULT]
)
```

avec

D\_GRAIN : taille du grain combustible  
PORO\_INIT : porosité initiale  
EPSI\_01 : coefficient vitesse de déformation basse contrainte  
EPSI\_02 : coefficient vitesse de déformation forte contrainte

Les caractéristiques élastiques doivent être renseignées sous le mot clé ELAS.

## 11.5 Mot clé facteur DIS\_CONTACT

Ce mot clé permet de définir les paramètres associés au comportement DIS\_CHOC non linéaire de choc avec frottement de Coulomb associés aux éléments discrets (cf. [R5.03.17]) pour des modélisations DIS\_T ou DIS\_TR s'appuyant sur des mailles POI1 ou SEG2 (élément discret à 1 ou 2 nœuds).

### 11.5.1 Syntaxe

```
◇ | DIS_CONTACT = _F (

    ◇ RIGI_NOR      = Kn,              [R]
    ◇ RIGI_TAN      = / Kt,            [R]
                                / 0.0, [DEFAULT]
    ◇ AMOR_NOR      = / Cn,            [R]
                                / 0.0, [DEFAULT]
    ◇ AMOR_TAN      = / Ct,            [R]
                                / 0.0, [DEFAULT]
    ◇ COULOMB        = / mu,           [R]
                                / 0.0, [DEFAULT]
    ◇ DIST_1         = / dist1,        [R]
                                / 0.0, [DEFAULT]
    ◇ DIST_2         = / dist2,        [R]
                                / 0.0, [DEFAULT]
    ◇ JEU            = / d0,           [R]
                                / 0.0 [DEFAULT]
)
```



## 11.5.2 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 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.

## 11.5.3 Opérandes COULOMB/DIST\_1/DIST\_2/JEU

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).

## 11.6 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 tenseur 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 COMP\_INCR [U4.51.11] avec RELATION = 'DISC\_ECRO\_CINE'.

## 11.6.1 Syntaxe

```

◇ | DIS_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]
)

```

## 11.6.2 Opérandes

$LIMY\_DX = fy\_dx, \dots$

$F_y^x$  ... : limite élastique dans la direction d'effort  $x$  ...

$KCIN\_DX = kx\_dx, \dots$

$k_x$  ... : « raideur » d'écrouissage cinématique dans la direction d'effort  $x$  ...

$PUIS\_DX = n\_dx, \dots$

$n_x$  ... : puissance, définissant la forme de la courbe monotone dans la direction d'effort ...

$LIMU\_DX = fu\_dx, \dots$

$F_u^x$  ... : limite d'écrouissage cinématique, définissant le plateau de la courbe monotone dans la direction d'effort  $x$  ...

## 11.7 Mot clé facteur DIS\_VISC

Ces paramètres de comportement viscoélastique non linéaire sont 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]). La loi est construite composante par composante du tenseur 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 valeur de 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].

Cette loi de comportement visqueuse est utilisable avec les opérateurs STAT\_NON\_LINE et DYNA\_NON\_LINE, sous le mot clé COMP\_INCR [U4.51.11] avec RELATION = 'DISC\_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`.

## 11.7.1 Syntaxe

```
| DIS_VISC = _F(  
    / ♦ COEF_DX          = a_dx,          [R]  
    ♦ PUIS_DX           = c_dx,          [R]  
    / ♦ COEF_DY          = a_dy,          [R]  
    ♦ PUIS_DY           = c_dy,          [R]  
    / ♦ COEF_DZ          = a_dz,          [R]  
    ♦ PUIS_DZ           = c_dz,          [R]  
    / ♦ COEF_RX          = a_rx,          [R]  
    ♦ PUIS_RX           = c_rx,          [R]  
    / ♦ COEF_RY          = a_ry,          [R]  
    ♦ PUIS_RY           = c_ry,          [R]  
    / ♦ COEF_RZ          = a_rz,          [R]  
    ♦ PUIS_RZ           = c_rz          [R]  
)
```

## 11.7.2 Opérandes

La loi de comportement est de la forme  $F = CV^\alpha$  et nécessite 2 caractéristiques. Leurs unités doivent être en accord avec celles de l'effort ou du couple considéré :  $F$  est homogène à une force (resp. couple),  $V$  est homogène à une vitesse (resp. vitesse angulaire).

`COEF_DX = c_dx ...`

$C_x$  ... : coefficient d'amortissement (cette valeur peut être différente de la raideur  $K_e$ ) dans la direction d'effort  $x$  ...

`PUIS_DX = a_dx ...`

$\alpha_x$  ... : puissance de la loi d'amortissement en vitesse dans la direction d'effort  $x$  ...

## 11.8 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 `COMP_INCR` [U4.51.11] avec `RELATION = 'DIS_BILI_ELAS'`.

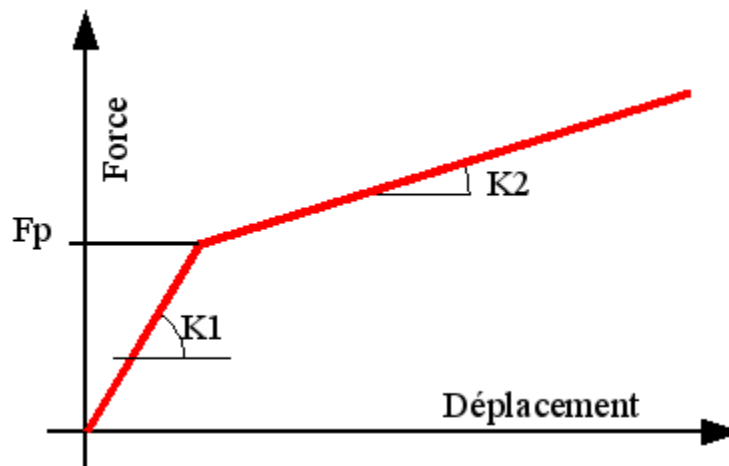
Les grandeurs sont toutes exprimées dans le repère local de l'élément. L'orientation du discret peut se faire dans la commande `AFFE_CARA_ELEM` avec les règles habituelles en utilisant le mot-clé `ORIENTATION`.

## 11.8.1 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]
)
```

## 11.8.2 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.

## 11.9 Mot clé facteur ASSE\_CORN

Description des caractéristiques matériau associées au comportement d'un assemblage boulonné [R5.03.32].

### 11.9.1 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]
)
```

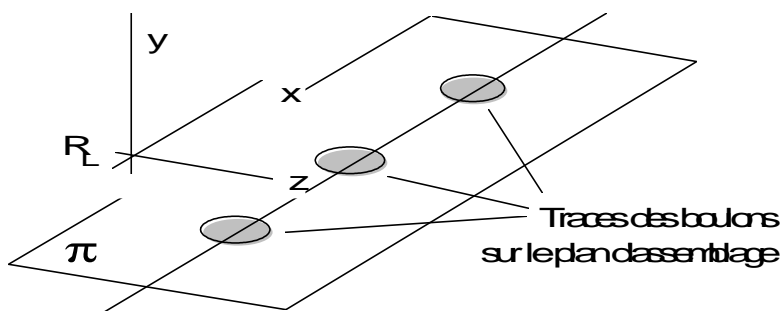
```

♦ C_2      = c2,          [R]
♦ KY       = ky,          [R]
♦ KZ       = kz,          [R]
♦ KRX      = krx,         [R]
♦ KRZ      = krz,         [R]
◊ R_P0     = /rp0,        [R]
              /1.E-4
)

```

## 11.9.2 Opérandes

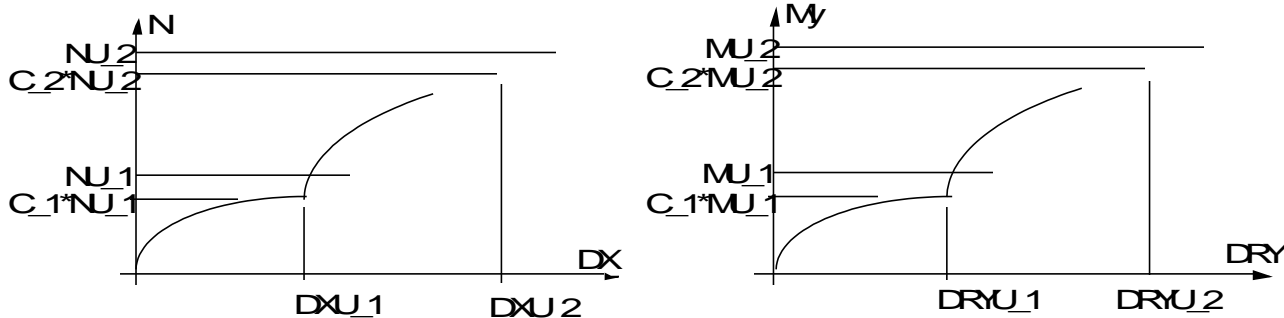
Sur la figure suivante, le plan  $\pi$  représente le plan de l'assemblage. L'axe des boulons est perpendiculaire à ce plan. Le lecteur se reportera à [U4.42.01] AFFE\_CARA\_ELEM pour l'orientation du repère  $R_L$  définissant le plan de l'assemblage.



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

## 11.10 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  $d_{lp}$  de l'extrémité de l'armement dans la phase plastique et le déplacement élastique limite  $d_{le}$ .

### 11.10.1 Syntaxe

```
| ARME = _F (
    ♦ KYE = kye , [R]
    ♦ DLE = dle , [R]
    ♦ KYP = kyp , [R]
    ♦ DLP = dlp , [R]
    ♦ KYG = kyg [R]
)
```

### 11.10.2 Opérands KYE/DLE

$KYE = kye$

Pente élastique jusqu'à un effort limite.

$DLE = dle$

Déplacement limite de la déformation élastique.

### 11.10.3 Opérande KYP/DLP

$KYP = kyp$

Pente plastique jusqu'au déplacement limite DLP.

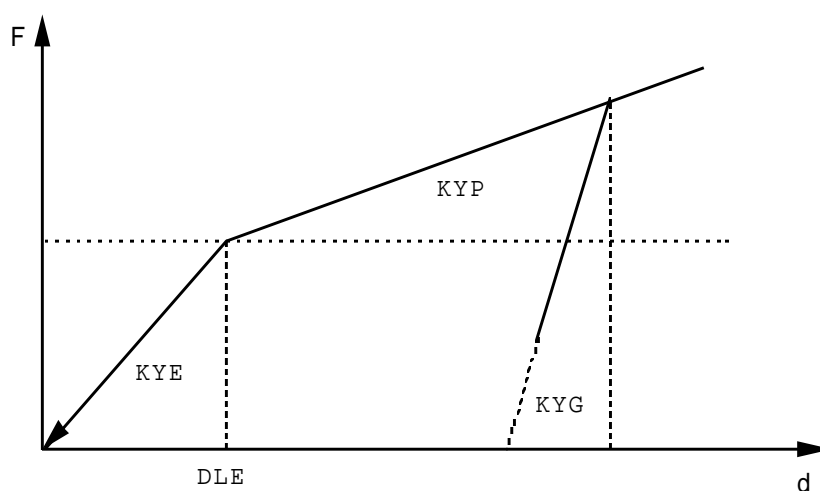
$DLP = dlp$

Déplacement limite de la déformation plastique 0.

### 11.10.4 Opérande KYG

$KYG = kyg$

Pente de décharge.



## 12 Comportement fluide

### 12.1 Mot clé facteur FLUIDE

Définitions des caractéristiques de fluide constantes.

#### 12.1.1 Syntaxe

```
| FLUIDE = _F (  
    ♦ RHO      = rho ,           [R]  
    ◇ CELE_R   = celr ,         [R]  
    ◇ CELE_C   = celc ,         [C]  
)
```

#### 12.1.2 Opérande RHO

RHO = rho

Masse volumique du fluide. Pas de vérification.

#### 12.1.3 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.

## 13 Données Matériaux associées à des post-traitements

### 13.1 Mot clé facteur FATIGUE

On pourra se reporter à [R7.04.01] et [R7.04.03] .

#### 13.1.1 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]

    ◇ MANSOON_COFFIN    = f_mans,    [fonction]

    ◇ E_REFE            = Ec,         [R]
    ◇ D0                = d0,        [R]
    ◇ TAU0              = tau0,      [R]

)
```

#### 13.1.2 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.

#### 13.1.3 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].

$D = A Salt^\beta$  où  $A$  et  $\beta$  sont deux constantes du matériau,

$Salt$  = contrainte alternée du cycle =  $\frac{\Delta\sigma}{2}$  et  $D$  le dommage élémentaire.

#### 13.1.4 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].

$$Salt = \text{contrainte alternée} = \frac{1}{2} \frac{E_c}{E} \Delta \sigma$$

$$X = \log_{10}(Salt)$$

$$N_{rupt} = 10^{a0 + a1x + a2x^2 + a3x^3}$$

$$D = \begin{cases} 1/N & \text{si } Salt \geq SL \\ 0. & \text{sinon} \end{cases}$$

Cette liste d'opérandes permet d'introduire les divers paramètres de cette forme analytique.

$a0, a1, a2$  et  $a3$  constantes du matériau,

$SL$  limite d'endurance du matériau.

Le module d'Young  $E$  est introduit dans `DEFI_MATERIAU` (mot clé facteur `ELAS` opérande  $E$ ).

La valeur de  $E_c$ , module d'Young associé à la courbe de fatigue du matériau est également introduite dans `DEFI_MATERIAU` sous le mot clé facteur `FATIGUE`, opérande `E_REFE`.

### 13.1.5 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  $\frac{\Delta \varepsilon}{2}$ .

### 13.1.6 Opérande `E_REFE`

`E_REFE` =  $E_c$

Cet opérande permet de spécifier la valeur du module d'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].

### 13.1.7 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` =  $\tau_{au0}$

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].

## 13.2 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\_ELEM, U4.81.01).

### 13.2.1 Syntaxe

```
| DOMMA_LEMAITRE = _F (
    ♦ S = s,                                [fonction**]
    ♦ EPSP_SEUIL = Pseuil,                  [fonction**]
    ◇ EXP_S = / pd,                         [R]
                                          / 1.0    [DEFAULT]
)
```

### 13.2.2 Opérande s

S = s

s est un paramètre matériau nécessaire au calcul du dommage de Lemaitre. s doit être une fonction du paramètre TEMP.

### 13.2.3 Opérande EPSP\_SEUIL

EPSP\_SEUIL = Pseuil

Permet de spécifier la valeur du seuil d'endommagement pd, nécessaire au calcul du dommage de Lemaitre.

### 13.2.4 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.

## 13.3 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].

### 13.3.1 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
)
```

## 13.3.2 Opérateur 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, cf. [R7.04.01] et [U4.83.02].

## 13.3.3 Opérateur MATAKE\_B

MATAKE\_B = b,

Permet de spécifier la valeur du coefficient  $b$ , présent dans les critères MATAKE\_MODI\_AC et MATAKE\_MODI\_AV, cf. [R7.04.01] et [U4.83.02].

## 13.3.4 Opérateur 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, cf. [R7.04.01] et [U4.83.02]. Cette valeur doit être supérieure ou égale à un et inférieure ou égale à  $\sqrt{3}$ . Cet opérateur est à utiliser dans les critères : MATAKE\_MODI\_AC et MATAKE\_MODI\_AV.

## 13.3.5 Opérateur 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, cf. [R7.04.01] et [U4.83.02].

## 13.3.6 Opérateur 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, cf. [R7.04.01] et [U4.83.02].

## 13.3.7 Opérateur 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, cf. [R7.04.01] et [U4.83.02]. Cette valeur doit être supérieure ou égale à un et inférieure ou égale à  $\sqrt{3}$ . Cet opérateur est à utiliser dans les critères : DANG\_VAN\_MODI\_AC, DANG\_VAN\_MODI\_AV et FATESOCI\_MODI\_AV, cf. [R7.04.01] et [U4.83.02].

## 13.3.8 Opérateur FATSOC\_A

FATSOC\_A = a,

Permet de spécifier la valeur du coefficient  $a$ , présent dans le critère FATESOCI\_MODI\_AV, cf. [R7.04.01] et [U4.83.02].

## 13.4 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 (i.e. déformation plastique cumulée supérieure à une valeur choisie arbitrairement  $p_s$ ) et  $m, \sigma_u, V_0$  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 :

$$\sigma_w^m = \sum_V \left[ \max_{[u < t, \dot{p}(u) > 0]} [\tilde{\sigma}_I(u)]^m \frac{V}{V_0} \right],$$

$\dot{p}$  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) :

$$P_r(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\sigma_w^0}{\sigma_u^0} \right)^m \right],$$

$\sigma_w^0$  désignant la contrainte de Weibull définie conventionnellement pour  $\sigma_u^0$  donnée :

$$\sigma_w^{0^m} = \sum_V \max_{[u < t, \dot{p}(u) > 0]} \left[ \frac{\sigma_u^0 \cdot \sigma_I(u)}{\sigma_u^0(\theta(u))} \right]^m \frac{V}{V_0} A^{p^m},$$

$\theta(u)$  désignant la température dans l'élément  $\delta V$ .

### 13.4.1 Syntaxe

| / WEIBULL = \_F (

♦	M	=	m,	[R]
♦	SIGM_REFE	=	sigmu,	[R]
♦	VOLU_REFE	=	v0,	[R]
◇	SEUIL_EPSP_CUMU	=	/ps,	[R]
			/10-6	[DEFAULT]

)

/ 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,	[DEFAULT]

)

## 13.4.2 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.

## 13.5 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'.

### 13.5.1 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]
)
```

### 13.5.2 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.

### 13.5.3 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, cf. POST\_RCCM[U4.83.11]

Contrainte admissible du matériau à la température maximale, cf. POST\_RCCM[U4.83.11]

### 13.5.4 Opérande sc

$SC = sc$ 

Contrainte admissible du matériau à la température ambiante, cf. POST\_RCCM[U4.83.11]

## 13.5.5 Opérande s

 $S = s$ 

Contrainte admissible du matériau. Cet opérande varie en fonction de la température, cf. POST\_RCCM[U4.83.11]

## 13.5.6 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.

$$\begin{cases} K_e = 1 & \text{si } \Delta \sigma \leq 3 S_m \\ K_e = 1 + (1 - n) \left( \frac{\Delta \sigma}{3 S_m} - 1 \right) (n(m - 1)) & \text{si } 3 S_m < \Delta \sigma \leq 3 S_m \\ K_e = \frac{1}{n} & \text{si } 3 m S_m \leq \Delta \sigma \end{cases}$$

## 13.5.7 Opérandes A\_AMORC/B\_AMORC

 $A\_AMORC = a, B\_AMORC = b$ 

Coefficients de la loi d'amorçage.

## 13.5.8 Opérande D\_AMORC

 $D\_AMORC = d$ 

Distance d'extraction des contraintes.

## 13.5.9 Opérande R\_AMORC

 $R\_AMORC = r$ 

Paramètre de la relation entre contrainte et contrainte efficace.