

**Manuel d'Utilisation**  
**Fascicule U4.4- : Modélisation**  
**Document : U4.43.01**

## 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 .....	13
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 .....	17
3.1.5 Opérandes AMOR_ALPHA / AMOR_BETHA / AMOR_HYST .....	18
3.1.6 Opérandes K_DESSIC / B_ENDOGE .....	18
3.1.7 Opérande FONC_DESORP .....	18
3.2 Mot clé facteur ELAS_FLUI .....	18
3.2.1 Syntaxe .....	19
3.2.2 Opérande ELAS_FLUI .....	19
3.3 Mot clé facteur APPUI_ELAS .....	20
3.4 Mot clé facteur CABLE .....	20
3.4.1 Syntaxe .....	20
3.4.2 Opérandes d'élasticité .....	20
3.4.3 Opérande de masse .....	21
3.4.4 Opérande de dilatation .....	21
3.4.5 Opérandes d'amortissement .....	21
3.5 Mots clés facteur ELAS_ORTH / ELAS_ORTH_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_T / ALPHA_N .....	24
3.5.5 Opérandes TEMP_DEF_ALPHA / PRECISION .....	24
3.5.6 Critères de rupture .....	24
3.6 Mots clés facteur ELAS_ISTR / ELAS_ISTR_FO .....	25
3.6.1 Syntaxe .....	25
3.6.2 Opérandes d'élasticité .....	26
3.6.3 Opérande RHO .....	27
3.6.4 Opérandes ALPHA_L / ALPHA_N .....	27
3.6.5 Opérandes TEMP_DEF_ALPHA / PRECISION .....	27
3.7 Mot clés facteur ELAS_COQUE / ELAS_COQUE_FO .....	28
3.7.1 Syntaxe .....	28
4 Comportements mécaniques non linéaires généraux .....	30
4.1 Mot clé facteur TRACTION .....	30
4.1.1 Syntaxe .....	30

4.1.2 Opérande SIGM.....	30
4.2 Mots clés facteur ECRO_LINE / ECRO_LINE_FO.....	30
4.2.1 Syntaxe .....	30
4.2.2 Opérandes .....	30
4.3 Mots clés facteur PRAGER / PRAGER_FO.....	31
4.3.1 Syntaxe .....	31
4.4 Mot clé CHABOCHE.....	32
4.4.1 Syntaxe .....	32
4.5 Mots clés facteur CIN1_CHAB / CIN1_CHAB_FO.....	33
4.5.1 Syntaxe .....	33
4.6 Mots clés facteur CIN2_CHAB / CIN2_CHAB_FO.....	34
4.6.1 Syntaxe .....	35
4.7 Mots clés facteur TAHERI / TAHERI_FO.....	35
4.7.1 Syntaxe .....	36
4.8 Mots clés OHNO / OHNO_FO .....	36
4.8.1 Syntaxe .....	37
4.9 Mot clé facteur POLY_CFC / POLY_CFC_FO.....	38
4.9.1 Syntaxe .....	39
4.10 Mots clés VISCOCHAB / VISCOCHAB_FO .....	40
4.10.1 Syntaxe .....	41
4.11 Mots clés facteur LEMAITRE / LEMAITRE_FO.....	42
4.11.1 Syntaxe .....	42
4.12 Mot clé facteur ZIRC_CYRA2 .....	43
4.12.1 Syntaxe .....	43
4.13 Mot clé facteur ZIRC_EPRI .....	43
4.13.1 Syntaxe .....	44
4.14 Mot clé facteur VISC_IRRA_LOG .....	44
4.14.1 Syntaxe .....	44
4.15 Mots clés facteur LMARC / LMARC_FO.....	45
4.15.1 Syntaxe .....	45
5 Comportements liés à l'endommagement et la rupture .....	46
5.1 Mots clés facteur ROUSSELIER / ROUSSELIER_FO .....	46
5.1.1 Syntaxe .....	47
5.2 Mot clé facteur ROUSS_VISC .....	48
5.2.1 Syntaxe .....	48
5.3 Mots clés VENDO_CHAB / VENDO_CHAB_FO .....	49
5.3.1 Syntaxe .....	49
5.4 Mot clé facteur NON_LOCAL .....	51
5.4.1 Syntaxe .....	51
5.4.2 Opérandes LONG_CARA / COEF_RIGI_MINI .....	51
5.5 Mot clé facteur RUPT_FRAG .....	51
5.5.1 Syntaxe .....	51

5.5.2 Opérande RUPT_FRAG .....	51
5.5.3 Opérande SIGM_C.....	51
5.5.4 Opérande SAUT_C.....	51
5.6 Mot clé facteur CORR_ACIER.....	52
5.6.1 Syntaxe.....	52
5.6.2 Opérande D_CORR.....	52
5.6.3 Opérandes ECRO_K, ECRO_M.....	52
5.6.4 Opérande SY .....	52
6 Comportements thermiques .....	53
6.1 Mots clés facteur THER / THER_FO.....	53
6.1.1 Syntaxe.....	53
6.1.2 Opérandes LAMBDA / RHO_CP.....	53
6.2 Mot clé facteur THER_ORTH.....	53
6.2.1 Syntaxe.....	53
6.2.2 Opérandes LAMBDA / RHO_CP .....	54
6.3 Mot clé facteur THER_NL (cf. [R5.02.02]) .....	54
6.3.1 Syntaxe.....	54
6.3.2 Opérandes BETA / LAMBDA / RHO_CP .....	54
6.4 Mots clés facteur THER_COQUE / THER_COQUE_FO.....	54
6.4.1 Syntaxe.....	55
6.4.2 Opérandes COND_LMM / COND_LMP / COND_LPP / COND_LSI / COND_TMM / COND_TMP / COND_TPP / COND_TSI.....	55
6.4.3 Opérandes COND_NMM / COND_NMP / COND_NPP / COND_NSI.....	56
6.4.4 Opérandes CMAS_MM / CMAS_MP / CMAS_PP / CMAS_SI .....	56
7 Comportements spécifiques aux bétons .....	57
7.1 Mot clé facteur THER_HYDR.....	57
7.1.1 Syntaxe.....	57
7.1.2 Opérandes LAMBDA / BETA.....	57
7.1.3 Opérande AFFINITE .....	57
7.1.4 Opérande CHAL_HYDR.....	57
7.1.5 Opérande QSR_K.....	57
7.2 Mot clé facteur SECH_GRANGER .....	58
7.2.1 Syntaxe.....	58
7.2.2 Opérandes A / B / QSR_K / TEMP_0_C.....	58
7.3 Mot clé facteur SECH_MENSI.....	59
7.3.1 Syntaxe.....	59
7.3.2 Opérandes A / B .....	59
7.4 Mot clé facteur SECH_BAZANT .....	60
7.4.1 Syntaxe.....	60
7.4.2 Opérandes D1 / ALPHA_BAZANT / N / FONC_DESORP.....	60
7.5 Mot clé facteur SECH_NAPPE.....	61

7.5.1 Syntaxe .....	61
7.5.2 Opérande FONCTION.....	61
7.6 Mot clé facteur PINTO_MENEGOTTO .....	61
7.6.1 Syntaxe .....	63
7.6.2 Opérandes .....	63
7.7 Mots clés facteur BPEL_BETON / BPEL_ACIER.....	65
7.7.1 Syntaxe .....	65
7.7.2 Opérandes .....	65
7.8 Mot clé facteur BETON_DOUBLE_DP .....	66
7.8.1 Syntaxe .....	66
7.8.2 Opérandes F_C / F_T / COEF_BIAX .....	67
7.8.3 Opérandes ENER_COMP RUPT / ENER_TRAC RUPT / COEF_ELAS_COMP .....	67
7.8.4 Opérandes LONG_CARA.....	67
7.8.5 Opérandes COMP_POST_PIC / TRAC_POST_PIC .....	68
7.9 Mot clé facteur GRANGER_FP / V_GRANGER_FP.....	69
7.9.1 Syntaxe pour le fluage propre.....	69
7.9.2 Opérandes pour le fluage propre .....	70
7.9.3 Syntaxe pour le vieillissement.....	70
7.9.4 Opérandes pour le vieillissement.....	70
7.10 Mot clé NADAI_B.....	71
7.10.1 Syntaxe .....	72
7.10.2 Opérandes F_C / F_T.....	72
7.10.3 Opérande CRIT_E_C.....	72
7.10.4 Opérandes EPS_P_C / EPS_R_C / EPSI_R_T.....	72
7.10.5 Opérande FAC_T_C.....	72
7.11 Mot clé facteur BAZANT_FD .....	72
7.11.1 Syntaxe .....	72
7.11.2 Opérande .....	72
7.12 Mot clé LABORD_1D .....	73
7.12.1 Syntaxe .....	73
7.12.2 Opérandes .....	73
7.13 Mot clé facteur MAZARS / MAZARS_FO.....	74
7.13.1 Syntaxe .....	74
7.13.2 Opérandes EPSD0 .....	74
7.13.3 Opérandes AC / AT / BC / BT.....	74
7.13.4 Opérande BETA .....	75
7.14 Mot clé BETON_UMLV_FP.....	75
7.14.1 Syntaxe .....	76
7.14.2 Opérande .....	76
7.15 Mots clés facteur BETON_ECRO_LINE .....	77
7.15.1 Syntaxe .....	77

Titre :           Opérateur *DEFI\_MATERIAU*  
Auteur(s) :     **J.P. LEFEBVRE**

Date :           17/06/04  
Clé :    *U4.43.01-H2* Page :   6/138

7.15.2	Opérandes .....	77
7.16	Mots clés facteur <i>GLRC</i> .....	77
7.16.1	Syntaxe .....	77
7.16.2	Opérandes .....	78
8	Comportements Métallo-Mécaniques.....	79
8.1	Mot clé facteur <i>META_ACIER</i> .....	79
8.1.1	Syntaxe.....	79
8.1.2	Opérandes pour les changements de phases .....	79
8.1.3	Opérandes pour la taille de grains .....	81
8.2	Mot clé facteur <i>META_ZIRC</i> .....	82
8.2.1	Syntaxe.....	82
8.2.2	Opérandes.....	82
8.3	Mot clé facteur <i>DURT_META</i> .....	83
8.3.1	Syntaxe.....	83
8.3.2	Opérandes.....	83
8.4	Mots clés facteur <i>ELAS_META / ELAS_META_FO</i> .....	84
8.4.1	Syntaxe.....	84
8.4.2	Opérandes.....	85
8.5	Mot clé facteur <i>META_ECRO_LINE</i> .....	87
8.5.1	Syntaxe.....	87
8.5.2	Opérandes.....	87
8.6	Mot clé facteur <i>META_TRACTION</i> .....	88
8.6.1	Syntaxe.....	88
8.6.1.1	Opérandes .....	88
8.7	Mot clé facteur <i>META_VISC</i> .....	89
8.7.1	Syntaxe.....	89
8.7.2	Opérandes.....	89
8.8	Mot clé facteur <i>META_PT</i> .....	91
8.8.1	Syntaxe.....	91
8.8.2	Opérandes.....	91
8.9	Mot clé facteur <i>META_RE</i> .....	92
8.9.1	Syntaxe.....	92
8.9.2	Opérandes.....	92
9	Comportements THERMO-HYDRO-MECANIKES et des sols .....	93
9.1	Mot clé simple <i>COMP_THM</i> .....	93
9.1.1	Syntaxe.....	94
9.2	Mot clé facteur <i>THM_INIT</i> .....	94
9.2.1	Syntaxe.....	94
9.2.2	Opérande <i>TEMP</i> .....	95
9.2.3	Opérande <i>PRE1</i> .....	95
9.2.4	Opérande <i>PRE2</i> .....	95

9.2.5 Opérande PORO.....	95
9.2.6 Opérande PRES_VAPE.....	95
9.2.7 Opérande DEGR_SATU.....	95
9.3 Mot clé facteur THM_LIQU.....	96
9.3.1 Syntaxe .....	96
9.3.2 Opérande RHO.....	96
9.3.3 Opérande UN_SUR_K.....	96
9.3.4 Opérande ALPHA .....	96
9.3.5 Opérande CP.....	96
9.3.6 Opérande VISC .....	96
9.3.7 Opérande D_VISC_TEMP .....	96
9.4 Mot clé facteur THM_GAZ.....	96
9.4.1 Syntaxe .....	96
9.4.2 Opérande MASS_MOL.....	97
9.4.3 Opérande CP.....	97
9.4.4 Opérande VISC.....	97
9.4.5 Opérande D_VISC_TEMP .....	97
9.5 Mot clé facteur THM_VAPE_GAZ.....	97
9.5.1 Syntaxe .....	97
9.5.2 Opérande MASS_MOL.....	97
9.5.3 Opérande CP.....	97
9.5.4 Opérande VISC.....	97
9.5.5 Opérande D_VISC_TEMP .....	97
9.6 Mot clé facteur THM_AIR_DISS.....	98
9.6.1 Syntaxe .....	98
9.6.2 Opérande CP.....	98
9.6.3 Opérande COEF_HENRY.....	98
9.6.4 Opérande D_VISC_TEMP .....	98
9.7 Mot clé facteur THM_DIFFU .....	98
9.7.1 Syntaxe .....	98
9.7.2 Opérande R_GAZ .....	99
9.7.3 Opérande RHO.....	99
9.7.4 Opérande CP.....	99
9.7.5 Opérande BIOT_COEF.....	99
9.7.6 Opérande SATU_PRES.....	100
9.7.7 Opérande D_SATU_PRES .....	100
9.7.8 Opérande PESA_X .....	100
9.7.9 Opérande PESA_Y .....	100
9.7.10 Opérande PESA_Z .....	100
9.7.11 Opérande PERM_IN.....	100
9.7.12 Opérande PERM_LIQU .....	100

9.7.13	Opérande D_PERM_LIQU_SATU.....	100
9.7.14	Opérande PERM_GAZ.....	100
9.7.15	Opérande D_PERM_SATU_GAZ.....	100
9.7.16	Opérande D_PERM_PRES_GAZ.....	101
9.7.17	Opérande FICKV_T.....	101
9.7.18	Opérande FICKV_S.....	101
9.7.19	Opérande FICKV_PG.....	101
9.7.20	Opérande FICKV_PV.....	101
9.7.21	Opérande D_FV_T.....	101
9.7.22	Opérande D_FV_PG.....	101
9.7.23	Opérande FICKA_T.....	101
9.7.24	Opérande FICKA_S.....	101
9.7.25	Opérande FICKA_PA.....	101
9.7.26	Opérande FICKA_PL.....	102
9.7.27	Opérande D_FA_T.....	102
9.7.28	Opérande LAMB_T.....	102
9.7.29	Opérande LAMB_S.....	102
9.7.30	Opérande LAMB_PHI.....	102
9.7.31	Opérande LAMB_CT.....	102
9.7.32	Opérande D_LB_T.....	102
9.7.33	Opérande D_LB_S.....	102
9.7.34	Opérande D_LB_PHI.....	102
9.7.35	Opérande EMMAG.....	102
9.8	Mot clé facteur SURF_ETAT_SATU (cf. [R7.01.14]).....	103
9.8.1	Syntaxe.....	103
9.8.2	Opérande E_CHAR.....	103
9.8.3	Opérande E_DECHAR.....	103
9.8.4	Opérande EV_KB.....	103
9.8.5	Opérande RF.....	103
9.8.6	Opérande XN.....	103
9.8.7	Opérande EV_XM.....	103
9.8.8	Opérande D_E_T.....	104
9.8.9	Opérande ANG_FRT.....	104
9.8.10	Opérande COHE.....	104
9.8.11	Opérande RESI_TRAC.....	104
9.8.12	Opérande ALPHA0.....	104
9.8.13	Opérande ALPHA1.....	104
9.8.14	Opérande ALPHA2.....	104
9.8.15	Opérande ALPHA3.....	104
9.8.16	Opérande ALPHA_S.....	104



9.9 Mot clé facteur SURF_ETAT_NSAT (cf. [R7.01.14]) .....	105
9.9.1 Syntaxe .....	105
9.9.2 Opérande E_CHAR .....	105
9.9.3 Opérande E_DECHAR .....	105
9.9.4 Opérande RF .....	105
9.9.5 Opérande XN .....	105
9.9.6 Opérande EV_KB .....	105
9.9.7 Opérande EV_XM .....	106
9.9.8 Opérande EV_A .....	106
9.9.9 Opérande EV_B .....	106
9.9.10 Opérande EV_CT .....	106
9.9.11 Opérande EV_SIGB .....	106
9.9.12 Opérande D_E_T .....	106
9.9.13 Opérande D_E_SUCC .....	106
9.9.14 Opérande ANG_FRT .....	106
9.9.15 Opérande ANG_FRT_ULT .....	106
9.9.16 Opérande COHE .....	106
9.9.17 Opérande D_COEH_SUCC .....	106
9.9.18 Opérande RESI_TRAC .....	106
9.9.19 Opérande SUCC_ULTM .....	106
9.9.20 Opérande A_SURF_SATU .....	107
9.9.21 Opérande B_SURF_SATU .....	107
9.9.22 Opérande C_SURF_SATU .....	107
9.9.23 Opérande D_SURF_SATU .....	107
9.10 Mot clé facteur CAM_CLAY_THM (cf. [R7.01.14]) .....	108
9.10.1 Syntaxe .....	108
9.10.2 Opérande NU .....	108
9.10.3 Opérande LAMBDA .....	108
9.10.4 Opérande KAPA .....	108
9.10.5 Opérande PRES_CRIT .....	108
9.10.6 Opérande M .....	108
9.10.7 Opérande GAMA .....	108
9.10.8 Opérande A0_PC .....	108
9.10.9 Opérande A1_PC .....	109
9.10.10 Opérande A2_PC .....	109
9.10.11 Opérande ALPHA0_PC .....	109
9.10.12 Opérande ALPHA1_PC .....	109
9.10.13 Opérande ALPHA2_PC .....	109
9.10.14 Opérande ALPHA3_PC .....	109
9.10.15 Opérande ALPHA_S .....	109

9.11	Mot clé <code>CAM_CLAY</code> .....	110
9.11.1	Syntaxe .....	110
9.11.2	Opérandes <code>LAMBDA</code> .....	110
9.11.3	Opérandes <code>KAPA</code> .....	110
9.11.4	Opérandes <code>M</code> .....	110
9.11.5	Opérandes <code>PORO</code> .....	110
9.11.6	Opérandes <code>PRES_CRIT</code> .....	110
9.11.7	Opérandes <code>PA</code> .....	110
9.12	Mot clé facteur <code>CJS</code> .....	111
9.12.1	Syntaxe .....	111
9.12.2	Opérande <code>BETA_CJS</code> .....	112
9.12.3	Opérande <code>RM</code> .....	112
9.12.4	Opérande <code>N_CJS</code> .....	113
9.12.5	Opérande <code>KP</code> .....	113
9.12.6	Opérande <code>RC</code> .....	113
9.12.7	Opérande <code>A_CJS</code> .....	113
9.12.8	Opérande <code>R_INIT</code> .....	113
9.12.9	Opérande <code>B_CJS</code> .....	113
9.12.10	Opérande <code>C_CJS</code> .....	114
9.12.11	Opérande <code>PCO</code> .....	114
9.12.12	Opérande <code>GAMMA_CJS</code> .....	114
9.12.13	Opérande <code>MU_CJS</code> .....	114
9.12.14	Opérande <code>PA</code> .....	114
9.12.15	Opérande <code>Q_INIT</code> .....	114
9.13	Mot clé facteur <code>LAIGLE</code> .....	115
9.13.1	Syntaxe .....	115
9.13.2	Opérande <code>GAMMA_ULT</code> .....	115
9.13.3	Opérande <code>GAMMA_E</code> .....	115
9.13.4	Opérande <code>M_ULT</code> .....	115
9.13.5	Opérande <code>M_E</code> .....	115
9.13.6	Opérande <code>A_E</code> .....	116
9.13.7	Opérande <code>M_PIC</code> .....	116
9.13.8	Opérande <code>A_PIC</code> .....	116
9.13.9	Opérande <code>ETA</code> .....	116
9.13.10	Opérande <code>SIGMA_C</code> .....	116
9.13.11	Opérandes <code>GAMMA</code> et <code>KSI</code> .....	116
9.13.12	Opérande <code>GAMMA_CJS</code> .....	116
9.13.13	Opérande <code>SIGMA_P1</code> .....	116
9.13.14	Opérande <code>SIGMA_P2</code> .....	116
9.13.15	Opérande <code>PA</code> .....	116

9.14	Mot clé facteur DRUCKER_PRAGER .....	117
9.14.1	Syntaxe .....	117
9.14.2	Opérande ECROUISSAGE .....	117
9.14.3	Opérande ALPHA .....	117
9.14.4	Opérande P_ULTM .....	117
9.14.5	Opérande SY .....	118
9.14.6	Opérande H .....	118
9.14.7	Opérande SY_ULTM .....	118
9.15	Mot clé facteur BARCELONE .....	118
9.15.1	Syntaxe .....	118
9.15.2	Opérandes R, BETA .....	118
9.15.3	Opérandes KC .....	118
9.15.4	Opérandes PCO_INIT .....	118
9.15.5	Opérandes KAPAS .....	118
9.15.6	Opérandes LAMBDA .....	118
10	Comportements spécifiques aux éléments 1D .....	119
10.1	Mots clés facteur VMIS_POUTRE / VMIS_POUTRE_FO .....	119
10.1.1	Syntaxe .....	120
10.2	Mot clé facteur ECRO_FLEJOU .....	120
10.2.1	Syntaxe .....	120
10.3	Mot clé facteur ECRO_ASYM_LINE (cf. [R5.03.09]) .....	121
10.3.1	Syntaxe .....	121
11	Comportements particuliers .....	122
11.1	Mot clé facteur GRAN_IRRA .....	122
11.1.1	Syntaxe .....	122
11.2	Mot clé facteur FLU_IRRA .....	123
11.2.1	Syntaxe .....	123
11.3	Mot clé facteur DIS_CONTACT .....	124
11.3.1	Syntaxe .....	124
11.3.2	Opérandes .....	125
11.4	Mot clé facteur ASSE_CORN : comportement d'un assemblage boulonné .....	127
11.4.1	Syntaxe .....	127
11.4.2	Opérandes .....	127
11.5	Mot clé facteur ARME : comportement d'un armement de ligne aérienne .....	128
11.5.1	Syntaxe .....	128
11.5.2	Opérande .....	129
12	Comportement fluide .....	130
12.1	Mot clé facteur FLUIDE .....	130
12.1.1	Syntaxe .....	130
12.1.2	Opérandes .....	130
13	Données Matériaux associées à des post-traitements .....	131

13.1	Mot clé facteur FATIGUE .....	131
13.1.1	Syntaxe .....	131
13.1.2	Opérande WOHLER .....	131
13.1.3	Opérandes A_BASQUIN / BETA_BASQUIN.....	132
13.1.4	Opérandes A0 / A1 / A2 / A3 / SL.....	132
13.1.5	Opérande MANSON_COFFIN .....	133
13.1.6	Opérande E_REFE .....	133
13.1.7	Opérande D0 .....	133
13.1.8	Opérande TAU0.....	133
13.2	Mot clé facteur DOMMA_LEMAITRE.....	133
13.2.1	Opérande S .....	133
13.2.2	Opérande EPSP_SEUIL.....	133
13.2.3	Opérande EXP_S .....	133
13.3	Mot clé facteur CISA_PLAN_CRIT.....	134
13.3.1	Opérande MATAKE_A.....	134
13.3.2	Opérande MATAKE_B.....	134
13.3.3	Opérande ENDU_FT .....	134
13.4	Mot clé facteur WEIBULL / WEIBULL_FO .....	135
13.4.1	Syntaxe .....	135
13.4.2	Opérandes .....	136
13.5	Mots clés facteur RCCM / RCCM_FO .....	136
13.5.1	Syntaxe .....	136
13.5.2	Opérande SY_02 .....	137
13.5.3	Opérande SM.....	137
13.5.4	Opérande SU .....	137
13.5.5	Opérande SC .....	137
13.5.6	Opérande SH.....	137
13.5.7	Opérande S .....	137
13.5.8	Opérande N_KE_RCCM / M_KE_RCCM.....	137

## 2     Syntaxe générale

```
ma [mater] = DEFI_MATERIAU (
    # Comportement Elastiques Généraux [§ 3]
    |    /   ELAS,                               # voir[§ 3.1]
    |    /   ELAS_FO,
    |    /   ELAS_FLUI,                         # voir[§ 3.2]
    |    APPUI_ELAS,                            # voir[§ 3.3]
    |    CABLE,                                 # voir[§ 3.4]
    |    /   ELAS_ORTH,                         # voir[§ 3.5]
    |    /   ELAS_ORTH_FO,
    |    /   ELAS_ISTR,                         # voir[§ 3.6]
    |    /   ELAS_ISTR_FO,
    |    /   ELAS_COQUE,                        # voir[§ 3.7]
    |    /   ELAS_COQUE_FO,
    # Comportements Mécaniques Non Linéaires Généraux [§ 4]
    |    TRACTION,                             # voir[§ 4.1]
    |    /   ECRO_LINE,                         # voir[§ 4.2]
    |    /   ECRO_LINE_FO,
    |    /   PRAGER,                            # voir[§ 4.3]
    |    /   PRAGER_FO,
    |    CHABOCHE,                             # voir[§ 4.4]
    |    /   VMIS_CIN1_CHAB,                    # voir[§ 4.5]
    |    /   VMIS_CIN1_CHAB_FO,
    |    /   VMIS_CIN2_CHAB,                    # voir[§ 4.6]
    |    /   VMIS_CIN2_CHAB_FO,
    |    /   TAHERI,                            # voir[§ 4.7]
    |    /   TAHERI_FO,
    |    /   OHNO                               # voir[§ 4.8]
    |    /   OHNO_FO
    |    /   POLY_CFC,                          # voir[§ 4.9]
    |    /   POLY_CFC_FO,
    |    /   VISCOCHAB                          # voir[§ 4.10]
    |    /   VISCOCHAB_FO
    |    /   LEMAITRE,                         # voir[§ 4.11]
    |    /   LEMAITRE_FO,
    |    ZIRC_CYRA2,                            # voir[§ 4.12]
    |    ZIRC_EPRI,                             # voir[§ 4.13]
    |    VISC_IRRA_LOG,                         # voir[§ 4.14]
    |    /   LMARC,                             # voir[§ 4.15]
    |    /   LMARC_FO,
```

```
# Comportements liés à l'endommagement et la rupture [$ 5]
| / ROUSSELIER, # voir[$ 5.1]
| / ROUSSELIER_FO,
| ROUSS_VISC, # voir[$ 5.2]
| / VENDO_CHAB, # voir[$ 5.3]
| / VENDO_CHAB_FO,
| NON_LOCAL, # voir[$ 5.4]
| RUPT_FRAG, # voir[$ 5.5]
| CORR_ACIER, # voir[$ 5.6]

# 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 et GRANGER_FP_V, # voir[$ 7.9]
| NADAI_B, # voir[$ 7.10]
| BAZANT_FD, # voir[$ 7.11]
| LABORD_1D, # voir[$ 7.12]
| / MAZARS, # voir[$ 7.13]
| / MAZARS_FO,
| BETON_UMLV_FP, # voir[$ 7.14]
| BETON_ECRO_LINE, # voir[$ 7.15]
| GLRC, # voir[$ 7.16]

# 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, # voir[$ 8.7]
| META_PT, # voir[$ 8.8]
| META_RE, # voir[$ 8.9]

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

COMP_THM = / 'LIQU_SATU' ,
           / 'LIQU_GAZ' ,
           / 'GAZ' ,
           / 'LIQU_GAZ_ATM' ,
           / 'LIQU_VAPE_GAZ' ,
           / 'LIQU_VAPE' ,
           / 'LIQU_SATU_GAT' ,
           / 'LIQU_NSAT_GAT' ,
```

```

| THM_INIT, # voir[§ 9.1]
| ELAS_THM, # voir[§ 9.2]
| THM_LIQU, # voir[§ 9.3]
| THM_GAZ, # voir[§ 9.4]
| THM_VAPE_GAZ, # voir[§ 9.5]
| THM_DIFFU, # voir[§ 9.6]
| SURF_ETAT_SATU # voir[§ 9.7]
| SURF_ETAT_NSAT # voir[§ 9.8]
| CAM_CLAY_THM # voir[§ 9.9]
| CAM_CLAY, # voir[§ 9.10]
| PORO_JOINT, # voir[§ 9.11]
| CJS, # voir[§ 9.12]
| LAIGLE, # voir[§ 9.13]
| DRUCKER_PRAGER, # voir[§ 9.14]
| BARCELONE, # 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]
| GRAN_IRRA, # voir[§ 11.1]
| FLU_IRRA, # voir[§ 11.2]
| CONTACT, # voir[§ 11.3]
| DIS_CONTACT, # voir[§ 11.4]
| ASSE_CORN, # voir[§ 11.5]
| ARME, # voir[§ 11.6]

# Comportement fluide [§ 12]
| FLUIDE, # voir[§ 12.1]

# Données Matériaux associés à des post-traitements [§ 13]
| FATIGUE, # voir[§ 13.1]
| DOMMA_LEMAITRE, # voir[§ 13.2]
| CISA_PLAN_CRIT, # voir[§ 13.3]
| WEIBULL, # voir[§ 13.4]
| / RCCM, # voir[§ 13.5]
| / RCCM_FO,
)

```

## Remarque :

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'

```

## 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 = α , [R]
                  AMOR_BETA = β , [R]
                  / AMOR_HYST = η , [R]
                )
/ ELAS_FO = _F ( ♦ E = yg , [fonction**]
                ♦ NU = nu , [fonction**]
                ◇ RHO = rho , [R]
                ◇ ALPHA = dil , [fonction**]
                ◇ / AMOR_ALPHA = α , [fonction**]
                  AMOR_BETA = β , [fonction**]
                  / AMOR_HYST = η , [fonction**]
                ◇ TEMP_DEF_ALPHA= Tdef , [R]
                ◇ PRECISION = / ε , [R]
                  / 1 , [DEFAULT]
                ◇ K_DESSIC = / k , [R]
                  / o , [DEFAULT]
                ◇ B_ENDOGE = / e , [R]
                  / o , [DEFAULT]
                ◇ FONC_DESORP = / f , [fonction]
                )
```

#### 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 =  $\alpha$  [fonction\*\*]

Coefficient de dilatation thermique isotrope.

Le coefficient de dilatation thermique est un coefficient de dilatation moyen qui peut dépendre de la température  $T$ .

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

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

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

◇ TEMP\_DEF\_ALPHA = Tdef [R]

C'est la valeur de la température à laquelle les valeurs du coefficient de dilatation thermique ont été déterminées, et ont été renseignées sous le mot clé ALPHA.

Ce mot clé devient obligatoire dès que l'on a renseigné ALPHA.

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

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

et  $\varepsilon^{th}(T_{ref}) = 0$

```

◇ 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  $\alpha(T_i)_{i=1, N}$ ) 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 Opérandes AMOR\_ALPHA / AMOR\_BETHA / AMOR\_HYST

◇ / AMOR\_ALPHA =  $\alpha$   
AMOR\_BETA =  $\beta$

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].

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

◇ / K\_DESSIC =  $k$

Coefficient de retrait de dessiccation.

◇ / K\_ENDOGE =  $e$

Coefficient de retrait de endogène.

Ces caractéristiques sont utilisés avec le comportement défini par les mots clés BETON\_DOUBLE\_BP, GRANGER\_FP et BAZANT\_FD.

### 3.1.7 Opérande FONC\_DESORP

FONC\_DESORP : courbe de sorption-désorption [R7.01.12] donnant l'hygrométrie  $h$  en fonction de la teneur en eau  $C$ . Opérande obligatoire avec la loi BAZANT\_FD [R7.01.01].

## 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.

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

$$\rho_{eq} = \frac{1}{(d_e^2 - d_i^2)} \left[ \rho_i \cdot d_i^2 + \rho_t \cdot (d_e^2 - d_i^2) + \rho_e \cdot d_{eq}^2 \right]$$

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

$\rho_i, \rho_e, \rho_t$  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.

$C_m$  est un coefficient de masse ajoutée (défini 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 Opérande ELAS\_FLUI

- ◇ / ELAS\_FLUI = \_F (
- Mot clé facteur permettant de calculer la masse volumique équivalente d'une structure poutre avec fluide interne et fluide externe (cette relation de comportement ne peut être utilisée qu'avec des éléments de poutre).
- ♦ RHO = rho  
Masse volumique du matériau.
  - ♦ E = yg  
Module d'Young.
  - ♦ NU = nu  
Coefficient de Poisson.
  - ♦ 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 APPUI\_ELAS

```

◇ / APPUI_ELAS = _F (
    ◆ E_N = rign, [R]
    ◇ E_TAN = / 0., [DEFAULT]
                / rign, [R]
                )

```

Ce mot clé facteur permet de définir les caractéristiques du matériau associé à la modélisation 'APPUI\_REP' [U4.41.01]. Cette modélisation ne concerne que les éléments de type face de la modélisation '3D' associés au phénomène 'MECANIQUE'.

On modélise l'action d'un milieu caractérisé par la raideur surfacique normale et tangentielle sur des faces d'éléments tridimensionnels.

Dans le cas des éléments de coque, il faut dupliquer les mailles grâce à la commande CREA\_MAILLAGE [U4.23.02] et affecter la modélisation '3D' à ces nouvelles mailles.

◆ E\_N = rign, [R]  
Valeur de la raideur surfacique normale.

◇ E\_TAN = rign, [R]  
Valeur de la raideur surfacique tangentielle.

### 3.4 Mot clé facteur CABLE

Définition des caractéristiques élastiques non linéaires, constantes, pour les câbles : deux comportements élastiques différents en traction et en compression, définis par les modules d'Young  $E$  et  $EC$  (module en compression).

#### 3.4.1 Syntaxe

```

/ CABLE = _F (
    ◆ E = yg, [R]
    ◇ EC_SUR_E = / ecse, [R]
                  / 1.D-4, [DEFAULT]
    ◇ RHO = rho, [R]
    ◇ ALPHA = dil, [R]
    ◇ AMOR_ALPHA = α, [R]
    ◇ AMOR_BETA = β, [R]
    )

```

#### 3.4.2 Opérands d'élasticité

◆ E = yg

Module d'Young à la traction. La rigidité longitudinale du câble est égale à  $E \cdot A$  : produit du module d'Young par l'aire de la section droite (définie dans AFPE\_CARA\_ELEM).

◇ 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.

### 3.4.3 Opérande de masse

- ◇ RHO = rho  
Masse volumique.

### 3.4.4 Opérande de dilatation

- ◇ ALPHA = dil  
Coefficient de dilatation thermique moyen par rapport à la température de référence définie sous AFPE\_MATERIAU.

### 3.4.5 Opérandes d'amortissement

- ◇ AMOR\_ALPHA =  $\alpha$
- ◇ AMOR\_BETA =  $\beta$

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 au document modélisation de l'amortissement mécanique [U2.06.03].

## 3.5 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).

### 3.5.1 Syntaxe

```

/ ELAS_ORTH = _F (
    ♦ E_L      =      ygl ,      [R]
    ♦ E_T      =      ygt ,      [R]
    ◇ E_N      =      ygn ,      [R]
    ♦ G_LT     =      glt ,      [R]
    ◇ G_TN     =      gtn ,      [R]
    ◇ G_LN     =      gln ,      [R]
    ♦ NU_LT    =      nult ,      [R]
    ◇ NU_TN    =      nutn ,      [R]
    ◇ NU_LN    =      nuln ,      [R]
    ◇ ALPHA_L  =      / dil ,      [R]
                                / 0.0 ,      [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]
)
/ 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 =      / ε ,      [R]
                                / 1. ,      [DEFAULT]
)

```

### 3.5.2 Opérandes d'élasticité

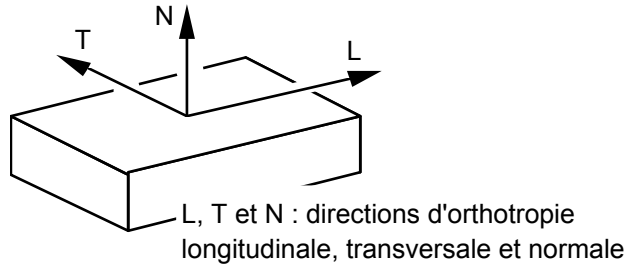
Le lecteur pourra se reporter aux documentations suivantes :

[U4.42.03] *DEFI\_COQU\_MULT*

[U4.42.01] *AFFE\_CARA\_ELEM*

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

- ◆  $E_L = ygl$  Module d'Young longitudinal.



- ◆  $E_T = ygt$  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 :  $nutl = \frac{ygt}{ygl} * nult$*

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

*si l'on exerce une traction selon l'axe  $L$  donnant lieu à une déformation selon cet axe égale à*

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

*Les différents coefficients d'élasticité  $E_L$ ,  $G_{LN}$  et  $NU_{LN}$  ne peuvent pas être choisis de façon quelconque : physiquement, il faut toujours qu'une déformation non nulle provoque une énergie de déformation strictement positive. Cela se traduit par le fait que la matrice de Hooke doit être définie positive. L'opérateur *DEFI\_MATERIAU* calcule les valeurs propres de cette matrice et émet une alarme si cette propriété n'est pas vérifiée.*

*Pour les modèles 2D, comme l'utilisateur n'a pas encore choisi sa *MODELISATION* (*D\_PLAN*, *C\_PLAN*, ...), on vérifie la positivité de la matrice dans les différents cas de figure.*

◇ NU\_TN = nutn Coefficient de Poisson dans le plan TN.

◇ NU\_LN = nuln Coefficient de Poisson dans le plan LN.

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

$$\text{nunt} = \frac{\text{ygt}}{\text{ygn}} * \text{nutn}$$

$$\text{nunl} = \frac{\text{ygl}}{\text{ygn}} * \text{nuln}$$

### 3.5.3 Opérande RHO

◇ RHO = rho  
Masse volumique.

### 3.5.4 Opérandes 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.

### 3.5.5 Opérandes TEMP\_DEF\_ALPHA / PRECISION

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

### 3.5.6 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.



### 3.6 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).

#### 3.6.1 Syntaxe

```
/  ELAS_ISTR = _F (  ♦  E_L      =  ygl ,      [R]
                      ♦  E_N      =  ygn ,      [R]
                      ♦  G_LN     =  gln ,      [R]
                      ♦  NU_LT    =  nult ,     [R]
                      ♦  NU_LN    =  nuln ,     [R]
                      ◇  ALPHA_L  =  / dil ,     [R]
                                   / 0.0 ,     [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 = /  ε ,      [R]
                                   /  1. ,     [DEFAULT]
                      )
```

### 3.6.2 Opérands d'élasticité

Le lecteur pourra se reporter aux documentations suivantes :

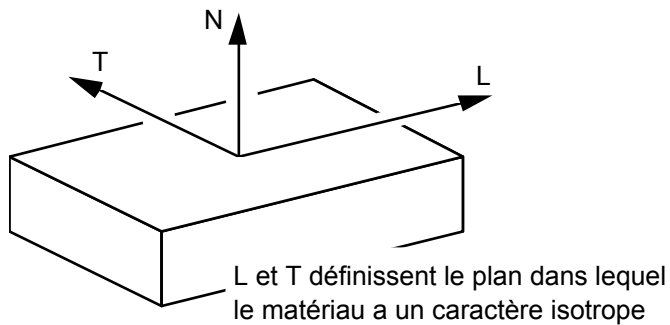
[U4.42.03] DEFI\_COQU\_MULT

[U4.42.01] AFFE\_CARA\_ELEM

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.



- ♦  $E_L = y_{gl}$   
Module d'Young dans le plan LT.
- ♦  $E_N = y_{gn}$   
Module d'Young normal.
- ♦  $GL_N = g_{ln}$   
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  $g_{lt} = \frac{y_{gl}}{2(1+\nu_{lt})}$ .

- ♦  $NU_{LT} = \nu_{lt}$   
Coefficient de Poisson dans le plan LT.
- ♦  $NU_{LN} = \nu_{ln}$   
Coefficient de Poisson dans le plan LN.

**Remarques importantes :**

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

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

*nult* 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  $\varepsilon_N = \frac{\sigma_N}{\text{ygn}}$ , on a une compression selon l'axe L égale à :  $\text{nuln} * \frac{\sigma_N}{\text{ygn}}$ .

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.

**3.6.3 Opérande RHO**

- ◇ *RHO* = *rho*  
Masse volumique.

**3.6.4 Opérandes ALPHA\_L / ALPHA\_N**

- ◇ *ALPHA\_L* = *dil*  
Coefficient de dilatation thermique moyen dans le plan LT.
- ◇ *ALPHA\_N* = *din*  
Coefficient de dilatation thermique moyen normal.

**3.6.5 Opérandes TEMP\_DEF\_ALPHA / PRECISION**

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

### 3.7 Mot clés facteur ELAS\_COQUE / ELAS\_COQUE\_FO

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

#### 3.7.1 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 = 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 :

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

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 :

$$\begin{array}{lll} \text{Membrane :} & \text{Flexion :} & \text{Cisaillement :} \\ \mathbf{C} = \begin{vmatrix} C_{1111} & C_{1122} & 0 \\ C_{1122} & C_{2222} & 0 \\ 0 & 0 & C_{1212} \end{vmatrix} & \mathbf{D} = \begin{vmatrix} D_{1111} & D_{1122} & 0 \\ D_{1122} & D_{2222} & 0 \\ 0 & 0 & D_{1212} \end{vmatrix} & \mathbf{G} = \begin{vmatrix} G_{11} & 0 \\ 0 & G_{22} \end{vmatrix} \end{array}$$

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  $G_{11}$  et  $G_{22}$ . 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 :

$$\begin{array}{lll} \text{Membrane :} & \text{Flexion :} & \text{Membrane - flexion :} \\ \mathbf{HM} = \begin{vmatrix} H_{1111} & H_{1122} & H_{1112} \\ 0 & H_{2222} & H_{2212} \\ 0 & 0 & H_{1212} \end{vmatrix} & \mathbf{HF} = \begin{vmatrix} A_{1111} & A_{1122} & A_{1112} \\ 0 & A_{2222} & A_{2212} \\ 0 & 0 & A_{1212} \end{vmatrix} & \mathbf{HMF} = \begin{vmatrix} B_{1111} & B_{1122} & B_{1112} \\ 0 & B_{2222} & B_{2212} \\ 0 & 0 & B_{1212} \end{vmatrix} \end{array}$$

$$\begin{array}{lll} \text{Membrane cisaillement :} & \text{Flexion - cisaillement :} & \text{Cisaillement :} \\ \mathbf{HMC} = \begin{vmatrix} E_{1113} & E_{1123} \\ E_{2213} & E_{2223} \\ E_{1213} & E_{1223} \end{vmatrix} & \mathbf{HFC} = \begin{vmatrix} F_{1113} & F_{1123} \\ F_{2213} & F_{2223} \\ F_{1213} & F_{1223} \end{vmatrix} & \mathbf{HC} = \begin{vmatrix} G_{1313} & G_{1323} \\ G_{1323} & G_{2323} \end{vmatrix} \end{array}$$

## 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  $\varepsilon$  (on vérifie que le concept fonction dépend bien des seuls paramètres  $\text{EPSI}$  et éventuellement  $\text{TEMP}$ ).

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

**Remarque :**

Pour les matériaux multiphasés, les caractéristiques d'écrouissage se définissent par META ECRO LINE ou META TRACTION.

## 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

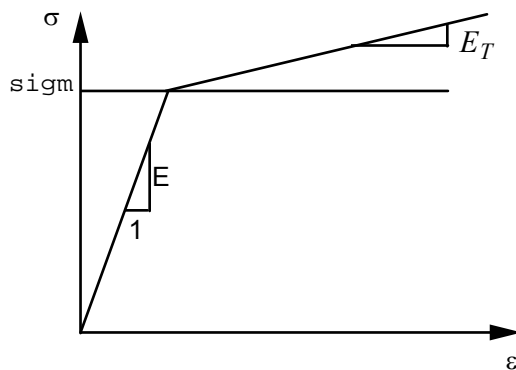
```

|      ECRO_LINE = _F (      ◆ D_SIGM_EPSI = dsde      ,      [R]
|                           ◆ SY =                  sigm      ,      [R]
|                           )
|      ECRO_LINE_FO =_F (      ◆ D_SIGM_EPSI = dsde      ,      [fonction**]
|                           ◆ SY =                  sigm      ,      [fonction**]
|                           )

```

### 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 :

$$R(p) = \sigma_y + H_p$$

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

Il faut donc respecter :  $E_T < E$

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 Mot clé CHABOCHE

Comportement du modèle de Chaboche décrit dans le document [R5.03.04].

Brièvement ces relations sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} (\sigma - X_1 - X_2)_{eq} - R(p) \leq 0 \\ \dot{\varepsilon}^p = \frac{3}{2} \dot{p} \frac{(\tilde{\sigma} - X_1 - X_2)}{(\tilde{\sigma} - X_1 - X_2)_{eq}} \\ \dot{X}_i = C_i \left( \frac{2}{3} a_i \phi(p) \dot{\varepsilon}^p - X_i \dot{p} \right) \end{array} \right. \quad \text{éq 4.4-1}$$

avec :

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

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

et des relations classiques de la plasticité.

### Remarque :

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

Ce modèle ne permet pas de prendre en compte la variation des coefficients avec la température.

Pour ce faire, il faut utiliser VMIS\_CIN1\_CHAB\_FO ou VMIS\_CIN2\_CHAB\_FO.

### 4.4.1 Syntaxe

```
| / CHABOCHE = _F ( ♦ R_I = Rinfi, [R]
                    ♦ R_0 = Rzero, [R]
                    ♦ B = b, [R]
                    ♦ K = k, [R]
                    ♦ W = w, [R]
                    ♦ A1 = a1, [R]
                    ♦ A2 = a2, [R]
                    ♦ C1 = C1, [R]
                    ♦ C2 = C2, [R]
                    )
```



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

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

Brièvement ces relations sont :

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

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

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

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

$$X = \frac{2}{3} C(p) \alpha ,$$

$$\dot{\alpha} = \dot{\epsilon}^p - \gamma(p) \alpha \dot{p} \quad \text{éq 4.5-3}$$

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

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

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

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

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 prenne 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, (défaut : 0.) [R] ou [fonction**]
  ♦ C_I = C_I, [R] ou [fonction**]
  ♦ K = k, (défaut : 1.) [R] ou [fonction**]
  ♦ W = w, (défaut : 0.) [R] ou [fonction**]
  ♦ G_0 = G_0, [R] ou [fonction**]
  ♦ A_I = A_I, (défaut : 0.) [R] ou [fonction**]
)
```

Remarque :

Une version viscoplastique du modèle de Chaboche à une véritable cinématique 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 (nouvelle version à deux variables cinématiques) décrit dans le document [R5.03.04].

Brièvement ces relations sont :

$$F(\boldsymbol{\sigma}, R, \mathbf{X}) = (\tilde{\boldsymbol{\sigma}} - \mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2)_{eq} - R(p)$$

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \frac{3}{2} \dot{\lambda} \frac{\tilde{\boldsymbol{\sigma}} - \mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2}{(\tilde{\boldsymbol{\sigma}} - \mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2)_{eq}}$$

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

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

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_1 &= \frac{2}{3} C_1(p) \boldsymbol{\alpha}_1, \\ \mathbf{X}_2 &= \frac{2}{3} C_2(p) \boldsymbol{\alpha}_2, \\ \dot{\boldsymbol{\alpha}}_1 &= \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p - \gamma_1(p) \boldsymbol{\alpha}_1 \dot{p} \\ \dot{\boldsymbol{\alpha}}_2 &= \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p - \gamma_2(p) \boldsymbol{\alpha}_2 \dot{p} \end{aligned} \quad \text{éq 4.6-3}$$

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

$$\begin{aligned} R(p) &= R_\infty + (R_0 - R_\infty) e^{-bp} \\ C_1(p) &= C_1^\infty (1 + (k-1) e^{-wp}) \\ C_2(p) &= C_2^\infty (1 + (k-1) e^{-wp}) \\ \gamma_1(p) &= \gamma_1^0 (a_\infty + (1-a_\infty) e^{-bp}) \\ \gamma_2(p) &= \gamma_2^0 (a_\infty + (1-a_\infty) e^{-bp}) \end{aligned}$$

### Remarque :

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

La définition de  $\mathbf{X}_1$  et  $\mathbf{X}_2$  sous la forme [éq 4.5-3] permet de garder une formulation qui prenne 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, (défaut : 0.) [R] ou [fonction**]
    ♦ C1_I = C1_I, [R] ou [fonction**]
    ♦ C2_I = C2_I, [R] ou [fonction**]
    ◇ K = k, (défaut : 1.) [R] ou [fonction**]
    ◇ W = w, (défaut : 0.) [R] ou [fonction**]
    ♦ G1_0 = G1_0, [R] ou [fonction**]
    ♦ G2_0 = G2_0, [R] ou [fonction**]
    ◇ A_I = A_I, (défaut : 0.) [R] ou [fonction**]
)
```

### 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 facteur TAHERI / TAHERI\_FO

Définition des coefficients du modèle de comportement d'élastoplasticité cyclique de Saïd Taheri [R5.03.05].

Brièvement nous avons à résoudre, pour un incrément élastoplastique :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\varepsilon}_p = \frac{3}{2} \dot{p} \frac{\tilde{\sigma} - X}{(\tilde{\sigma} - X)_{eq}} \\ \sigma = \Lambda (\varepsilon - \varepsilon_p) \\ (\sigma - X)_{eq} - R = 0 \\ \dot{\sigma}_p - \dot{R} - \dot{\overline{X}}_{eq} = 0 \\ \dot{\varepsilon}_p^n = 0 \end{array} \right. \quad \text{avec } (x)_{eq} = \left( \frac{3}{2} x^T x \right)^{1/2}$$

$$\begin{array}{l} R = D \left( A \|\varepsilon\|^\alpha + R_0 \right) \\ X = C \left( S \varepsilon_p - \sigma_p \varepsilon_p^n \right) \\ \sigma_p = \text{Max}_t \left( X_{eq} + R \right) \\ D = 1 - m e^{-bp \left( 1 - \frac{\sigma_p}{S} \right)} \\ C = C_\infty + C_1 e^{-bp \left( 1 - \frac{\sigma_p}{S} \right)} \end{array}$$

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

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

## 4.7.1 Syntaxe

```

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

## 4.8 Mots clés OHNO / OHNO\_FO

Définitions des coefficients du modèle élasto-plastique proposé par Ohno et Wang pour décrire les phénomènes de déformation progressive (rochet) sous chargements cycliques [R5.03.07].

Brièvement les relations de comportement sont :

$$\begin{cases}
 (\sigma - X)_{eq} - R(p) \leq 0 \\
 \dot{\varepsilon}^p = \frac{3}{2} \dot{p} \frac{(\tilde{\sigma} - X)}{(\tilde{\sigma} - X)_{eq}} \\
 X = \sum_{i=1}^5 X_i \\
 \dot{X}_i = \frac{2}{3} C_i \dot{\varepsilon}^p - \gamma_i \phi(p) \left[ \frac{(X_i)_{eq}}{I_i} \right]^{m_i} < \dot{\varepsilon}^p : k_i > X_i \text{ avec } (i = 1, 5)
 \end{cases}$$

avec :

$$\begin{cases}
 R(p) = R_\infty + (R_0 - R_\infty) e^{-bp} \\
 \phi(p) = \phi_\infty + (1 - \phi_\infty) e^{-bp} \\
 I_i = \frac{C_i}{\gamma_i \phi(p)} \\
 k_i = \frac{X_i}{(X_i)_{eq}}
 \end{cases}$$

## Remarque :

$\tilde{\sigma}$  représente le déviateur des contraintes et  $( )_{eq}$  l'équivalent au sens de Von Mises,  $\langle . \rangle$  les crochets de Mc Cawley ( $\langle x \rangle = x$  si  $x \geq 0$ , 0 sinon).

Les différents paramètres du matériau  $R_0, R_\infty, \varphi_\infty, b, C_i, \gamma_i, m_i$  ( $i = 1, \dots, 5$ ) peuvent dépendre de la température ; dans ce cas on emploiera le mot clé *OHNO\_FO*.

## 4.8.1 Syntaxe

```
| / OHNO :
/ OHNO_FO : (
    ♦ R_0 : R0 [R] ou [fonction**]
    ♦ R_I : Rinf [R] ou [fonction**]
    ♦ PHI : phi_inf [R] ou [fonction**]
    ♦ B : b [R] ou [fonction**]
    ♦ A1 : C1 [R] ou [fonction**]
    ♦ A2 : C2 [R] ou [fonction**]
    ♦ A3 : C3 [R] ou [fonction**]
    ♦ A4 : C4 [R] ou [fonction**]
    ♦ A5 : C5 [R] ou [fonction**]
    ♦ GAMMA1 : g1 [R] ou [fonction**]
    ♦ GAMMA2 : g2 [R] ou [fonction**]
    ♦ GAMMA3 : g3 [R] ou [fonction**]
    ♦ GAMMA4 : g4 [R] ou [fonction**]
    ♦ GAMMA5 : g5 [R] ou [fonction**]
    ♦ M1 : m1 [R] ou [fonction**]
    ♦ M2 : m2 [R] ou [fonction**]
    ♦ M3 : m3 [R] ou [fonction**]
    ♦ M4 : m4 [R] ou [fonction**]
    ♦ M5 : m5 [R] ou [fonction**]
)
```

## 4.9 Mot clé facteur POLY\_CFC / POLY\_CFC\_FO

Définition des coefficients du modèle de comportement polycristallin de l'Ecole des Mines de Paris [R5.03.13]. En plus de ces caractéristiques, les constantes élastiques doivent être définies sous le mot clé ELAS par les coefficients réels ou ELAS\_FO par les coefficients dépendant de la température.

**Comportement global : définition des déformations à l'échelle des points de Gauss**

$$E_{ij} = E_{ij}^e + E_{ij}^{th} + E_{ij}^{vp} \quad E_{ij}^{vp} = \sum_g f_g \varepsilon_{ij}^{vp_g} \quad f_g : \text{proportion de graine d'orientation "g"}$$

**Comportement intragranulaire :**

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp_g} = \sum_{s \in g} m_{ij}^s \dot{\gamma}^s \quad m_{ij}^s = \frac{1}{2} (n_i \otimes l_j + l_j \otimes n_i)$$

$$\dot{p}^s = |\dot{\gamma}^s| = \left\langle \frac{F^s}{k} \right\rangle^n \quad \text{avec } \langle x \rangle = 0 \text{ si } x < 0 \text{ et } \langle x \rangle = x \text{ si } x > 0$$

Critère :

$$F^s = \left| \tau^s - X^s \right| - \tau_0 - R^s + \frac{1}{2} \frac{c}{d} (x^s)^2$$

$$\tau^s = \sigma_{ij}^g : m_{ij}^s$$

$$X^s = c \alpha^s + a \gamma^s = x^s + a \gamma^s$$

$$\dot{\alpha}^s = \dot{\gamma}^s - d \alpha^s \dot{p}^s$$

$$R^s = Q_1 \left( \sum_{r \in s} h_{rs} q^{1s} \right) + Q_2 q^{2s}$$

$$\dot{q}^{is} = b_i (1 - q^{is}) \dot{p}^s \quad (i=1,2)$$

$$h_{rs} = h(1 - \delta_{rs}) + \delta_{rs} \quad \text{avec } \delta_{rs} = 1 \text{ si } r = s \text{ et } \delta_{rs} = 0 \text{ si } r \neq s$$

**Relations de changement d'échelle**

$$\sigma_{ij}^g = \sum_{ij} ij + \mu (B_{ij} - \beta_{ij}^g) \quad \left( \mu = \frac{1}{2} \frac{E}{1 + \nu} \right)$$

$$B_{ij} = \sum_g f_g \beta_{ij}^g \quad \dot{\beta}_{ij}^g = \dot{\varepsilon}_{ij}^{vp_g} - D \left( \beta_{ij}^g - \delta \varepsilon_{ij}^{vp_g} \right) \left\| \dot{\varepsilon}_{ij}^{vp_g} \right\|$$

où les différents paramètres du matériau sont :  $D, \delta, n, k, \tau_0, Q_1, b_1, h, Q_2, b_2, c, d, a$ . Les différents paramètres peuvent dépendre de la température, dans ce cas on emploiera le mot clé POLY\_CFC\_FO.

### 4.9.1 Syntaxe

Le modèle est accessible 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. L'ensemble des paramètres du modèle est fourni sous le mot-clé facteur POLY\_CFC ou POLY\_CFC\_FO :

```
/  POLY_CFC = _F (  ◇  DL      =  D,                [R]
                   ◇  DA      =  delta,          [R]
                   ◆  N       =  n,                [R]
                   ◆  K       =  k,                [R]
                   ◆  TAU_0   =  tau0,            [R]
                   ◆  Q1      =  Q1,                [R]
                   ◆  B1      =  b1,                [R]
                   ◆  HL      =  h,                [R]
                   ◆  Q2      =  Q2,                [R]
                   ◆  B2      =  b2,                [R]
                   ◆  C1      =  c,                [R]
                   ◆  D1      =  d,                [R]
                   ◆  C2      =  a,                [R]
                   )

/  POLY_CFC_FO = _F (  ◇  DL      =  D,                [fonction**]
                     ◇  DA      =  delta,          [fonction**]
                     ◆  N       =  n,                [fonction**]
                     ◆  K       =  k,                [fonction**]
                     ◆  TAU_0   =  tau0,            [fonction**]
                     ◆  Q1      =  Q1,                [fonction**]
                     ◆  B1      =  b1,                [fonction**]
                     ◆  HL      =  h,                [fonction**]
                     ◆  Q2      =  Q2,                [fonction**]
                     ◆  B2      =  b2,                [fonction**]
                     ◆  C1      =  c,                [fonction**]
                     ◆  D1      =  d,                [fonction**]
                     ◆  C2      =  a,                [fonction**]
                     )
```

#### 4.10 Mots clés VISCOCHAB / VISCOCHAB\_FO

Définitions des coefficients du modèle élastoviscoplastique de Chaboche [R5.03.04].

Brièvement, les équations constitutives du modèle sont :

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

**Taux de déformation viscoplastique**

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

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

**Ecroissance isotrope**

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

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

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

$$\begin{cases} \dot{q} = \eta \times H(F) \times \langle \mathbf{n} : \mathbf{n} \rangle \dot{p} \\ \dot{\xi} = \sqrt{3/2} (1 - \eta) \times H(F) \times \langle \mathbf{n} : \mathbf{n} \rangle \dot{p} \mathbf{n}^* \end{cases}$$

$$\text{avec : } \mathbf{n} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{X}}{J_2(\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{X})} ; \mathbf{n}^* = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\boldsymbol{\varepsilon}^p - \xi}{J_2(\boldsymbol{\varepsilon}^p - \xi)}$$

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

**Ecroissance cinématique**  $\mathbf{X} = \mathbf{X}_1 + \mathbf{X}_2$

$$\dot{\mathbf{X}}_i = 2/3 C_i \dot{\varepsilon}^p - \gamma_i [\delta_i \mathbf{X}_i + (1 - \delta_i)(\mathbf{X}_i : \mathbf{n})\mathbf{n}] \dot{p} - \gamma_{Xi} [\mathbf{J}_2(\mathbf{X}_i)]^{m_i-1} \mathbf{X}_i + \frac{1}{C_i} \frac{\partial C_i}{\partial T} X_i \dot{T}$$

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



## Remarques :

- $\tilde{\sigma}$  représente le déviateur des contraintes,  $J_2(Y) = \sqrt{\frac{3}{2}(Y : Y)}$  le deuxième invariant du tenseur  $Y$ ,
- $H(F)$  la fonction d'Heavyside et  $\langle . \rangle$  les crochets de Mc Cawley ( $\langle x \rangle = x$  si  $x \geq 0$ , 0 sinon).
- Les variables  $q$  et  $\xi$  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.

## 4.10.1 Syntaxe

```

◇ / VISCOCHAB :
  / VISCOCHAB_FO : (
    ◆ 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**]
  )

```

## 4.11 Mots clés facteur LEMAITRE / LEMAITRE\_FO

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

Les équations sont les suivantes :

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

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]
                   )

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

```

N :           n  
UN\_SUR\_K :    1/K  
UN\_SUR\_M :    1/m

Dans le cas où l'on souhaite que le comportement dépende de la fluence (description du comportement des assemblages combustibles par ASSE\_COMBU dans STAT\_NON\_LINE), il faut renseigner aussi les deux mots-clés GRAN\_IRRA et FLU\_IRRA (cf. [§11] de ce document).

#### 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 viscoélasticité non-linéaire de Norton.

## 4.12 Mot clé facteur ZIRC\_CYRA2

Définition des coefficients de la relation de viscoélasticité non-linéaire du Zircaloy utilisée dans le code CYRANO3. Cette relation correspond à un essai de fluage unidimensionnel, à contrainte constante, qui fait intervenir le temps écoulé depuis l'instant où l'on applique la contrainte. La généralisation 3D et une formulation éliminant le temps ont été introduites dans *Code\_Aster* (cf. [R5.03.08]).

La formulation est la suivante :

$$\varepsilon_v = A e^{\frac{K}{T_{rec} + T_0}} \left[ \left( \varepsilon_{fab} f_1(t) + t \right) g_1(\sigma) h_1(T) + \left( \varepsilon_{fab} f_2(t) + t \right) g_2(\sigma) \Phi \right]$$

avec  $t$  le temps en heures,  $T$  la température (en °C) du point considéré et  $\sigma$  la contrainte (en MPa), ce qui impose que le maillage soit en millimètre.

et où  $A, K, T_0$  et  $f_1, g_1, h_1, f_2, g_2$  sont respectivement des constantes et des fonctions figées et définies une fois pour toutes dans le code, où les seuls coefficients à introduire sont :

$T_{rec}$  : température de recuit (°C)

$\varepsilon_{fab}$  : déformation de fluage mesurée après un test de fluage biaxé à (400°C, 100MPa, 250 heures)

$\Phi$  : flux neutronique (neutrons / cm<sup>2</sup> / s)

### Remarque :

Les effets de dilatation thermique isotrope peuvent être pris en compte si les paramètres d'élasticité ont été définis sous le mot clé *ELAS* ou *ELAS\_FO*.

### 4.12.1 Syntaxe

```
/ ZIRC_CYRA2 = _F ( ♦ EPSI_FAB      = efab ,           [R]
                    ♦ TEMP_RECUIT   = Trec ,           [R]
                    ♦ FLUX_PHI      = phi ,           [R]
                    )
```

## 4.13 Mot clé facteur ZIRC\_EPRI

Définition des coefficients de la relation de viscoélasticité non-linéaire du Zircaloy utilisée dans le programme ESCORE de l'EPRI. Cette relation correspond à un essai de fluage unidimensionnel, à contrainte constante, et qui fait intervenir le temps écoulé depuis l'instant où l'on applique la contrainte. La généralisation 3D et une formulation éliminant le temps ont été introduites dans le *Code\_Aster* (cf. [R5.03.08]).

La formulation est la suivante :

$$\varepsilon_v = f_3(t) g_3(\sigma) h_3(T) (R_p)^a + f_4(t) g_4(\sigma) h_4(T) (R_p)^b \Phi^c (\cos \theta_{\max})^d$$

avec  $t$  le temps en heures,  $T$  la température (en °C) du point considéré et  $\sigma$  la contrainte (en MPa).

et où  $a, b, c, d$  et  $f_3, g_3, h_3, f_4, g_4, h_4$  sont respectivement des constantes et des fonctions figées et définies une fois pour toutes dans le code, où les coefficients à introduire sont :

$R_p$  : la limite élastique (MPa)

$\theta_{\max}$  : l'angle du plan de base des cristaux avec une direction radiale à la gaine (rad) tel que

$$0 \leq \theta_{\max} < \frac{\pi}{2}$$

$\Phi$  : flux neutronique (neutrons / cm<sup>2</sup> / s)

**Remarque :**

Les effets de dilatation thermique isotrope peuvent être pris en compte si les paramètres d'élasticité ont été définis sous le mot clé ELAS ou ELAS\_FO.

**4.13.1 Syntaxe**

```

/   ZIRC_EPRI =_F (   ♦   FLUX_PHI   = phi,           [R]
                        ♦   R_P         = Rp,           [R]
                        ♦   THETA_MAX   = theta_max,     [R]
                      )

```

**4.14 Mot clé facteur VISC\_IRRA\_LOG**

Définition d'une loi de fluage axial 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 :

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

$\varepsilon_f$  : déformation axiale de fluage  
 $Q$  : énergie d'activation  
 $T$  : température d'activation (en °K)  
 $\sigma$  : contrainte axiale appliquée au tube guide  
 $\phi t$  : flux neutronique ( $10^{+20}$  neutrons / cm<sup>2</sup>)  
 $\omega$  : 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 Mots clés facteur LMARC / LMARC\_FO

Ce comportement est rendu inactif dans la version 6.4 du code, les paramètres demeurent néanmoins accessibles dans la commande *DEFI\_MATERIAU* car utilisés par le comportement *ASSE\_COMBU* de *STAT\_NON\_LINE*.

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 :

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

$$\text{avec : } Y(v) = Y_\infty + (Y_0 - Y_\infty) e^{bv} \quad |\mathbf{X}| = \sqrt{\frac{3}{2}} \mathbf{X}^t \mathbf{N} \mathbf{X}$$

Remarque :

$\tilde{\boldsymbol{\sigma}}$  représente le déviateur des contraintes et  $|\tilde{\boldsymbol{\sigma}} - \mathbf{X}|$  l'équivalent au sens de Hill.

Les matrices  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{N}$ ,  $\mathbf{R}$  et  $\mathbf{Q}$  permettent de décrire l'anisotropie de comportement viscoplastique.

##### 4.15.1 Syntaxe

```

/ LMARC =
/ LMARC_FO = _F (
    ♦ R_0      = R0      , [R] ou [fonction**]
    ♦ DE_0     = eps0    , [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**]
)

```

## 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]).

Brièvement, on résout pour un incrément élastoplastique :

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

$$\text{avec } \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial f}{\partial \sigma} = \frac{1}{\rho} \left( \frac{3}{2} \frac{\tilde{\sigma}}{\sigma_{eq}} + \frac{Df}{3} \exp\left(\frac{\sigma_H}{\sigma_1\rho}\right) \right) \\ \rho = \frac{1-f}{1-f_0} \\ R(p) \text{ entrée par l'intermédiaire de la courbe de traction (mot clé TRACTION)} \\ \mathbf{I} \text{ matrice identité} \end{array} \right. \quad \text{éq 5.1-2}$$

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 modifier le modèle de la façon suivante :

- introduction d'une 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  $A$ .

- introduction d'une 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  $\lambda$ .

- introduction d'un taux de germination volumique de fissures de clivages  $A_n$ , modifiant comme suit les équations [éq 5.1-1] et [éq 5.1-2].

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

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
$A$	PORO_ACCE
$A_n$	AN
$f_l$	PORO_LIMI
$\lambda$	D_SIGM_EPSI_NORM

## 5.1.1 Syntaxe

```
| / ROUSSELIER = _F (
    ♦ D = D , [R]
    ♦ SIGM_1 =  $\sigma_1$  , [R]
    ♦ PORO_INIT = f0 , [R]
    ◇ PORO_CRIT = / 1.D0 , [DEFAULT]
                  / fc , [R]
    ◇ PORO_ACCE = / 1.D0 , [DEFAULT]
                  / A , [R]
    ◇ AN = / 0.D0 , [DEFAULT]
           / An ,
    ◇ PORO_LIMI = / 0.999 , [DEFAULT]
                  / fl , [R]
    ◇ D_SIGM_EPSI_NORM = / 1.D0 , [DEFAULT]
                          /  $\lambda$  , [R]
)

/ ROUSSELIER_FO = _F (
    ♦ D = D , [fonction**]
    ♦ SIGM_1 =  $\sigma_1$  , [fonction**]
    ♦ PORO_INIT = f0 , [fonction**]
    ◇ PORO_CRIT = /1.D0 , [DEFAULT]
                  /fc , [R]
    ◇ PORO_ACCE = /1.D0 , [DEFAULT]
                  /A , [R]
    ◇ AN = / 0.D0 , [DEFAULT]
           / An ,
    ◇ PORO_LIMI = /0.999 , [DEFAULT]
                  /fl , [R]
    ◇ D_SIGM_EPSI_NORM = /1.D0 , [DEFAULT]
                          /  $\lambda$  , [R]
)
```

## 5.2 Mot clé facteur ROUSS\_VISC

Définition des coefficients de l'extension à la viscoplasticité du modèle de ROUSSELIER.

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

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

expression dans laquelle  $\langle x \rangle$  désigne la partie positive de  $x$  et  $\Phi_p$  le seuil plastique du modèle de ROUSSELIER :

$$\Phi_p = \frac{\sigma_{eq}}{\rho} - R(p) + D\sigma_1 f_0 e^{\beta} e^{\frac{\sigma_H}{\sigma_1 \rho}} \rho$$

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

### 5.2.1 Syntaxe

```
/ ROUSS_VISC = _F (
    ♦ M          =      m      ,           [R]
    ♦ EPSI_0     =      ε0     ,           [R]
    ♦ SIGM_0     =      σ0     ,           [R]
    )
```



## 5.3 Mots clés VENDO\_CHAB / VENDO\_CHAB\_FO

Définition des coefficients de la loi de comportement viscoplastique avec endommagement de Chaboche (en fait loi de comportement viscoplastique à écrouissage-viscosité multiplicatif couplé à de l'endommagement isotrope, modèle développé par Chaboche cf. [R5.03.15]).

Brièvement, les relations sont :

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

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

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

où :

$J_0(\underline{\underline{\sigma}})$  est la contrainte principale maximale

$$J_1(\underline{\underline{\sigma}}) = Tr(\underline{\underline{\sigma}})$$

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

$\langle x \rangle$  : partie positive de  $x$

**Remarque :**

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

### 5.3.1 Syntaxe

```
| / VENDO_CHAB :
| / VENDO_CHAB_FO : ( ♦ S_VP : [R] ou [fonction**]
                        ♦ SEDVP1 : [R] ou [fonction**]
                        ♦ SEDVP2 : [R] ou [fonction**]
                        ♦ N_VP : [R] ou [fonction**]
                        ♦ M_VP : [R] ou [fonction**]
                        ♦ K_VP : [R] ou [fonction**]
                        ♦ A_D : [R] ou [fonction**]
                        ♦ R_D : [R] ou [fonction**]
                        ♦ K_D : [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_VP'
Coefficient 1 de la contrainte équivalente de fluage	$\alpha$	'SEDVP1'
Coefficient 2 de la contrainte équivalente de fluage	$\beta$	'SEDVP2'
Premier exposant de la loi viscoplastique	$N$	'N_VP'
Deuxième exposant de la loi viscoplastique	$M$	'M_VP'
Coefficient de la loi viscoplastique	$K$	'K_VP'
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 :

- '*\_VP*' : coefficient intervenant dans une équation du comportement viscoplastique
- '*\_D*' : coefficient intervenant dans une équation du comportement d'endommagement
- '*SEDVP*' :  $\sigma$  (Sigma) Equivalent en Dommage ViscoPlastique.

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  $\chi(\sigma)$  en 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.

## 5.4 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 [U4.32.01] et le fascicule [R5.04].

### 5.4.1 Syntaxe

```
◇ NON_LOCAL          = _F (
  ◆ LONG_CARA         = long,
  ◇ COEF_RIGI_MINI    = coef,
)
```

### 5.4.2 Opérandes **LONG\_CARA** / **COEF\_RIGI\_MINI**

**LONG\_CARA** :

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

**COEF\_RIGI\_MINI**

A quant à lui un rôle algorithmique puisqu'il fixe, pour les modèles d'endommagement qui dégrade la rigidité du matériau, la proportion de la rigidité initiale ie du 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.

## 5.5 Mot clé facteur **RUPT\_FRAG**

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**.

Les éléments joints utilisent l'opérande **GC** et les opérandes **SIGM\_C** et **SAUT\_C** dans le cadre de la loi de comportement **BARENBLATT**.

### 5.5.1 Syntaxe

```
◇ RUPT_FRAG          = _F (
  ◆ GC                = gc ,                               [R]
  ◇ SIGM_C            = sigm,                               [R]
  ◇ SAUT_C            = sautc,                               [R]
)
```

### 5.5.2 Opérande **RUPT\_FRAG**

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

### 5.5.3 Opérande **SIGM\_C**

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

### 5.5.4 Opérande **SAUT\_C**

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

**Remarque :**

*Les paramètres **SIGM\_C** et **SAUT\_C** 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.*

## 5.6 Mot clé facteur CORR\_ACIER

La loi COOR\_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].

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

### 5.6.1 Syntaxe

```

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

```

### 5.6.2 Opérande D\_CORR

Coefficient d'endommagement critique.

### 5.6.3 Opérandes ECRO\_K, ECRO\_M

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

### 5.6.4 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 = λ , [R]
                )
/ THER_FO = _F ( ◇ RHO_CP = cp , [fonction+]
                 ◆ LAMBDA = λ , [fonction+]
                 )
```

#### 6.1.2 Opérandes LAMBDA / RHO\_CP

◆ LAMBDA = λ

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

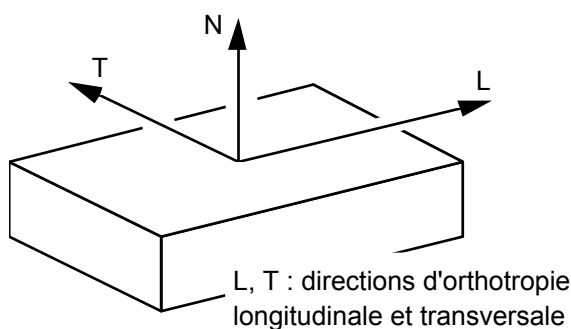
Définition des caractéristiques thermiques pour un matériau orthotrope.

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 = la1 , [R]
                   ◆ LAMBDA_T = lat , [R]
                   ◇ LAMBDA_N = lan , [R]
                   )
```

## 6.2.2 Opérandes LAMBDA / RHO\_CP

- ♦ LAMBDA\_L = *lal*  
Conductivité thermique dans le sens longitudinal.
- ♦ LAMBDA\_T = *lat*  
Conductivité thermique dans le sens transversal.
- ♦ LAMBDA\_N = *lan*  
Conductivité thermique dans le sens normal.
- ♦ RHO\_CP = *cp*  
Chaleur volumique.

## 6.3 Mot clé facteur THER\_NL (cf. [R5.02.02])

Permet de décrire les caractéristiques thermiques dépendant de la température. La formulation fait intervenir l'enthalpie volumique.

$$\beta - \operatorname{div}(\lambda(T) \operatorname{grad} T) = f.$$

### 6.3.1 Syntaxe

```
/ THER_NL = _F ( ♦ / BETA = β , [fonction**]  
                  / RHO_CP = cp , [fonction**]  
                  ♦ LAMBDA = λ , [fonction**]  
                  )
```

### 6.3.2 Opérandes BETA / LAMBDA / RHO\_CP

- ♦ / BETA = *β*  
Enthalpie volumique fonction de la température. Pour l'enthalpie, les prolongements de la fonction sont nécessairement linéaires.
- / RHO\_CP = *cp*  
Chaleur volumique.
- ♦ LAMBDA = *λ*  
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 *l1*, *l2* et *l3*. Les coefficients sont donc définis par l'utilisateur dans le repère d'orthotropie de la plaque.

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

### 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 = b11  ,            [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  $11 \cdot P1 \cdot P1$
- ♦ **COND\_LMP** = a1112  
terme lié à l'intégrale de  $11 \cdot P1 \cdot P2$
- ♦ **COND\_LPP** = a1122  
terme lié à l'intégrale de  $11 \cdot P2 \cdot P2$
- ♦ **COND\_LSI** = a1123  
terme lié à l'intégrale de  $11 \cdot P2 \cdot P3$
- ♦ **COND\_TMM** = a2211  
terme lié à l'intégrale de  $12 \cdot P1 \cdot P1$
- ♦ **COND\_TMP** = a2212  
terme lié à l'intégrale de  $12 \cdot P1 \cdot P2$
- ♦ **COND\_TPP** = a2222  
terme lié à l'intégrale de  $12 \cdot P2 \cdot P2$
- ♦ **COND\_TSI** = a2223  
terme lié à l'intégrale de  $12 \cdot P2 \cdot P3$

### 6.4.3 Opérands COND\_NMM / COND\_NMP / COND\_NPP / COND\_NSI

Si  $b$  est le tenseur qui décrit la conduction transversale et les échanges sur les surfaces  $\omega_{a+}$  et  $\omega_{a-}$ , défini dans la note [R3.11.01]. On a pour le tenseur de conductivité transverse :

- ♦  $COND\_NMM = b_{11}$   
terme lié à l'intégrale de  $13 \cdot P1 \cdot P1$
- ♦  $COND\_NMP = b_{12}$   
terme lié à l'intégrale de  $13 \cdot P1 \cdot P2$
- ♦  $COND\_NPP = b_{22}$   
terme lié à l'intégrale de  $13 \cdot P2 \cdot P2$
- ♦  $COND\_NSI = b_{23}$   
terme lié à l'intégrale de  $13 \cdot P2 \cdot P3$

### 6.4.4 Opérands CMAS\_MM / CMAS\_MP / CMAS\_PP / CMAS\_SI

On a enfin pour le tenseur de capacité thermique.

- ♦  $CMAS\_MM = c_{11}$   
terme lié à l'intégrale de  $RHOC \cdot P1 \cdot P1$
- ♦  $CMAS\_MP = c_{12}$   
terme lié à l'intégrale de  $RHOC \cdot P1 \cdot P2$
- ♦  $CMAS\_PP = c_{22}$   
terme lié à l'intégrale de  $RHOC \cdot P2 \cdot P2$
- ♦  $CMAS\_SI = c_{23}$   
terme lié à l'intégrale de  $RHOC \cdot P2 \cdot P3$



## 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].

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

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

#### 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 Opérandes **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.

## 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 :

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

- ♦ 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 :

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

- ♦ 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 ,
    ♦ ALPHA_BAZANT = α ,      [R]
    ♦ N           = n ,      [R]
    ♦ FONC_DESORP = desorp ,  [fonction**]
)
```

### 7.4.2 Opérands 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= α  
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 :

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

La courbe  $\sigma = f(\varepsilon)$  au nième cycle est définie par :

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

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

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

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

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

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

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

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 :

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

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  $b = \frac{E_H}{E}$ ).

Titre :        *Opérateur* *DEFI\_MATERIAU*  
Auteur(s) :   **J.P. LEFEBVRE**

Date :        *17/06/04*  
Clé :    *U4.43.01-H2* Page :    *64/138*

- ◇     $A1\_PM = a1$   
     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  $R_O$  (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 définition des paramètres caractéristiques du matériau béton qui interviennent dans l'estimation des pertes de tension le long des câbles de précontrainte. Ce mot-clé facteur ne peut être utilisé que conjointement avec le mot-clé facteur ELAS.

◇ PERT\_FLUA = xflu

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

$\Delta F_{flu} = x_{flu} \cdot F_0$  où  $F_0$  désigne la tension initiale défini par DEFI\_CABL\_BP.

La valeur par défaut est 0 : dans ce cas, on ne tient pas compte des pertes de tension par fluage du béton.

◇ PERT\_RETR = xret

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 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 BEPL).

Si on tient compte des pertes de tension par relaxation de l'acier (RELAX\_1000 renseignée par une valeur non nulle), il faut obligatoirement renseigner l'opérande F\_PRG, par une valeur non nulle.

◇ FROT\_COURB = f

Coefficient de frottement 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=          β ,                [fonction*]
|     ♦ ENER_COMP RUPT=     Gc ,                [fonction*]
|     ♦ ENER_TRAC RUPT=     Gt ,                [fonction*]
|     ♦ COEF_ELAS_COMP=    φ ,                [fonction*]
|     ◇ LONG_CARA =         l_cara ,
|     ◇ ENER_COMP RUPT=     / 'LINEAIRE', [DEFAULT]
|                               / 'PARABOLE', [TXM]
|     ◇ ENER_TRAC RUPT=     / 'LINEAIRE', [DEFAULT]
|                               / 'EXPONENT', [TXM]
| )
```

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, ( $E$ ,  $\nu$ ,  $\alpha$ ,  $f'_c$ ,  $f'_t$ ,  $\beta$ ,  $G_c$ ,  $G_t$ ) 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 Opérandes F\_C / F\_T / COEF\_BIAX**

- ♦ F\_C=  $f'_c$   
Résistance en compression uniaxiale  $f'_c$ .
- ♦ F\_T=  $f'_t$   
Résistance en traction uniaxiale  $f'_t$ .
- ♦ COEF\_BIAX=  $\beta$   
Le rapport de la résistance en compression biaxiale à la résistance en compression uniaxiale  $\beta$ .

**7.8.3 Opérandes ENER\_COMP RUPT / ENER\_TRAC RUPT / COEF\_ELAS\_COMP**

- ♦ ENER\_COMP\_RUPT=  $G_c$   
L'énergie de rupture en compression  $G_c$ .
- ♦ ENER\_TRAC\_RUPT=  $G_t$   
L'énergie de rupture en traction  $G_t$ .
- ♦ COEF\_ELAS\_COMP=  $\varphi$   
La limite d'élasticité en compression, donnée par un coefficient de proportionnalité en pourcentage de la résistance au pic  $f'_c(\theta)$ , 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'écroutissement ultime en traction suivant la formule (pour un écroutissement post-pic linéaire) :

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

Dans le cas particulier d'un maillage contenant des mailles adjacentes dont les dimensions sont très différentes, les écroutissements 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 ( $G_t$ ,

Long\_cara) tel que  $\frac{2.G_t(\theta)}{l_c.f'_t(\theta)}$  vaille la valeur qu'il souhaite pour l'écroutissement ultime en traction  $\kappa_u$ .

(La valeur usuelle de la déformation associée à l'écroutissement 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 / V\_GRANGER\_FP

Définition des paramètres matériaux pour le modèle viscoélastique de Granger, modélisant le fluage propre du béton. Il existe 2 relations de comportement : la première ne prend pas en compte le phénomène de vieillissement, la deuxième en rend compte. 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

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

$t_c$  désigne le temps de chargement

$h = c^{-1}(C)$ , ou  $C$  est la courbe isotherme de désorption

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

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

$$k(tc_{eq}) = 1 \text{ sinon}$$

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

Remarque :

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

### 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       = τ1 ,           [R]
|   ♦ TAUX_2       = τ2 ,           [R]
|   ♦ TAUX_3       = τ3 ,           [R]
|   ♦ TAUX_4       = τ4 ,           [R]
|   ♦ TAUX_5       = τ5 ,           [R]
|   ♦ TAUX_6       = τ6 ,           [R]
|   ♦ TAUX_7       = τ7 ,           [R]
|   ♦ TAUX_8       = τ8 ,           [R]
|   ♦ FONC_DESORP  = h ,           [R]
|   ♦ QSR_K        = qsr ,         [R]
| )
```

### 7.9.2 Opérandes pour le fluage propre

$$\bar{J}1 = \bar{J}1$$

• • •

$$\begin{matrix} \dots \\ \cdot J8 \end{matrix} = J8$$

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

$$\text{TAUX } 1 = \tau 1$$

• • •

• • •

$$\text{.TAUX } 8 = \tau 8$$

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

$$\text{FONC DESORP} = h$$

Courbe de désorption donnant l'hygrométrie  $h$  en fonction de la concentration en eau  $C$

$$\text{OSR}_K = U_C/R \quad [R]$$

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 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) ,      [R]
)

```

#### 7.9.4 Opérandes pour le vieillissement

$$\text{QSR VEIL} = \text{USR}$$

Constante énergie d'activation intervenant dans le terme temps de charge équivalent  $t_{ceq}$  modélisant

l'effet de la température sur le vieillissement  $\frac{u_c}{R}$ .

$$\text{FONC}_V = k \quad (t_{\text{ceq}})$$

### Fonction de vieillissement

## 7.10 Mot clé NADAI\_B

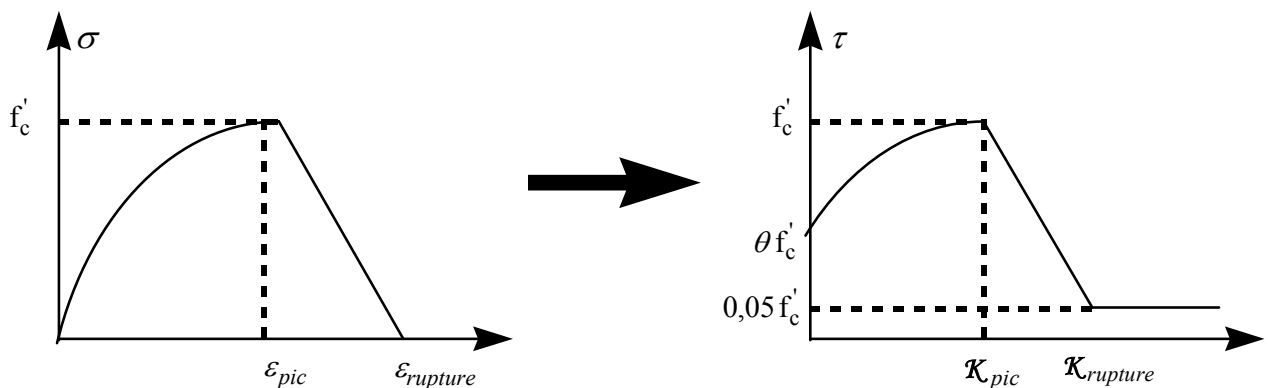
La loi de comportement NADAI\_B est un modèle de comportement du béton intégrant des déformations plastiques en compression et un modèle de fissuration en traction. Ce modèle permet de représenter le comportement du béton sous chargement cyclique, une attention particulière étant apportée à la gestion 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
- $\theta$  : paramètre tel que  $\theta f'_c$  définit la surface de charge initiale en compression
- $\mathcal{K}_{pic}$  : déformation plastique au pic
- $\mathcal{K}_{rupture}$  : déformation plastique à rupture

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. Pour l'utilisateur qui ne voudrait pas faire ce travail, nous recommandons des valeurs  $f'_t$ ,  $\theta$ ,  $\mathcal{K}_{pic}$ ,  $\mathcal{K}_{rupture}$ ,  $\varepsilon_{rupture}^{traction}$  et le facteur de cisaillement transverse qui est pratiquement inaccessible à la mesure.

### 7.10.1 Syntaxe

Nous indiquons ci dessous la correspondance entre les mots clé du comportement NADAI\_B et les paramètres définis ci dessus :

```
| / NABAI_B : (
|   ♦ F_C      : fc
|   ♦ F_T      : ft
|   ♦ CRIT_E_C  : theta
|   ♦ EPS_P_C   : epc
|   ♦ EPS_R_C   : erc
|   ♦ EPSI_R_T  : ert
|   ♦ FAC_T_C   : f
| )
```

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

### 7.10.2 Opérands F\_C / F\_T

- ♦ F\_C : fc contrainte limite en compression
- ♦ F\_T : ft contrainte limite en traction valeur recommandée 0,1  $f'_c$

### 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

### 7.10.4 Opérands EPS\_P\_C / EPS\_R\_C / EPSI\_R\_T

- ♦ EPS\_P\_C : epc : déformation plastique ou pic
- ♦ EPS\_R\_C : erc : déformation plastique à rupture. Valeur recommandée 0,0005
- ♦ EPSI\_R\_T : ert : déformation à rupture en traction. Valeur recommandée 0,0005

### 7.10.5 Opérande FAC\_T\_C

- ♦ FAC\_T\_C : f : facteur de transfert de cisaillement. Valeur recommandée 0,4

## 7.11 Mot clé facteur BAZANT\_FD

Le modèle BAZANT\_FD est un modèle viscoélastique de fluage de dessiccation intrinsèque selon le modèle de Bazant. C'est un comportement à long terme des bétons soumis au séchage et à un chargement mécanique simultanément. Le document [R7.01.05] décrit les détails correspondants.

#### Remarques :

*Il faut renseigner le mot clé FONC\_DESORP sous le comportement ELAS\_FO.  
Ce comportement peut être associé aux effets de dilatation et de retrait thermique définis par les opérands K\_DESSIC et B\_ENDOGE sous le mot clé ELAS\_FO.*

### 7.11.1 Syntaxe

```
BAZANT_FD = _F (
|   ♦ LAM_VISC = λ, [R]
| )
```

### 7.11.2 Opérande

LAM\_VISC = paramètre matériau en  $[Pa^{-1}]$ .



## 7.12 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 refermeture 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.

### 7.12.1 Syntaxe

```

◇      /      ◆      LABORD_1D      =      _F      (
      ◆      Y01      =      Y01 ,      [R]
      ◆      Y02      =      Y02 ,      [R]
      ◆      A1       =      A1  ,      [R]
      ◆      A2       =      A2  ,      [R]
      ◆      B1       =      B1  ,      [R]
      ◆      B2       =      B2  ,      [R]
      ◆      BETA1    =      β1  ,      [R]
      ◆      BETA2    =      β2  ,      [R]
      ◆      SIGF     =      σf  ,      [R]
                                   ) ;
    
```

### 7.12.2 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 = β1  
Paramètre décrivant l'amplitude de la déformation anélastique sous traction
- ◆ BETA2 = β2  
Paramètre décrivant l'amplitude de la déformation anélastique sous compression
- ◆ SIGF = σf  
Paramètre indiquant la contrainte d'ouverture et de refermeture de fissure

## 7.13 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.

### 7.13.1 Syntaxe

```
| / MAZARS = _F (
    ♦ EPSD0 = εd0 , [R]
    ♦ AC = Ac , [R]
    ♦ AT = At , [R]
    ♦ BC = Bc , [R]
    ♦ BT = Bt , [R]
    ♦ BETA = β , [R]
)
/ MAZARS = _F (
    ♦ EPSD0 = εd0 , [fonction**]
    ♦ AC = Ac , [fonction**]
    ♦ AT = At , [fonction**]
    ♦ BC = Bc , [fonction**]
    ♦ BT = Bt , [fonction**]
    ♦ BETA = β , [R]
)
```

*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.

### 7.13.2 Opérandes EPSD0

♦ *EPSD0* = *εd0*

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

### 7.13.3 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 *Ac* = 1 et l'horizontale pour passant par le pic pour *Ac* = 0 (généralement  $1 < Ac < 1.5$ ).

♦ *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 *Ac* = 1 et l'horizontale passant par le pic pour *Ac* = 0 (généralement  $0.7 < At < 1$ ).

◆ BC = Bc

Coefficient permettant de fixer l'allure de la courbe post-pic en compression. Selon sa valeur peut correspondre à une chute brutale de la contrainte ( $Bc < 10^4$ ) ou une phase préliminaire d'accroissement de contrainte suivie d'une décroissance plus ou moins rapide (généralement  $10^3 < Bc < 2 \cdot 10^3$ ).

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

## 7.13.4 Opérande BETA

◆ BETA =  $\beta$

Paramètre de correction pour le cisaillement. Valeur conseillé 1.06.

## 7.14 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. 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 :  $\underline{\varepsilon}^d = h \cdot f(\underline{\sigma}^d)$

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 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 :

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

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

(Les crochets  $\langle \cdot \rangle^+$  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 feuillettes 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 :

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

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

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

où  $k_r^d$  désigne la rigidité associée à la capacité de l'eau adsorbée 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.

## 7.14.1 Syntaxe

```
| BETON_UMLV_FP : (
|     ♦ 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]
| )
```

## 7.14.2 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 adsorbée par les feuillets d'hydrates

♦ ETA\_ID : ETA\_ID

$\eta_i^d$  viscosité de l'eau libre.

**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*.

## 7.15 Mots clés facteur BETON\_ECRO\_LINE

Définition d'une courbe d'écroissage 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

### 7.15.1 Syntaxe

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

### 7.15.2 Opérandes

♦ D\_SIGM\_EPSI = dsde (ET)

Pente de la courbe de traction.

♦ SYT = sigt

Contrainte maximum en traction simple.

◇ SYC = sigm

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*.

## 7.16 Mots clés facteur GLRC

Définition du comportement des plaques en béton écrites en efforts généralisés. GLRC est un modèle élasto-plastique en variables globales pour coques orthotropes avec prise en compte éventuelle de l'influence de l'effort membranaire sur les limites élastiques en flexion.

### 7.16.1 Syntaxe

```
/ GLRC = _F ( ♦ MEX1 = mex1 , [R]
              ♦ MEY1 = mey1 , [R]
              ♦ MEX2 = mex2 , [R]
              ♦ MEY2 = mey2 , [R]
              ♦ CX1 = cx1 , [R]
              ♦ CY1 = cy1 , [R]
              ♦ CXY1 = cxy1 , [R]
              ♦ CX2 = cx2 , [R]
              ♦ CY2 = cy2 , [R]
              ♦ CXY2 = cxy2 , [R]
              )
```

```
      / GLRC_FO = _F (      ♦ MEX1 = mex1      , [fonction ++]  
                           ♦ MEY1 = mey1      , [fonction ++]  
                           ♦ MEX2 = mex2      , [fonction ++]  
                           ♦ MEY2 = mey2      , [fonction ++]  
                           ♦ CX1  = cx1       , [fonction ++]  
                           ♦ CY1  = cy1       , [fonction ++]  
                           ♦ CXY1 = cxy1      , [fonction ++]  
                           ♦ CX2  = cx2       , [fonction ++]  
                           ♦ CY2  = cy2       , [fonction ++]  
                           ♦ CXY2 = cxy2      , [fonction ++]  
                           )
```

### 7.16.2 Opérandes

- ♦ MEX1 = mex1  
moment limite élastique en flexion positive en x.
- ♦ MEY1 = mey1  
moment limite élastique en flexion positive en y.
- ♦ MEX2 = mex2  
moment limite élastique en flexion négative en x.
- ♦ MEY2 = mey2  
moment limite élastique en flexion négative en y.
- ♦ CX1 = cx1  
coefficient de rappel cinématique en flexion positive.
- ♦ CY1 = cy1  
coefficient de rappel cinématique en flexion positive.
- ♦ CXY1 = cxy1  
coefficient de rappel cinématique en flexion positive.
- ♦ CX2 = cx2  
coefficient de rappel cinématique en flexion négative.
- ♦ CY2 = cy2  
coefficient de rappel cinématique en flexion négative.
- ♦ CXY2 = cxy2  
coefficient de rappel cinématique en flexion négative.

## 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.

Pour les effets mécaniques et les comportements associés, les modèles sont communs pour acier et zirconium (cf. [R4.04.02]).

### 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 ,      [trc]
|   ♦ 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.

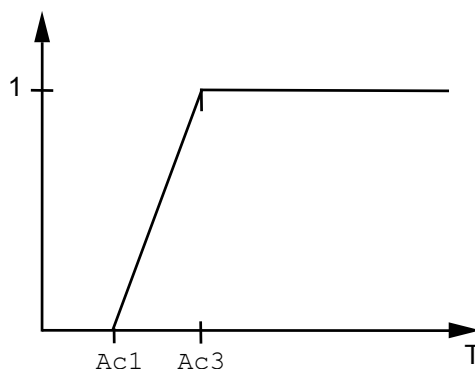
- ◆ TAUX\_3 = t3

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

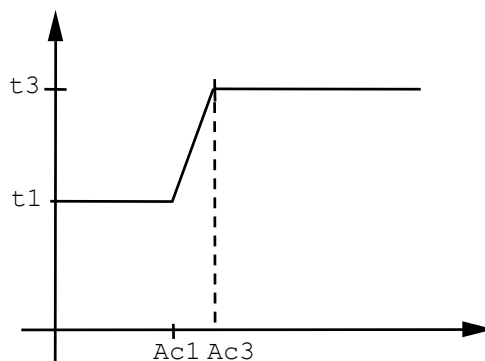
L'évolution de la proportion d'austénite est alors définie par :

$$\dot{Z} = \frac{Z - Z_{eq}(T)}{\tau(T)}$$

avec :  $Z_{eq}(T)$



et  $\tau(T)$





### 8.1.3 Opérandes pour la taille de grains

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

- ◆ LAMBDA0 =  $\lambda_0$

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

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

- ◆ QSR\_K =  $Q_{\text{app}}$

Paramètre énergie d'activation intervenant dans le modèle d'évolution de taille de grain.

- ◆ D10 =  $D_{10}$

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

- ◆ WSR\_K =  $W_{\text{app}}$

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. [R4.04.01]).

### 8.2.1 Syntaxe

```
      | META_ZIRC = _F (
♦ TDEQ = teqd,      [R]
♦ N     = n ,       [R]
♦ K     = K ,       [R]
♦ QSR_K = qsr ,     [R]
♦ TDC   = tdc ,     [R]
♦ AC    = Ac ,      [R]
♦ M     = m ,       [R]
♦ TDR   = tdr ,     [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.

- ♦ TDC = tdc

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.

- ♦ TDR = tdr

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.

### 8.3 Mot clé facteur DURT\_META

Définition des caractéristiques relatives au calcul de dureté associée à la métallurgie des aciers.

#### 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

La dureté est calculée en utilisant une loi de mélange linéaire sur la microdureté des constituants :

$$HV = \sum_i z_i \times HV_i$$

$HV_i$  : microdureté du constituant  $i$

$z_i$  : proportion du constituant  $i$

- ♦ F1\_DURT = HVf1 microdureté de la phase à froid F1 (ferrite pour l'acier)
- ♦ F2\_DURT = HVf2 microdureté de la phase à froid F2 (perlite pour l'acier)
- ♦ F3\_DURT = HVf3 microdureté de la phase à froid F3 (bainite pour l'acier)
- ♦ F4\_DURT = HVf4 microdureté de la phase à froid F4 (martensite pour l'acier)
- ♦ C\_DURT = HVf1 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]). 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').

Pour toutes les relations de comportement relatives aux matériaux subissant des transformations métallurgiques (ELAS\_META, META\_\*\*\*\_\*\*\*), on peut traiter deux types de matériaux ; le premier correspond aux aciers et le second est spécifique au Zircaloy. Les différentes relations (ELAS\_META, META\_\*\*\*\_\*\*\*) sont identiques pour ces deux matériaux (on traite les mêmes phénomènes) mais le nombre de phases en présence est différent. On choisit le matériau souhaité en activant, dans l'opérateur STAT\_NON\_LINE, le mot clé RELATION\_KIT qui vaut 'ACIER' ou 'ZIRC'.

- 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),
- 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  $\beta$ ).

Par conséquent, pour un acier on renseigne au maximum 5 limites d'élasticité alors qu'avec le Zircaloy on n'en renseigne au maximum trois.

### 8.4.1 Syntaxe

```
| ELAS_META = _F (
|   ♦ E = young , [R]
|   ♦ NU = nu , [R]
|   ♦ F_ALPHA =  $\alpha f$  , [R]
|   ♦ C_ALPHA =  $\alpha \gamma$  , [R]
|   ♦ PHASE_REFE = / 'CHAUD', [TXM]
|                 / 'FROID',
|   ♦ EPSF_EPSC_TREF =  $\Delta \epsilon$  , [R]
|   ♦ TEMP_DEF_ALPHA =  $T \gamma$  , [R]
|   ♦ PRECISION = /  $\epsilon$  , [R]
|                 / 1. , [DEFAULT]
|   ♦ F1_SY = F_ $\sigma y1$  , [R]
|   ♦ F2_SY = F_ $\sigma y2$  , [R]
|   ♦ F3_SY = F_ $\sigma y3$  , [R]
|   ♦ F4_SY = F_ $\sigma y4$  , [R]
|   ♦ C_SY = F_ $\sigma y \gamma$  , [R]
|   ♦ SY_MELANGE = f , [fonction]
|   ♦ F1_S_VP = F_ $\sigma c1$  , [R]
|   ♦ F2_S_VP = F_ $\sigma c2$  , [R]
|   ♦ F3_S_VP = F_ $\sigma c3$  , [R]
|   ♦ F4_S_VP = F_ $\sigma c4$  , [R]
|   ♦ C_S_VP = F_ $\sigma c \gamma$  , [R]
|   ♦ S_VP_MELANGE = f , [fonction]
| )
```

```

| ELAS_META_FO =_F (    ♦ E                    = young ,            [fonction**]
                         ♦ NU                    = nu ,            [fonction**]
                         ♦ F_ALPHA              =  $\alpha_f$  ,            [fonction**]
                         ♦ C_ALPHA              =  $\alpha_\gamma$  ,            [fonction**]
                         ♦ PHASE_REFE          = / 'CHAUD',        [TXM]
                                                 / 'FROID',
                         ♦ EPSF_EPSC_TREF      =  $\Delta\varepsilon$  ,            [R]
                         ◇ TEMP_DEF_ALPHA      =  $T_\gamma$  ,            [R]
                         ◇ PRECISION           = /  $\varepsilon$  ,            [R]
                                                 / 1. ,            [DEFAULT]
                         ◇ F1_SY                = F_σy1 ,            [fonction**]
                         ◇ F2_SY                = F_σy2 ,            [fonction**]
                         ◇ F3_SY                = F_σy3 ,            [fonction**]
                         ◇ F4_SY                = F_σy4 ,            [fonction**]
                         ◇ C_SY                 = F_σyγ ,            [fonction**]
                         ◇ SY_MELANGE          = f ,                [fonction]
                         ◇ F1_S_VP              = F_σc1 ,            [fonction**]
                         ◇ F2_S_VP              = F_σc2 ,            [fonction**]
                         ◇ F3_S_VP              = F_σc3 ,            [fonction**]
                         ◇ F4_S_VP              = F_σc4 ,            [fonction**]
                         ◇ C_S_VP               = F_σcγ ,            [fonction**]
                         ◇ S_VP_MELANGE       = f ,                [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 =  $\alpha_f$   
Coefficient de dilatation thermique moyen des phases froides.
- ♦ C\_ALPHA =  $\alpha_\gamma$   
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 *AFPE\_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 =  $\Delta\epsilon$

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 =  $T_\gamma$

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

Ce réel indique avec quelle précision une température  $T$  est proche de la température de référence (cf. [§3.1.4]).

◇ F1\_SY = F\_sigm\_f

Limite d'élasticité de la phase froide 1 pour un comportement plastique.

◇ F2\_SY = F\_sigm\_f

Limite d'élasticité de la phase froide 2 pour un comportement plastique.

◇ F3\_SY = F\_sigm\_f

Limite d'élasticité de la phase froide 3 pour un comportement plastique.

◇ F4\_SY = F\_sigm\_f

Limite d'élasticité de la phase froide 4 pour un comportement plastique.

◇ C\_SY = F\_sigm\_f

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 = F\_sigm\_f

Limite d'élasticité de la phase froide 1 pour un comportement visqueux.

◇ F2\_S\_VP = F\_sigm\_f

Limite d'élasticité de la phase froide 2 pour un comportement visqueux.

◇ F3\_S\_VP = F\_sigm\_f

Limite d'élasticité de la phase froide 3 pour un comportement visqueux.

◇ F4\_S\_VP = F\_sigm\_f

Limite d'élasticité de la phase froide 4 pour un comportement visqueux.

◇ C\_S\_VP = F\_sigm\_f

Limite d'élasticité de la phase chaude pour un comportement visqueux.

◇ S\_VP\_MELANGE = f

Fonction utilisée pour la loi de mélange sur la limite d'élasticité du matériau multiphasé pour un comportement visqueux.

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

## 8.5 Mot clé facteur **META\_ECRO\_LINE**

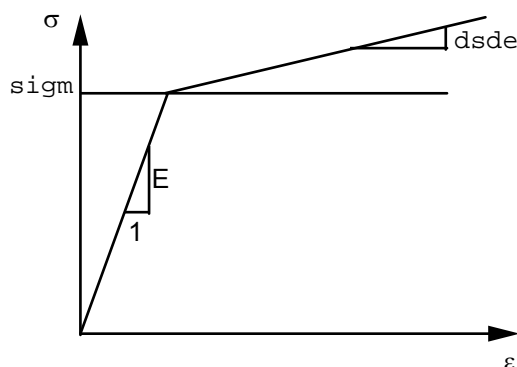
Définition de cinq modules d'écrouissage utilisés dans la modélisation du phénomène d'écrouissage isotrope linéaire d'un matériau subissant des changements de phases métallurgiques (voir [R4.04.02]). Ces modules dépendent de la température.

### 8.5.1 Syntaxe

```
|  META_ECRO_LINE = _F (
|                                ◇  F1_D_SIGM_EPSI      =  dsde      ,      [fonction**]
|                                ◇  F2_D_SIGM_EPSI      =  dsde      ,      [fonction**]
|                                ◇  F3_D_SIGM_EPSI      =  dsde      ,      [fonction**]
|                                ◇  F4_D_SIGM_EPSI      =  dsde      ,      [fonction**]
|                                ◇  C_D_SIGM_EPSI       =  dsde      ,      [fonction**]
|  )
```

### 8.5.2 Opérandes

- ◇ F1\_D\_SIGM\_EPSI = dsde  
Pente de la courbe de traction pour la phase froide 1.
- ◇ F2\_D\_SIGM\_EPSI = dsde  
Pente de la courbe de traction pour la phase froide 2.
- ◇ F3\_D\_SIGM\_EPSI = dsde  
Pente de la courbe de traction pour la phase froide 3.
- ◇ F4\_D\_SIGM\_EPSI = dsde  
Pente de la courbe de traction pour la phase froide 4.
- ◇ C\_D\_SIGM\_EPSI = dsde  
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_p ,   [fonction**]
|                      ◇ SIGM_F2           = r_p ,   [fonction**]
|                      ◇ SIGM_F3           = r_p ,   [fonction**]
|                      ◇ SIGM_F4           = r_p ,   [fonction**]
|                      ◇ SIGM_C            = r_p ,   [fonction**]
|                      )
```

#### 8.6.1.1 Opérandes

- ◇ SIGM\_F1                = r\_p  
Courbe écrouissage isotrope R en fonction de la déformation plastique cumulée p pour la phase froide 1.
- ◇ SIGM\_F2                = r\_p  
Courbe écrouissage isotrope R en fonction de la déformation plastique cumulée p pour la phase froide 2.
- ◇ SIGM\_F3                = r\_p  
Courbe écrouissage isotrope R en fonction de la déformation plastique cumulée p pour la phase froide 3.
- ◇ SIGM\_F4                = r\_p  
Courbe écrouissage isotrope R en fonction de la déformation plastique cumulée p pour la phase froide 4.
- ◇ SIGM\_C                = r\_p  
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 :  $R = \sigma$  - limite d'élasticité,  
 $p = \varepsilon - (\sigma / E)$ .



## 8.7 Mot clé facteur **META\_VISC**

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 = _F (
|   ◇ F1_ETA =  $\eta_1$  ,      [fonction**]
|   ◇ F2_ETA =  $\eta_2$  ,      [fonction**]
|   ◇ F3_ETA =  $\eta_3$  ,      [fonction**]
|   ◇ F4_ETA =  $\eta_4$  ,      [fonction**]
|   ◇ C_ETA  =  $\eta_5$  ,      [fonction**]
|
|   ◇ F1_N   =  $n_1$  ,      [fonction**]
|   ◇ F2_N   =  $n_2$  ,      [fonction**]
|   ◇ F3_N   =  $n_3$  ,      [fonction**]
|   ◇ F4_N   =  $n_4$  ,      [fonction**]
|   ◇ C_N    =  $n_5$  ,      [fonction**]
|
|   ◇ F1_C   =  $C_1$  ,      [fonction**]
|   ◇ F2_C   =  $C_2$  ,      [fonction**]
|   ◇ F3_C   =  $C_3$  ,      [fonction**]
|   ◇ F4_C   =  $C_4$  ,      [fonction**]
|   ◇ C_C    =  $C_5$  ,      [fonction**]
|
|   ◇ F1_M   =  $m_1$  ,      [fonction**]
|   ◇ F2_M   =  $m_2$  ,      [fonction**]
|   ◇ F3_M   =  $m_3$  ,      [fonction**]
|   ◇ F4_M   =  $m_4$  ,      [fonction**]
|   ◇ C_M    =  $m_5$  ,      [fonction**]
| )
```

### 8.7.2 Opérandes

- ◇ F1\_ETA =  $\eta_1$   
Paramètre  $\eta$  de la loi d'écoulement viscoplastique, pour la phase froide 1.
- ◇ F2\_ETA =  $\eta_2$   
Paramètre  $\eta$  de la loi d'écoulement viscoplastique, pour la phase froide 2.
- ◇ F3\_ETA =  $\eta_3$   
Paramètre  $\eta$  de la loi d'écoulement viscoplastique, pour la phase froide 3.
- ◇ F4\_ETA =  $\eta_4$   
Paramètre  $\eta$  de la loi d'écoulement viscoplastique, pour la phase froide 4
- ◇ C\_ETA =  $\eta_5$   
Paramètre  $\eta$  de la loi d'écoulement viscoplastique, pour la phase à chaud

- ◇ F1\_N = n1  
Paramètre n de la loi d'écoulement viscoplastique, pour la phase froide 1.
- ◇ F2\_N = n2  
Paramètre n de la loi d'écoulement viscoplastique, pour la phase froide 2.
- ◇ F3\_N = n3  
Paramètre n de la loi d'écoulement viscoplastique, pour la phase froide 3.
- ◇ F4\_N = n4  
Paramètre n de la loi d'écoulement viscoplastique, pour la phase froide 4
- ◇ C\_N = n5  
Paramètre n de la loi d'écoulement viscoplastique, pour la phase à chaud
- ◇ 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
- ◇ 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 : 
$$\Delta \varepsilon^{pt} = \frac{3}{2} \sigma \sum_{i=1}^{i=4} K_i F_i'(Z_i) < \Delta Z_i >$$

### 8.8.1 Syntaxe

```

/  META_PT =      (  ♦  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  =   $\theta_{\gamma f}$   [R]
                      ♦  C_F2_THETA  =   $\theta_{\gamma p}$   [R]
                      ♦  C_F3_THETA  =   $\theta_{\gamma b}$   [R]
                      ♦  C_F4_THETA  =   $\theta_{\gamma m}$   [R]
                      ♦  F1_C_THETA  =   $\theta_{f\gamma}$   [R]
                      ♦  F2_C_THETA  =   $\theta_{p\gamma}$   [R]
                      ♦  F3_C_THETA  =   $\theta_{b\gamma}$   [R]
                      ♦  F4_C_THETA  =   $\theta_{m\gamma}$   [R]
                      )
```

### 8.9.2 Opérandes

- ♦ C\_F1\_THETA=  $\theta_{\gamma f}$  C\_F2\_THETA=  $\theta_{\gamma p}$  C\_F3\_THETA=  $\theta_{\gamma b}$  C\_F4\_THETA=  $\theta_{\gamma m}$   
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=  $\theta_{f\gamma}$  F2\_C\_THETA=  $\theta_{p\gamma}$  F3\_C\_THETA=  $\theta_{b\gamma}$  F4\_C\_THETA=  $\theta_{m\gamma}$   
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.

## 9 Comportements THERMO-HYDRO-MECANIKES 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	GA Z	LIQU_GAZ_ATM	LIQU_VAPE_GA Z	LIQU_VAPE	LIQU_SATU_GAT	LIQU_NSAT_GAT
<b>THM_INIT</b>	O	O	O	O	O	O	O	O
PRE1	O	O	O	O	O	O	O	O
PRE2	I	O	I	I	O	I	O	O
PORO	O	O	O	O	O	O	O	O
TEMP	T	O	O	T	O	O	O	O
PRES_VAPE	I	I	I	I	O	O	O	O
<b>THM_DIFFU</b>	O	O	O	O	O	O	O	O
R_GAZ	I	O	O	I	O	O	O	O
RHO	O	O	O	O	O	O	O	O
BIOT_COEF	O	O	O	O	O	O	O	O
PESA_X	O	O	O	O	O	O	O	O
PESA_Y	O	O	O	O	O	O	O	O
PESA_Z	O	O	O	O	O	O	O	O
SATU_PRES	I	O	I	O	O	O	O	O
D_SATU_PRES	I	O	I	O	O	O	O	O
PERM_LIQU	I	O	I	O	O	O	O	O
D_PERM_LIQU_SATU	I	O	I	O	O	O	O	O
PERM_GAZ	I	O	I	I	O	O	O	O
D_PERM_SATU_GAZ	I	O	I	I	O	O	O	O
D_PERM_PRES_GAZ	I	O	I	I	O	O	O	O
FICK	I	I	I	I	O	I	O	O
D_FICK_TEMP	I	I	I	I	O	I	O	O
D_FICK_GAZ_PRES	I	I	I	I	O	I	O	O
CP	T	T	T	T	T	T	O	O
PERM_IN/PERM_END	O	O	O	O	O	O	O	O
LAMBDA	T	T	T	T	T	T	O	O
D_LAMBDA_TEMP	T	T	T	T	T	T	O	O
<b>THM_LIQU</b>	O	O	I	O	O	O	O	O
RHO	O	O	I	O	O	O	O	O
UN_SUR_K	O	O	I	O	O	O	O	O
VISC	O	O	I	O	O	O	O	O
D_VISC_TEMP	O	O	I	O	O	O	O	O
ALPHA	T	T	I	T	T	T	O	O
CP	T	T	I	T	T	T	O	O
LAMBDA	TP	TP	I	TP	TP	TP	O	O
D_LAMBDA_TEMP	TP	TP	I	TP	TP	TP	O	O
<b>THM_GAZ</b>	I	O	O	I	O	I	O	O
MASS_MOL	I	O	O	I	O	I	O	O
VISC	I	O	O	I	O	I	O	O
D_VISC_TEMP	I	O	O	I	O	I	O	O
CP	I	T	T	T	T	I	O	O
LAMBDA	I	TP	TP	TP	TP	I	O	O
D_LAMBDA_TEMP	I	TP	TP	TP	TP	I	O	O
<b>THM_VAPE_GAZ</b>	I	I	I	I	O	O	O	O
MASS_MOL	I	I	I	I	O	O	O	O
CP	I	I	I	I	O	O	O	O
VISC	I	I	I	I	O	O	O	O
D_VISC_TEMP	I	I	I	I	O	O	O	O

Légendes : O : Mot clé Obligatoire  
T : Mot clé obligatoire en Thermique  
TP : Mot clé obligatoire en thermique de type THER\_POLY  
I : Mot clé Inutile pour ce type de loi de couplage

## 9.1.1 Syntaxe

```

◇ COMP_THM = / 'LIQU_SATU' ,
              / 'LIQU_GAZ' ,
              / 'GAZ' ,
              / 'LIQU_GAZ_ATM' ,
              / 'LIQU_VAPE_GAZ' ,
              / 'LIQU_VAPE' ,
              / 'LIQU_SATU_GAT' ,
              / 'LIQU_NSAT_GAT' ,

```

## 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 noeuds, 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 sec liquide,  $p_{as}$  la pression d'air sec sec,  $p_{as}$  la pression d'air sec 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 suction), 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				$p_g$	$p_g$	$p_g$

On pourra se reporter au [§3.3.2.3] de la documentation de la commande STAT\_NON\_LINE [U4.51.03].

On définit alors les pressions et la température « totales » par :

$$p = p^{ddl} + p^{ref} \quad ; \quad T = T^{ddl} + T^{ref}$$

Les valeurs écrites par IMPR\_RESU sont les inconnues nodales  $p^{ddl}$  et  $T^{ddl}$ . Des même les conditions aux limites doivent être exprimées par rapport aux inconnues nodales.

Par contre ce sont les pressions et la température totale 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 TEMP\_REF de la commande AFFE\_MATERIAU 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

Porosité initiale.

### 9.2.6 Opérande PRES\_VAPE

Pour les comportements : LIQU\_VAPE\_GAZ, LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE et LIQU\_GAZ et pression de vapeur initiale.

### 9.2.7 Opérande DEGR\_SATU

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 Opérande VISC

Viscosité du liquide. Fonction de la température.

#### 9.3.7 Opérande D\_VISC\_TEMP

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 Opérande VISC

Viscosité du gaz sec. Fonction de la température.

### 9.4.5 Opérande D\_VISC\_TEMP

Dérivée par rapport à la température de la viscosité du gaz sec. Fonction de la température.  
L'utilisateur doit assurer la cohérence avec la fonction associée à VISC.

## 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 Opérande MASS\_MOL

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

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

Chaleur massique à pression constante du vapeur.

### 9.5.4 Opérande VISC

Viscosité de la vapeur. Fonction de la température.

### 9.5.5 Opérande D\_VISC\_TEMP

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

Chaleur massique à pression constante de l'air dissous.

### 9.6.3 Opérande COEF\_HENRY

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 :

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

### 9.6.4 Opérande D\_VISC\_TEMP

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.

## 9.7 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]
    ♦ SATU_PRES          = sp , [fonction]
    ♦ D_SATU_PRES        = dsp , [fonction]
    ♦ PESA_X             = px , [R]
    ♦ PESA_Y             = py , [R]
    ♦ PESA_Z             = pz , [R]
    ♦ PERM_IN            = perm , [fonction]
    ♦ PERM_LIQU          = perml , [fonction]
    ♦ D_PERM_LIQU_SATU   = dperm , [fonction]
    ♦ PERM_GAZ           = permg , [fonction]
    ♦ D_PERM_SATU_GAZ    = dpsg , [fonction]
    ♦ D_PERM_PRES_GAZ    = dppg , [fonction]
    ♦ FICKV_T            = fvt , [fonction]
    ♦ FICKV_PV           = / fvpv , [fonction]
                        / 1 , [DEFAULT]
    ♦ FICKV_PG           = / fvpv , [fonction]
```

```

/ 1 , [DEFAULT]
◇ FICKV_S = / fvs , [fonction]
/ 1 , [DEFAULT]
◇ D_FV_T = / dfvt , [fonction]
/ 0 , [DEFAULT]
◇ D_FV_PG = / dfvgp , [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 = / dlams , [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]
)

```

## 9.7.2 Opérande R\_GAZ

Constante des gaz parfaits.

## 9.7.3 Opérande RHO

Pour les comportements hydrauliques masse volumique homogénéisée.

**Remarque :**

*Pour les modélisations faisant intervenir la thermique, on utilise aussi la masse volumique des grains solides, que l'on lit sous le mot clé *RHO* du mot clé facteur *ELAS*.*

## 9.7.4 Opérande CP

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

## 9.7.5 Opérande BIOT\_COEF

Coefficient de Biot.

### 9.7.6 Opérande SATU\_PRES

Pour les comportements de matériaux non saturés (LIQU\_VAPE\_GAZ, LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE, LIQU\_GAZ, LIQU\_GAZ\_ATM), isotherme de saturation fonction de la pression capillaire.

### 9.7.7 Opérande D\_SATU\_PRES

Pour les comportements de matériaux non saturés (LIQU\_VAPE\_GAZ, LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE, LIQU\_GAZ, LIQU\_GAZ\_ATM), dérivée de la saturation par rapport à la pression.

### 9.7.8 Opérande PESA\_X

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

### 9.7.9 Opérande PESA\_Y

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

### 9.7.10 Opérande PESA\_Z

Pesanteur selon z, utilisé uniquement si la modélisation choisie dans AFFE\_MODELE inclut 1 ou 2 variable d pression.

### 9.7.11 Opérande PERM\_IN

Perméabilité intrinsèque : fonction de la porosité.

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

$$K = \frac{K_{\text{int}} K_{\text{rel}}}{\mu} \rho_l g$$
 où  $K_{\text{int}}$  est la perméabilité intrinsèque,  $K_{\text{rel}}$  la perméabilité relative,  $\mu$  la viscosité,  $\rho_l$  la masse volumique du liquide et  $g$  l'accélération de la pesanteur.

### 9.7.12 Opérande PERM\_LIQU

Perméabilité relative au liquide : fonction de la saturation.

### 9.7.13 Opérande D\_PERM\_LIQU\_SATU

Dérivée de la Perméabilité relative au liquide par rapport à la saturation : fonction de la saturation.

### 9.7.14 Opérande PERM\_GAZ

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

### 9.7.15 Opérande D\_PERM\_SATU\_GAZ

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

**9.7.16 Opérande 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.

**9.7.17 Opérande FICKV\_T**

Pour les comportements *LIQU\_VAPE\_GAZ* et *LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE*, coefficient de Fick fonction de la température pour la diffusion de la vapeur dans le mélange gazeux. Le coefficient de Fick pouvant être fonction de la saturation, la température, la pression de gaz et la pression de vapeur, on le définit comme un produit de 4 fonctions : *FICKV\_T*, *FICKV\_S*, *FICKV\_PG*, *FICKV\_VP*. Dans le cas de *LIQU\_VAPE\_GAZ* et *LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE*, seul *FICKV\_T* est obligatoire.

**9.7.18 Opérande FICKV\_S**

Pour les comportements *LIQU\_VAPE\_GAZ* et *LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE*, coefficient de Fick fonction de la saturation pour la diffusion de la vapeur dans le mélange gazeux.

**9.7.19 Opérande FICKV\_PG**

Pour les comportements *LIQU\_VAPE\_GAZ* et *LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE*, coefficient de Fick fonction de la pression de gaz pour la diffusion de la vapeur dans le mélange gazeux.

**9.7.20 Opérande FICKV\_VP**

Pour les comportements *LIQU\_VAPE\_GAZ* et *LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE*, coefficient de Fick fonction de la pression de vapeur pour la diffusion de la vapeur dans le mélange gazeux.

**9.7.21 Opérande D\_FV\_T**

Pour les comportements *LIQU\_VAPE\_GAZ* et *LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE*, dérivée du coefficient *FICKV\_T* par rapport à la température.

**9.7.22 Opérande D\_FV\_PG**

Pour les comportements *LIQU\_VAPE\_GAZ* et *LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE*, dérivée du coefficient *FICKV\_PG* par rapport à la pression de gaz.

**9.7.23 Opérande FICKA\_T**

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.

**9.7.24 Opérande FICKA\_S**

Pour le comportement *LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE*, coefficient de Fick fonction de la saturation pour la diffusion de l'air dissous dans le mélange liquide.

**9.7.25 Opérande FICKA\_PA**

Pour le comportement *LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE*, coefficient de Fick fonction de la pression d'air dissous pour la diffusion de l'air dissous dans le mélange liquide.

### 9.7.26 Opérande FICKA\_PL

Pour le comportement LIQU\_AD\_GAZ\_VAPE, coefficient de Fick fonction de la pression de liquide pour la diffusion de l'air dissous dans le mélange liquide.

### 9.7.27 Opérande D\_FA\_T

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

### 9.7.28 Opérande LAMB\_T

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.

Cette opérande est obligatoire dans le cas thermique.

### 9.7.29 Opérande LAMB\_S

Pour le comportement THER\_POLY partie multiplicative (égale à 1 par défaut) de la conductivité thermique du mélange dépendant de la saturation (cf. [R7.01.11]).

### 9.7.30 Opérande LAMB\_PHI

Pour le comportement THER\_POLY partie multiplicative (égale à 1 par défaut) de la conductivité thermique du mélange dépendant de la porosité (cf. [R7.01.11]).

### 9.7.31 Opérande LAMB\_CT

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.

### 9.7.32 Opérande D\_LB\_T

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.

### 9.7.33 Opérande D\_LB\_S

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

### 9.7.34 Opérande D\_LB\_PHI

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

### 9.7.35 Opérande EMMAG

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

## 9.8 Mot clé facteur SURF\_ETAT\_SATU (cf. [R7.01.14])

### 9.8.1 Syntaxe

```
SURF_ETAT_SATU : (  
    ♦ E_CHAR      : Ec          [R]  
    ♦ E_DECHAR    : Edc         [R]  
    ◇ XN          : xn          [R]  
    ◇ RF          : rf          [R]  
    ◇ EV_KB       : evkb        [R]  
    ◇ EV_XM       : evxm        [R]  
    ◇ D_E_T       : det         [R]  
    ◇ ALPHA0      : a0          [R]  
    ◇ ALPHA1      : a1          [R]  
    ◇ ALPHA2      : a2          [R]  
    ◇ ALPHA3      : a3          [R]  
    ◇ ALPHA_S     : as          [R]  
    ♦ ANG_FRT     : ang         [R]  
    ♦ COHE        : co          [R]  
    ♦ RESI_TRAC   : rtrac       [R]  
)
```

### 9.8.2 Opérande E\_CHAR

Coefficient du module de chargement.  
Valeur recommandée en unité SI entre 50 et 500.

### 9.8.3 Opérande E\_DECHAR

Coefficient du module de déchargement.  
Valeur recommandée en unité SI entre 50 et 500.

### 9.8.4 Opérande EV\_KB

Coefficient du module de déformation volumique.  
Valeur recommandée en unité SI entre 100 et 1500.

### 9.8.5 Opérande RF

Coefficient de la loi hyperbolique.  
Valeur recommandée en unité SI entre 0,5 et 0,95.

### 9.8.6 Opérande XN

Exposant de la loi non linéaire (Dépendance du module au confinement).  
Valeur recommandée en unité SI entre 0 et 1.

### 9.8.7 Opérande EV\_XM

Exposant de la loi de surface d'état de l'indice des vides.  
Valeur recommandée en unité SI entre 0 et 1.

## 9.8.8 Opérande *D\_E\_T*

Variation du module d Young avec la température.  
Valeur recommandée en unité SI entre 1.E-4 et 1.E-5.

## 9.8.9 Opérande *ANG\_FRT*

Angle de frottement du sol.  
Valeur recommandée en unité SI entre 0 et 0,25 degrés.

## 9.8.10 Opérande *COHE*

Cohésion du sol.  
Valeur recommandée en unité SI entre 1 et 10 MPa.

## 9.8.11 Opérande *RESI\_TRAC*

Résistance en traction du sol.

## 9.8.12 Opérande *ALPHA0*

Constante pour la dépendance par rapport à la température de la surface d'état de l'indice des vides.

## 9.8.13 Opérande *ALPHA1*

Constante pour la dépendance par rapport à la température de la surface d'état de l'indice des vides.

## 9.8.14 Opérande *ALPHA2*

Constante pour la dépendance par rapport à la température de la surface d'état de l'indice des vides.

## 9.8.15 Opérande *ALPHA3*

Constante pour la dépendance par rapport à la température de la surface d'état de l'indice des vides.

## 9.8.16 Opérande *ALPHA\_S*

Coefficient de dilatation des grains solides.  
Valeur recommandée en unité SI entre 3.E-5 et 5.E-5.



## 9.9 Mot clé facteur SURF\_ETAT\_NSAT (cf. [R7.01.14])

### 9.9.1 Syntaxe

```
SURF_ETAT_NSAT : (
    ♦ E_CHAR      : Ec      [R]
    ♦ E_DECHAR    : Edc     [R]
    ◇ XN          : xn      [R]
    ◇ RF          : rf      [R]
    ◇ EV_KB       : evkb    [R]
    ◇ EV_XM       : evxm    [R]
    ◇ EV_A        : eva     [R]
    ◇ EV_B        : evb     [R]
    ◇ EV_CT       : evct    [R]
    ◇ EV_SIGB     : evsb    [R]
    ◇ D_E_T       : det     [R]
    ◇ D_E_SUCC    : des     [R]
    ♦ ANG_FRT     : ang     [R]
    ♦ COHE        : cohe    [R]
    ◇ D_COEH_SUCC : dcs     [R]
    ◇ ANG_FRT_ULT : afu     [R]
    ◇ SUCC_ULTM   : su      [R]
    ◇ RESI_TRAC   : rt      [R]
    ◇ A_SURF_SATU : a       [R]
    ◇ B_SURF_SATU : b       [R]
    ◇ C_SURF_SATU : c       [R]
    ◇ D_SURF_SATU : d       [R]
)
```

### 9.9.2 Opérande E\_CHAR

Coefficient du module de chargement.  
Valeur recommandée en unité SI entre 50 et 500.

### 9.9.3 Opérande E\_DECHAR

Coefficient du module de déchargement.  
Valeur recommandée en unité SI entre 50 et 500.

### 9.9.4 Opérande RF

Coefficient de la loi hyperbolique.  
Valeur recommandée en unité SI entre 0,5 et 0,95.

### 9.9.5 Opérande XN

Exposant de la loi non linéaire (Dépendance du module au confinement).  
Valeur recommandée en unité SI entre 0 et 1.

### 9.9.6 Opérande EV\_KB

Coefficient du module de déformation volumique.  
Valeur recommandée en unité SI entre 100 et 1500.

## 9.9.7 Opérande EV\_XM

Exposant de la loi de surface d'état de l'indice des vides.  
Valeur recommandée en unité SI entre 0 et 1.

## 9.9.8 Opérande EV\_A

Coefficient a de la surface d'indice des vides.

## 9.9.9 Opérande EV\_B

Coefficient b de la surface d'indice des vides.

## 9.9.10 Opérande EV\_CT

Coefficient c de la surface d'indice des vides.

## 9.9.11 Opérande EV\_SIGB

Coefficient sigma de la surface d'indice des vides.

## 9.9.12 Opérande D\_E\_T

Variation du module d'Young avec la température.  
Valeur recommandée en unité SI entre 1.E-4 et 1.E-5.

## 9.9.13 Opérande D\_E\_SUCC

Variation du module d'Young avec succion.

## 9.9.14 Opérande ANG\_FRT

Angle de frottement du sol.  
Valeur recommandée en unité SI entre 0 et 0,25 degrés.

## 9.9.15 Opérande ANG\_FRT\_ULT

Angle de frottement ultime.

## 9.9.16 Opérande COHE

Cohésion du sol.  
Valeur recommandée en unité SI entre 1 et 10 MPa.

## 9.9.17 Opérande D\_COEH\_SUCC

Variation de la cohésion avec la succion.

## 9.9.18 Opérande RESI\_TRAC

Résistance en traction du sol.

## 9.9.19 Opérande SUCC\_ULTM

Succion ultime.

## 9.9.20 Opérande A\_SURF\_SATU

Coefficient a de la surface d'état de saturation.

## 9.9.21 Opérande B\_SURF\_SATU

Coefficient b de la surface d'état de saturation.

## 9.9.22 Opérande C\_SURF\_SATU

Coefficient c de la surface d'état de saturation.

## 9.9.23 Opérande D\_SURF\_SATU

Coefficient c de la surface d'état de saturation.

## 9.10 Mot clé facteur CAM\_CLAY\_THM (cf. [R7.01.14])

### 9.10.1 Syntaxe

```
CAM_CLAY_THM : (  
    ◇ NU      : nu      [R]  
    ◆ LAMBDA  : lambda  [R]  
    ◆ KAPA    : kapa    [R]  
    ◇ M       : m       [R]  
    ◇ PRES_CRIT : pc     [R]  
    ◆ GAMA    : gama    [R]  
    ◆ A0_PC   : a0      [R]  
    ◇ A1_PC   : a1      [R]  
    ◇ A2_PC   : a2      [R]  
    ◇ ALPHA0_PC : a10    [R]  
    ◇ ALPHA1_PC : a11    [R]  
    ◇ ALPHA2_PC : a12    [R]  
    ◇ ALPHA3_PC : a13    [R]  
    ◇ ALPHA_S  : als     [R]  
    )
```

### 9.10.2 Opérande NU

Coefficient de Poisson.

### 9.10.3 Opérande LAMBDA

Pente de la droite de chargement.

Valeur recommandée en unité SI entre 0.1 et 0.4.

### 9.10.4 Opérande KAPA

Pente de la droite de déchargement.

Valeur recommandée en unité SI entre 0.01 et 1.

### 9.10.5 Opérande PRES\_CRIT

Pression critique effective.

### 9.10.6 Opérande m

Pente de la ligne d'état critique.

Valeur recommandée en unité SI entre 0.8 et 0.9.

### 9.10.7 Opérande GAMA

Ecs – 1

Ecs étant l'indice des vides pour 1 MPa de confinement.

La valeur recommandée pour Ecs en unité SI est entre 1 et 3.

### 9.10.8 Opérande A0\_PC

Coefficient de définition de la contrainte de préconsolidation Pc de la surface de charge.

## 9.10.9 Opérande A1\_PC

Coefficient de définition de la contrainte de préconsolidation Pc de la surface de charge.

## 9.10.10 Opérande A2\_PC

Coefficient de définition de la contrainte de préconsolidation Pc de la surface de charge.

## 9.10.11 Opérande ALPHA0\_PC

Coefficient de définition de la contrainte de préconsolidation Pc de la surface de charge.

## 9.10.12 Opérande ALPHA1\_PC

Coefficient de définition de la contrainte de préconsolidation Pc de la surface de charge.

## 9.10.13 Opérande ALPHA2\_PC

Coefficient de définition de la contrainte de préconsolidation Pc de la surface de charge.

## 9.10.14 Opérande ALPHA3\_PC

Coefficient de définition de la contrainte de préconsolidation Pc de la surface de charge.

## 9.10.15 Opérande ALPHA\_S

Coefficient de dilatation des grains solides.  
Valeur recommandée en unité SI entre 3.e-5 et 5.e-5.

## 9.11 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.

### 9.11.1 Syntaxe

```
CAM_CLAY = _F (
    ♦ LAMBDA = lambda , [R]
    ♦ KAPA = kapa , [R]
    ♦ M = m , [R]
    ♦ PORO = poro , [R]
    ♦ PRES_CRIT = prescr , [R]
    ♦ PA = pa , [R]
)
```

### 9.11.2 Opérandes **LAMBDA**

Coefficient de compressibilité (pente plastique dans un essai de compression hydrostatique).

### 9.11.3 Opérandes **KAPA**

Coefficient élastique de gonflement (pente élastique dans un essai de compression hydrostatique).

### 9.11.4 Opérandes **M**

Pente de la droite d'état critique.

### 9.11.5 Opérandes **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.

### 9.11.6 Opérandes **PRES\_CRIT**

La pression critique égale à la moitié de la pression de consolidation.

### 9.11.7 Opérandes **PA**

Pression initiale correspondante à la porosité initiale généralement égale à la pression atmosphérique.

## 9.12 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.*

### 9.12.1 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	GAMMA_CJS	BETA_CJS	RC	A_CJS
CJS1	F				O	O		
CJS2	F	F	O	O	O	O	O	O
CJS3	F		O	O	O	O	O	

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

## 9.12.2 Opérande BETA\_CJS

Pour niveaux CJS1, CJS2 CJS3.

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

## 9.12.3 Opérande RM

Pour niveaux CJS1, CJS2 CJS3.

Valeur maximale d'ouverture du domaine de réversibilité déviatoire.



**9.12.4 Opérande N\_CJS**

Pour niveaux CJS2 CJS3.

Contrôle la dépendance des module d'élasticité avec la contrainte moyenne.

$$K = K_o^e \left( \frac{I_1 + Q_{init}}{3 P_a} \right)^n \quad G = G_o \left( \frac{I_1 + Q_{init}}{3 P_a} \right)^n$$

**9.12.5 Opérande KP**

Pour niveaux CJS2 CJS3.

Module de compressibilité plastique.

$$\dot{Q}_{iso} = K^p \dot{q} = K_o^p \left( \frac{Q_{iso}}{P_a} \right)^n \dot{q}$$

**9.12.6 Opérande RC**

Pour niveaux CJS2 CJS3

Valeur critique de la variable R :

$$\dot{\varepsilon}_v^{dp} = -\beta \left( \frac{s_{II}}{s_{II}^c} - 1 \right) \frac{|s_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^{dp}|}{s_{II}}$$

$$s_{II}^c = -\frac{R_c I_1}{h(\theta_s)}$$

**9.12.7 Opérande A\_CJS**

Pour niveaux CJS2.

Contrôle l'écouissage isotrope du mécanisme déviatoire ;

$$R = \frac{A R_m r}{R_m + A r}$$

**9.12.8 Opérande R\_INIT**

Pour niveaux CJS2.

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`.

**9.12.9 Opérande B\_CJS**

Pour niveaux CJS3.

Contrôle l'écouissage cinématique du mécanisme déviatoire ;

$$\dot{X}_{ij} = -\frac{1}{b} \dot{\lambda}^d \left[ dev \left( \frac{\partial f^d}{\partial X_{ij}} \right) - I_1 \phi X_{ij} \right] \left( \frac{I_1}{3 P_a} \right)^{-1.5}$$

**9.12.10 Opérande C\_CJS**

Pour niveaux CJS3.

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

**9.12.11 Opérande PCO**

Pour niveaux CJS3.

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

**9.12.12 Opérande GAMMA\_CJS**

Pour niveaux CJS1 CJS2 CJS3.

Contrôle la forme du critère :

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

**9.12.13 Opérande MU\_CJS**

Pour niveaux CJS3.

Contrôle la valeur de rupture de la variable R.

$$R_r = R_c + \mu \ln\left(\frac{3 p_c}{I_1}\right)$$

**9.12.14 Opérande PA**

Pour niveaux CJS1 CJS2 CJS3.

pression atmosphérique. Doit être donnée négative.

**9.12.15 Opérande Q\_INIT**

Pour niveaux CJS1 CJS2 CJS3.

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 :

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

## 9.13 Mot clé facteur LAIGLE

La loi de LAIGLE [R7.01.15] est un modèle de comportement rhéologique pour la modélisation des roches. Celles-ci sont caractérisées par les trois paramètres suivants :

- « a » qui définit l'influence de la composante de dilatance dans le comportement aux grandes déformations. Ce paramètre dépend du niveau d'altération de la roche,
- « s » qui définit la cohésion du milieu. Il est donc représentatif de l'endommagement de la roche,
- « m » est fonction de la nature minéralogique de la roche, et est associé à un retour d'expérience important.

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

### 9.13.1 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]
)
```

### 9.13.2 Opérande GAMMA\_ULT

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

### 9.13.3 Opérande GAMMA\_E

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

### 9.13.4 Opérande M\_ULT

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

### 9.13.5 Opérande M\_E

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

**9.13.6 Opérande A\_E**

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

**9.13.7 Opérande M\_PIC**

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

**9.13.8 Opérande A\_PIC**

Paramètre  $a_{pic}$  : Valeur de l'exposant  $a$  au pic de contrainte.

**9.13.9 Opérande ETA**

Paramètre  $\eta$  : Exposant régulant l'écrouissage.

**9.13.10 Opérande SIGMA\_C**

Paramètre  $\sigma_c$  : Résistance en compression simple.

**9.13.11 Opérandes GAMMA et KSI**

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

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

**9.13.12 Opérande GAMMA\_CJS**

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

**9.13.13 Opérande SIGMA\_P1**

Paramètre  $\sigma_{p1}$  : Intersection du critère intermédiaire et du critère de pic.

**9.13.14 Opérande SIGMA\_P2**

Paramètre  $\sigma_{p2}$  : Intersection du critère intermédiaire et du critère ultime.

**9.13.15 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 :  $m_e = \frac{\sigma_c}{\sigma_{p1}} \left( m_{pic} \frac{\sigma_{p1}}{\sigma_c} + 1 \right)^{\frac{a_{pic}}{a_e}}$ . Cette dépendance est vérifiée au sein du code.

## 9.14 Mot clé facteur DRUCKER\_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 :

$$\sigma_{eq} + \alpha I_1 - R(p) \leq 0$$

où

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

$I_1 = Tr(\boldsymbol{\sigma}')$  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 :

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

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

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

### 9.14.1 Syntaxe

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

### 9.14.2 Opérande ECROUISSAGE

Permet de définir le type d'écrouissage souhaité.

### 9.14.3 Opérande 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 :  $\alpha = \frac{2 \cdot \sin(\varphi)}{3 - \sin(\varphi)}$ .

### 9.14.4 Opérande P\_ULTM

Désigne la déformation plastique cumulée ultime.

### 9.14.5 Opérande **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 :  $SY = \frac{6C \cos(\varphi)}{3 - \sin(\varphi)}$ .

### 9.14.6 Opérande **H**

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

### 9.14.7 Opérande **SY\_ULTM**

Désigne la contrainte ultime. Cette opérande est obligatoire pour un écrouissage de type parabolique (opérande *ECROUISSAGE* = 'PARABOLIQUE').

## 9.15 Mot clé facteur **BARCELONE**

Le modèle de Barcelone décrit le comportement élasto-plastique des sols non saturés couplé au comportement hydraulique (Cf. [R7.01.14] 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*.

### 9.15.1 Syntaxe

```
BARCELONE = _F (
    ♦ R          = r      ,          [R]
    ♦ BETA       = beta   ,          [R]
    ♦ KC         = kc     ,          [R]
    ♦ PCO_INIT   = Pc0(0) ,          [R]
    ♦ KAPAS      = Kappas ,          [R]
    ♦ LAMBDA     = Lambdas,          [R]
)
```

### 9.15.2 Opérandes **R, BETA**

Coefficients adimensionnels intervenant dans l'expression :  $\lambda(p_c) = \lambda(0)[(1-r)\exp(-\beta p_c) + r]$

### 9.15.3 Opérandes **KC**

Paramètre adimensionnel contrôlant l'augmentation de la cohésion avec la succion (pression capillaire).

### 9.15.4 Opérandes **PCO\_INIT**

Seuil initial de la pression capillaire (homogène à des contraintes)..

### 9.15.5 Opérandes **KAPAS**

Coefficient de rigidité adimensionnel associé au changement de succion dans le domaine élastique.

### 9.15.6 Opérandes **LAMBDA**

Coefficient de compressibilité lié à une variation de succion dans le domaine plastique. (adimensionnel).

## 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 :

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

avec

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

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

En ce qui concerne la flexion, les fonctions  $A_y(\chi_y^p)$  et  $A_z(\chi_z^p)$  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, il 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
- $\frac{4}{\pi}$  pour une section circulaire creuse
- $\frac{16}{3\pi}$  pour une section circulaire pleine.

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

$$\left| \begin{aligned} A_y(\chi_y^p) &= \frac{\left(\chi_y^p\right)^{\alpha_y} + \frac{\beta_y}{M_{ey}^2}}{\left(\chi_y^p\right)^{\alpha_y} + \beta_y} \\ A_z(\chi_z^p) &= \dots \end{aligned} \right.$$

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 , [R] ou [fonction**]
  )

```

## 10.2 Mot clé facteur ECRO\_FLEJOU

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

$$R(p) = S\sigma_L = S \left( \sigma_y + \frac{H_p \cdot p}{\left( 1 + \left( \frac{p}{\varepsilon_u} \right)^\alpha \right)^{\frac{1}{\alpha}}} \right) \quad \begin{array}{l} \text{avec } H = \frac{E \cdot E_p}{E - E_p} \\ \text{soit } E_p = \frac{E \cdot H}{E + H} \\ \text{Il faut donc respecter } E_p < E \end{array}$$

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

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 :

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

où :

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

$\dot{\varepsilon}_T^p$  : 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,
    ♦ SY_T          =  $\sigma_{YT}$ ,
    ♦ DC_SIGM_EPSI = RC,
    ♦ SY_C          =  $\sigma_{YC}$ ,
```

## 11 Comportements particuliers

### 11.1 Mot clé facteur GRAN\_IRRA

Caractéristiques de la loi de grandissement sous irradiation des assemblages combustibles (comportement *ASSE\_COMBU* de *STAT\_NON\_LINE*).

Ce mot-clé facteur s'utilise en lien (obligatoirement) avec les mots-clés facteur *LEMAITRE* et *FLU\_IRRA* (cf. [§4.9] et [§11.2] de ce document).

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  $\Phi$  est le flux neutronique et  $\int_0^t \Phi d\tau$  la fluence, récupérée dans *STAT\_NON\_LINE* par le mot-clé *IRRA* de *VARI\_COMM*.  $T$  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]) :

$$\varepsilon_g(t) = (aT + b) \cdot \left( \int_0^t \Phi d\tau \right)^s \varepsilon_g^0$$

$$\text{avec : } \varepsilon_g^0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}_{R_1}$$

On doit alors définir à l'aide de l'opérande *ANGLE\_REP* du mot clé *MASSIF* de l'opérateur *AFFE\_CARA\_ELEM* les axes locaux correspondant au repère  $R_1$  (voir [U4.42.01]). Cet opérande attend 3 angles nautiques dont on n'utilise que les 2 premiers (le troisième peut donc être quelconque).

#### 11.1.1 Syntaxe

```

◇ GRAN_IRRA = _F (
    ◇ A      = / a , [R]
                  / 0. , [DEFAULT]
    ◇ B      = / b , [R]
                  / 0. , [DEFAULT]
    ◇ S      = / s , [R]
                  / 0. , [DEFAULT]
)
```

## 11.2 Mot clé facteur *FLU\_IRRA*

Caractéristiques (spécifiques à l'irradiation) du fluage des crayons ou assemblages combustibles (comportement *ASSE\_COMBU* de *STAT\_NON\_LINE*).

Ce mot-clé facteur s'utilise en lien (obligatoirement) avec les mots-clés facteur *LEMAITRE* et *GRAN\_IRRA* (cf. [§4.11] et [§11.1] de ce document).

On renseigne les quatre mots-clés *QSR\_K*, *BETA*, *PHI\_ZERO*, *L* (les autres paramètres du fluage sont à donner sous *LEMAITRE*) et le comportement en fluage est alors suivant :

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

où  $\Phi$  est le flux neutronique calculé à partir de la fluence récupérée dans *STAT\_NON\_LINE* par l'opérande *IRRA* du mot-clé *VARI\_COMM* (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 *ASSE\_COMBU* dans *STAT\_NON\_LINE* en renseignant les mots-clés *LEMAITRE*, *GRAN\_IRRA* et *FLU\_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.

### 11.2.1 Syntaxe

```

◇  FLU_IRRA  =  _F  (
                                ◇  QSR_K      =  /  Q/R ,      [R]
                                /  0. ,      [DEFAULT]
                                ◇  BETA        =  /  β ,      [R]
                                /  0. ,      [DEFAULT]
                                ◇  PHI_ZERO    =  /  Φ0 ,      [R]
                                /  0. ,      [DEFAULT]
                                ◇  L           =  /  L ,      [R]
                                /  0. ,      [DEFAULT]
                                )

```

## 11.3 Mot clé facteur DIS\_CONTACT

Ce mot clé permet de définir les paramètres associés aux comportements non linéaires de contact ou choc avec frottement associés aux éléments discrets (cf. [R5.03.17]). Les comportements utilisables dans les commandes STAT\_NON\_LINE et DYNA\_NON\_LINE à partir de ces paramètres sont :

- DIS\_CONTACT : comportement s'appuyant sur un élément discret à 2 nœuds (modélisations DIS\_T et DIS\_TR) :
  - 1) contact avec frottement de Coulomb pour les degrés de translation,
  - 2) relation de comportement de type élastoplastique pour les degrés de rotation
- DIS\_CHOC : choc avec frottement de Coulomb s'appuyant sur un élément discret à 1 ou 2 nœuds (modélisations DIS\_T ou DIS\_TR s'appuyant sur des mailles POI1 ou SEG2).

### 11.3.1 Syntaxe

```

◇ DIS_CONTACT = _F (
% Comportement 'DIS_CHOC'
    ◇ RIGI_NOR      = Kn,           [R]
    ◇ DIST_1       = / dist1,      [R]
                      / 0,         [DEFAULT]
    ◇ DIST_2       = / dist2,      [R]
                      / 0,         [DEFAULT]
    ◇ RIGI_TAN      = / Kt,         [R]
                      / 0,         [DEFAULT]
    ◇ AMOR_NOR      = / Cn,         [R]
                      / 0,         [DEFAULT]
    ◇ AMOR_TAN      = / Ct,         [R]
                      / 0,         [DEFAULT]
    ◇ COULOMB       = / mu,         [R]
                      / 0,         [DEFAULT]
    ◇ JEU           = / d0,         [R]
                      / 0,         [DEFAULT]

% Comportement 'DIS_CONTACT'
    ◇ COULOMB       = / mu,         [R]
                      / 0,         [DEFAULT]
    ◇ KT_ULTM       = / ktu,        [R]
                      / 0,         [DEFAULT]
    ◇ EFFE_N_INIT = Fini,          [R]
    / ◇ RIGI_N_FO   = Fn,(t)        [fonction+]
    / ◇ RIGI_N_IRRA=FF,(fluence) [fonction]
    ◇ / RELA_MZ     = f_mz,         [fonction]
      / ANGLE_1     = a1,           [fonction]
      ANGLE_2      = a2,           [fonction]
      ANGLE_3      = a3,           [fonction]
      ANGLE_4      = a4,           [fonction]
      MOMENT_1     = m1,           [fonction]
      MOMENT_2     = m2,           [fonction]
      MOMENT_3     = m3,           [fonction]
      MOMENT_4     = m4,           [fonction]
    ◇ C_PRAGER_MZ  = / Cpr,        [R]
                      / 0,         [DEFAULT]
)
```

### 11.3.2 Opérandes

#### Comportement 'DIS\_CONTACT' :

##### Comportement concernant les degrés de liberté de translation

COULOMB =  $\mu$

Valeur du coefficient de frottement.

EFFO\_N\_INIT =  $F_{ni}$

Effort normal initial dans le ressort (en général négatif, pour qu'il y ait contact à l'instant initial).

KT\_ULTM =  $k_t u$

Pente de régularisation qui simule un glissement non parfait.

RIGI\_N\_FO =  $F_n(t)$

Fonction multiplicatrice (dépendant du temps) de la rigidité, en général décroissante avec le temps, pour simuler l'effet de l'irradiation sur la rigidité du ressort.

RIGI\_N\_IRRA =  $FF(\text{fluence})$

Fonction multiplicatrice (dépendant de la fluence) de la rigidité, en général décroissante avec la fluence, pour simuler l'effet de l'irradiation sur la rigidité du ressort. Pour définir cette fonction, il faut utiliser la commande DEFI\_FONCTION et prendre par exemple comme NOM\_PARA, 'INST' : pour l'instant la fluence ne fait pas partie des NOM\_PARA possibles.

##### Comportement concernant les degrés de liberté de rotation

RELA\_MZ =  $f_{mz}$

Courbe M (moment) en fonction de  $\Delta DR$  (degré de rotation)

ANGLE\_1 =  $a_1$ , MOMENT\_1 =  $m_1$ ,  
ANGLE\_2 =  $a_2$ , MOMENT\_2 =  $m_2$ ,  
ANGLE\_3 =  $a_3$ , MOMENT\_3 =  $m_3$ ,  
ANGLE\_4 =  $a_4$ , MOMENT\_4 =  $m_4$ ,

Définition de la courbe moment-angle de la caractéristique en rotation de la liaison grille-crayon, les 2 paramètres moment et angle dépendent de la température et de la fluence.

C\_PRAGER\_MZ =  $c_{pr}$

Constante de Prager qui permet de définir l'écrouissage mixte.

#### Comportement 'DIS\_CHOC' :

COULOMB =  $\mu$

Valeur du coefficient de frottement

RIGI\_NOR =  $K_n$

Valeur de la rigidité normale du choc

RIGI\_TAN =  $K_t$

Valeur de la rigidité tangentielle de choc

AMOR\_NOR =  $C_n$

Valeur de l'amortissement normal de choc

AMOR\_TAN =  $C_t$

Valeur de l'amortissement tangentiel de choc

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).

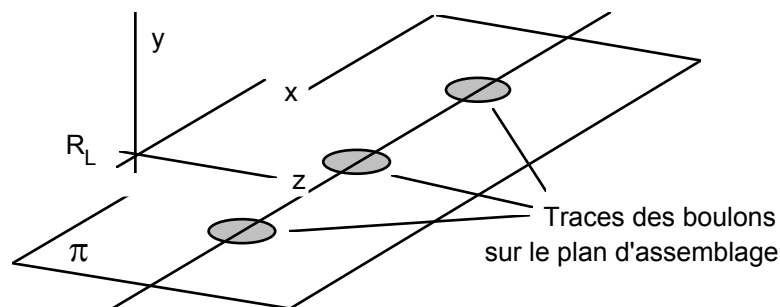
## 11.4 Mot clé facteur ASSE\_CORN : comportement d'un assemblage boulonné

### 11.4.1 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]
| )
```

### 11.4.2 Opérandes

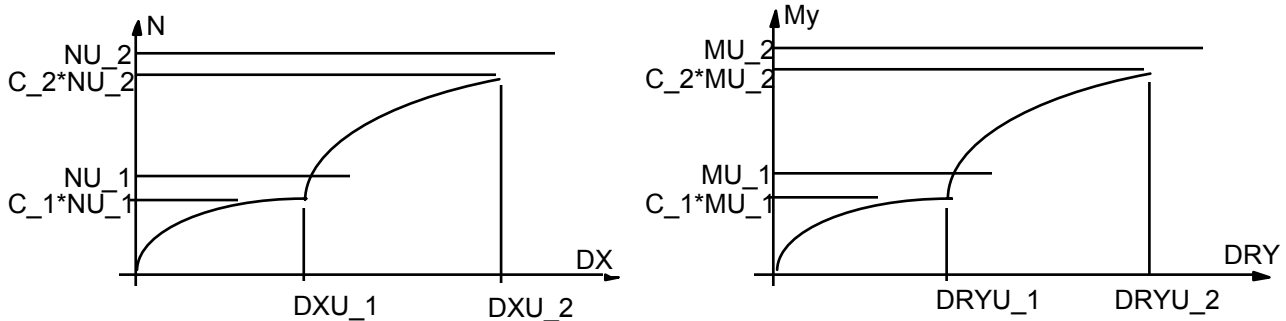
Sur la figure suivante, le plan  $\pi$  représente le plan de l'assemblage. L'axe des boulons est perpendiculaire à ce plan. Le lecteur se reportera à [U4.42.01] *AFFE\_CARA\_ELEM* pour l'orientation du repère  $R_L$  définissant le plan de l'assemblage.



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

## 11.5 Mot clé facteur ARME : 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  $d_{le}$ .

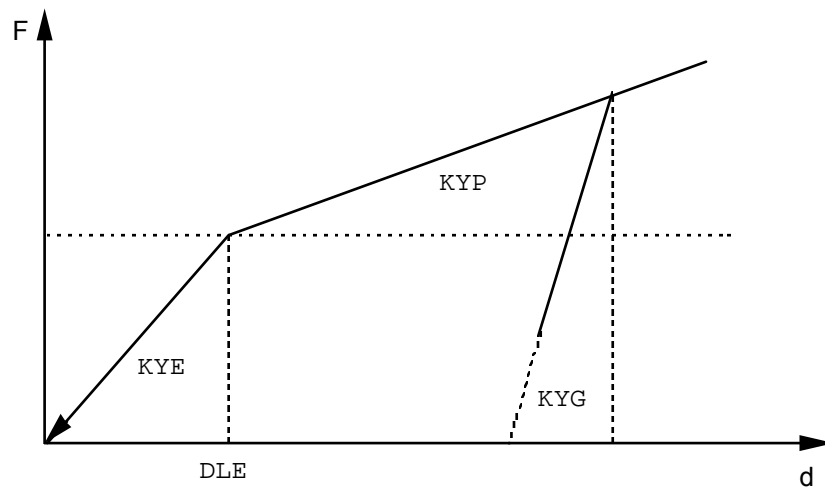
### 11.5.1 Syntaxe

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



### 11.5.2 Opérande

- ♦  $KYE = k_{ye}$   
Pente élastique jusqu'à un effort limite.
- ♦  $DLE = d_{le}$   
Déplacement limite de la déformation élastique.
- ♦  $KYP = k_{yp}$   
Pente plastique jusqu'au déplacement limite DLP.
- ♦  $DLP = d_{lp}$   
Déplacement limite de la déformation plastique 0.
- ♦  $KYG = k_{yg}$   
Pente de décharge.



## 12 Comportement fluide

### 12.1 Mot clé facteur FLUIDE

| 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 Opérandes

♦ RHO = rho

Masse volumique du fluide. Pas de vérification.

◇ / 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].

#### 13.1.1 Syntaxe

```

◇  FATIGUE = _F (
    [fonction]      ◇  /  ◆  WOHLER                =  f_wohl ,
                    /  ◆  A_BASQUIN                =  a    ,          [R]
                    /  ◆  BETA_BASQUIN             =  β    ,          [R]
                    /  ◆  A0                       =  a0   ,          [R]
                    /  ◆  A1                       =  a1   ,          [R]
                    /  ◆  A2                       =  a2   ,          [R]
                    /  ◆  A3                       =  a3   ,          [R]
                    /  ◆  SL                       =  SL   ,          [R]
    [fonction]      ◇  MANSON_COFFIN              =  f_mans ,
                    ◇  E_REFE                     =  Ec   ,          [R]
                    ◇  D0                         =  d0   ,          [R]
                    ◇  TAU0                      =  τ0   ,          [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].

$$D = A \text{Salt}^\beta$$

où

A et  $\beta$  sont deux constantes du matériau,

$$\text{Salt} = \text{contrainte alternée du cycle} = \frac{\Delta\sigma}{2},$$

et D le dommage élémentaire.

**Remarque :**

*Attention, dans le logiciel POSTDAM, on donne les constantes A et  $\beta$  pour  $D = A\Delta\sigma^\beta$  ce qui n'est pas homogène avec les 2 autres expressions mathématiques de la courbe de Wöhler.*

**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].

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

$$x = \log_{10}(\text{Salt})$$

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

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

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 = Ec`

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 Opérande **D0**

◇ `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].

### 13.1.8 Opérande **TAU0**

◇ `TAU0 = τ0`

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**

◇ `DOMMA_LEMAITRE = _F (`

◆ <code>S = s,</code>	<code>[fonction**]</code>
◆ <code>EPSP_SEUIL = pd,</code>	<code>[fonction**]</code>
◇ <code>EXP_S = / pd,</code>	<code>[R]</code>
	<code>/ 1.0,</code>
	<code>[DEFAULT]</code>

`)`

Sous ce mot clé facteur sont regroupées toutes les caractéristiques matériau nécessaires au calcul du dommage de Lemaitre et la loi de Lemaitre-Sermage.

### 13.2.1 Opérande **s**

◆ `S = s`

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

### 13.2.2 Opérande **EPSP\_SEUIL**

◆ `EPSP_SEUIL = pd`

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

### 13.2.3 Opérande **EXP\_S**

◆ `EXP_S = exp`

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

```
◇ CISA_PLAN_CRIT = _F (
                                ♦ MATAKE_A = a,                [R]
                                ♦ MATAKE_B = b,                [R]
                                ♦ ENDU_FT = endu_ft,           [R]
                                )
```

Sous ce mot clé facteur sont regroupées toutes les caractéristiques matériau nécessaires à la mise en œuvre des critères avec plans critiques.

### 13.3.1 Opérande MATAKE\_A

```
◇ MATAKE_A = a,
```

Permet de spécifier la valeur du coefficient sans dimension *a*, présent dans le critère de MATAKE, cf. [R7.04.01] et [U4.83.02].

### 13.3.2 Opérande MATAKE\_B

```
◇ MATAKE_B = b,
```

Permet de spécifier la valeur du coefficient *b*, présent dans le critère de MATAKE, cf. [R7.04.01] et [U4.83.02].

### 13.3.3 Opérande ENDU\_FT

```
◇ ENDU_FT = endu_ft,
```

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  $\sqrt{3}$ .

## 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 :

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

avec :

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

$\dot{p}$  désignant le taux de déformation plastique cumulée.

Enfin, si la contrainte de clivage dépend de la température (WEIBULL\_FO) :

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

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

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

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

### 13.4.1 Syntaxe

```

| WEIBULL = _F (
    ♦ M = m , [R]
    ♦ SIGM_REFE = sigma_u , [R]
    ♦ VOLU_REFE = V0 , [R]
    ♦ SEUIL_EPSP_CUMU = / ps , [R]
    / 10-6, [DEFAULT]
)
| WEIBULL_FO = _F (
    ♦ M = m , [R]
    ♦ SIGM_REFE = sigma_u ,
[fonction]
    ♦ SIGM_CNV = sigma_0u , [R]
    ♦ VOLU_REFE = V0 , [R]
    ♦ SEUIL_EPSP_CUMU = / ps , [R]
    / 10-6, [DEFAULT]
)
    
```

### 13.4.2 Opérandes

- ♦  $M = m$ , SIGM\_REFE :  $\sigma_u$ , SIGM\_CNV :  $\sigma_{0u}$ , VOLU\_REFE :  $V_0$   
Paramètres associés au modèle de Weibull.
- ♦ SEUIL\_EPSP\_CUMU =  $p_s$   
Déformation plastique cumulée.

## 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 = sigm ,           [R]
                 ♦ SM     = sigm ,           [R]
                 ♦ SU     = sigm ,           [R]
                 ♦ SC     = sigm ,           [R]
                 ♦ SH     = sigm ,           [R]
                 ♦ N_KE   = h ,             [R]
                 ♦ M_KE   = m ,             [R]
                 )
/ RCCM_FO = _F ( ♦ SY_02 = sigm ,           [fonction]
                 ♦ SM     = sigm ,           [fonction]
                 ♦ SU     = sigm ,           [fonction]
                 ♦ S      = sigm ,           [fonction]
                 ♦ N_KE   = h ,             [fonction]
                 ♦ M_KE   = m ,             [fonction]
                 )
```



**13.5.2 Opérande sy\_02**

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 Opérande sm**

Contrainte équivalente admissible du matériau à la température de calcul. Cet opérande peut varier en fonction de la température.

**13.5.4 Opérande su**

Résistance à la traction du matériau à la température de calcul. Cet opérande peut varier en fonction de la température.

**13.5.5 Opérande sc**

Contrainte admissible du matériau à la température ambiante, cf. RCCM.

**13.5.6 Opérande sh**

Contrainte admissible du matériau à la température maximale, cf. RCCM.

**13.5.7 Opérande s**

Contrainte admissible du matériau. Cet opérande varie en fonction de la température, cf. RCCM.

**13.5.8 Opérande N\_KE\_RCCM / M\_KE\_RCCM**

- ♦ N\_KE\_RCCM = n
- ♦ M\_KE\_RCCM = 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.

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

Page laissée intentionnellement blanche.