

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	12
3 Comportements élastiques généraux	15
3.1 Mots clés facteur ELAS / ELAS_FO	15
3.1.1 Syntaxe	15
3.1.2 Opérandes E / NU	15
3.1.3 Opérande RHO	15
3.1.4 Opérandes ALPHA / TEMP_DEF_ALPHA / PRECISION	16
3.1.5 Opérandes AMOR_ALPHA / AMOR_BETHA / AMOR_HYST	17
3.1.6 Opérandes K_DESSIC / B_ENDOGE	17
3.1.7 Opérande FONC_DESORP	17
3.2 Mot clé facteur ELAS_FLUI	17
3.2.1 Syntaxe	18
3.2.2 Opérande ELAS_FLUI	18
3.3 Mot clé facteur APPUI_ELAS	19
3.4 Mot clé facteur CABLE	19
3.4.1 Syntaxe	19
3.4.2 Opérandes d'élasticité	19
3.4.3 Opérande de masse	20
3.4.4 Opérande de dilatation	20
3.4.5 Opérandes d'amortissement	20
3.5 Mots clés facteur ELAS_ORTH / ELAS_ORTH_FO	21
3.5.1 Syntaxe	21
3.5.2 Opérandes d'élasticité	22
3.5.3 Opérande RHO	23
3.5.4 Opérandes ALPHA_L / ALPHA_T / ALPHA_N	23
3.5.5 Opérandes TEMP_DEF_ALPHA / PRECISION	23
3.5.6 Critères de rupture	23
3.6 Mots clés facteur ELAS_ISTR / ELAS_ISTR_FO	24
3.6.1 Syntaxe	24
3.6.2 Opérandes d'élasticité	25
3.6.3 Opérande RHO	26
3.6.4 Opérandes ALPHA_L / ALPHA_N	26
3.6.5 Opérandes TEMP_DEF_ALPHA / PRECISION	26
3.7 Mots clés facteur ELAS_COQUE / ELAS_COQUE_FO	27
3.7.1 Syntaxe	27
4 Comportements mécaniques non linéaires généraux	29
4.1 Mot clé facteur TRACTION	29
4.1.1 Syntaxe	29

4.1.2 Opérande SIGM.....	29
4.2 Mots clés facteur ECRO_LINE / ECRO_LINE_FO.....	29
4.2.1 Syntaxe	29
4.2.2 Opérands	29
4.3 Mots clés facteur PRAGER / PRAGER_FO.....	30
4.3.1 Syntaxe	30
4.4 Mot clé CHABOCHE.....	31
4.4.1 Syntaxe	31
4.5 Mots clés facteur CIN1_CHAB / CIN1_CHAB_FO.....	32
4.5.1 Syntaxe	32
4.6 Mots clés facteur CIN2_CHAB / CIN2_CHAB_FO.....	33
4.6.1 Syntaxe	34
4.7 Mots clés facteur TAHERI / TAHERI_FO.....	34
4.7.1 Syntaxe	35
4.8 Mots clés OHNO / OHNO_FO	35
4.8.1 Syntaxe	36
4.9 Mot clé facteur POLY_CFC / POLY_CFC_FO.....	37
4.9.1 Syntaxe	38
4.10 Mots clés VISCOCHAB / VISCOCHAB_FO	39
4.10.1 Syntaxe	40
4.11 Mots clés facteur LEMAITRE / LEMAITRE_FO.....	41
4.11.1 Syntaxe	41
4.12 Mot clé facteur ZIRC_CYRA2	42
4.12.1 Syntaxe	42
4.13 Mot clé facteur ZIRC_EPRI	42
4.13.1 Syntaxe	43
4.14 Mots clés facteur LMARC / LMARC_FO.....	44
4.14.1 Syntaxe	44
5 Comportements liés à l'endommagement et la rupture	45
5.1 Mots clés facteur ROUSSELIER / ROUSSELIER_FO	45
5.1.1 Syntaxe	46
5.2 Mot clé facteur ROUSS_VISC	47
5.2.1 Syntaxe	47
5.3 Mots clés VENDO_CHAB / VENDO_CHAB_FO	48
5.3.1 Syntaxe	48
5.4 Mot clé facteur NON_LOCAL	50
5.4.1 Syntaxe	50
5.4.2 Opérands LONG_CARA / COEF_RIGI_MINI	50
5.5 Mot clé facteur RUPT_FRAG	50
5.5.1 Syntaxe	50
5.5.2 Opérande RUPT_FRAG.....	50

5.5.3 Opérande SIGM_C.....	50
5.5.4 Opérande SAUT_C.....	50
6 Comportements thermiques	51
6.1 Mots clés facteur THER / THER_FO.....	51
6.1.1 Syntaxe.....	51
6.1.2 Opérandes LAMBDA / RHO_CP.....	51
6.2 Mot clé facteur THER_ORTH.....	51
6.2.1 Syntaxe.....	51
6.2.2 Opérandes LAMBDA / RHO_CP	52
6.3 Mot clé facteur THER_NL (cf. [R5.02.02])	52
6.3.1 Syntaxe.....	52
6.3.2 Opérandes BETA / LAMBDA / RHO_CP	52
6.4 Mots clés facteur THER_COQUE / THER_COQUE_FO	52
6.4.1 Syntaxe.....	53
6.4.2 Opérandes COND_LMM / COND_LMP / COND_LPP / COND_LSI / COND_TMM / COND_TMP / COND_TPP / COND_TSI.....	53
6.4.3 Opérandes COND_NMM / COND_NMP / COND_NPP / COND_NSI.....	54
6.4.4 Opérandes CMAS_MM / CMAS_MP / CMAS_PP / CMAS_SI	54
7 Comportements spécifiques aux bétons	55
7.1 Mot clé facteur THER_HYDR.....	55
7.1.1 Syntaxe.....	55
7.1.2 Opérandes LAMBDA / BETA	55
7.1.3 Opérande AFFINITE	55
7.1.4 Opérande CHAL_HYDR.....	55
7.1.5 Opérande QSR_K.....	55
7.2 Mot clé facteur SECH_GRANGER	56
7.2.1 Syntaxe.....	56
7.2.2 Opérandes A / B / QSR_K / TEMP_0_C.....	56
7.3 Mot clé facteur SECH_MENSI.....	57
7.3.1 Syntaxe.....	57
7.3.2 Opérandes A / B	57
7.4 Mot clé facteur SECH_BAZANT	58
7.4.1 Syntaxe.....	58
7.4.2 Opérandes D1 / ALPHA_BAZANT / N / FONC_DESORP.....	58
7.5 Mot clé facteur SECH_NAPPE.....	59
7.5.1 Syntaxe.....	59
7.5.2 Opérande FONCTION	59
7.6 Mot clé facteur PINTO_MENEGOTTO.....	59
7.6.1 Syntaxe.....	61
7.6.2 Opérandes.....	61
7.7 Mots clés facteur BPEL_BETON / BPEL_ACIER.....	63

7.7.1 Syntaxe	63
7.7.2 Opérandes	63
7.8 Mot clé facteur <i>BETON_DOUBLE_DP</i>	64
7.8.1 Syntaxe	64
7.8.2 Opérandes <i>F_C / F_T / COEF_BIAX</i>	65
7.8.3 Opérandes <i>ENER_COMP_RUPT / ENER_TRAC_RUPT / COEF_ELAS_COMP</i>	65
7.8.4 Opérandes <i>LONG_CARA</i>	65
7.8.5 Opérandes <i>COMP_POST_PIC / TRAC_POST_PIC</i>	66
7.9 Mot clé facteur <i>GRANGER_FP / V_GRANGER_FP</i>	67
7.9.1 Syntaxe pour le fluage propre	67
7.9.2 Opérandes pour le fluage propre	68
7.9.3 Syntaxe pour le vieillissement	68
7.9.4 Opérandes pour le vieillissement	68
7.10 Mot clé <i>NADAI_B</i>	69
7.10.1 Syntaxe	70
7.10.2 Opérandes <i>F_C / F_T</i>	70
7.10.3 Opérande <i>CRIT_E_C</i>	70
7.10.4 Opérandes <i>EPS_P_C / EPS_R_C / EPSI_R_T</i>	70
7.10.5 Opérande <i>FAC_T_C</i>	70
7.11 Mot clé facteur <i>BAZANT_FD</i>	70
7.11.1 Syntaxe	70
7.11.2 Opérande	70
7.12 Mot clé <i>LABORD_1D</i>	71
7.12.1 Syntaxe	71
7.12.2 Opérandes	71
7.13 Mot clé facteur <i>MAZARS / MAZARS_FO</i>	72
7.13.1 Syntaxe	72
7.13.2 Opérandes <i>EPSD0</i>	72
7.13.3 Opérandes <i>AC / AT / BC / BT</i>	72
7.13.4 Opérande <i>BETA</i>	73
7.14 Mot clé <i>BETON_UMLV_FP</i>	73
7.14.1 Syntaxe	74
7.14.2 Opérande	74
7.15 Mots clés facteur <i>BETON_ECRO_LINE</i>	75
7.15.1 Syntaxe	75
7.15.2 Opérandes	75
8 Comportements Méta-Mécaniques	76
8.1 Mot clé facteur <i>META_ACIER</i>	76
8.1.1 Syntaxe	76
8.1.2 Opérandes pour les changements de phases	76
8.1.3 Opérandes pour la taille de grains	78

8.2 Mot clé facteur <i>META_ZIRC</i>	79
8.2.1 Syntaxe.....	79
8.2.2 Opérandes.....	79
8.3 Mot clé facteur <i>DURT_META</i>	80
8.3.1 Syntaxe.....	80
8.3.2 Opérandes.....	80
8.4 Mots clés facteur <i>ELAS_META</i> / <i>ELAS_META_FO</i>	81
8.4.1 Syntaxe.....	81
8.4.2 Opérandes.....	82
8.5 Mot clé facteur <i>META_ECRO_LINE</i>	84
8.5.1 Syntaxe.....	84
8.5.2 Opérandes.....	84
8.6 Mot clé facteur <i>META_TRACTION</i>	85
8.6.1 Syntaxe.....	85
8.6.1.1 Opérandes	85
8.7 Mot clé facteur <i>META_VISC</i>	86
8.7.1 Syntaxe.....	86
8.7.2 Opérandes.....	86
8.8 Mot clé facteur <i>META_PT</i>	88
8.8.1 Syntaxe.....	88
8.8.2 Opérandes.....	88
8.9 Mot clé facteur <i>META_RE</i>	89
8.9.1 Syntaxe.....	89
8.9.2 Opérandes.....	89
9 Comportements THERMO-HYDRO-MECANQUES et des sols	90
9.1 Mot clé simple <i>COMP_THM</i>	90
9.1.1 Syntaxe.....	91
9.2 Mot clé facteur <i>THM_INIT</i>	91
9.2.1 Syntaxe.....	91
9.2.2 Opérande <i>TEMP</i>	92
9.2.3 Opérande <i>PRE1</i>	92
9.2.4 Opérande <i>PRE2</i>	92
9.2.5 Opérande <i>PORO</i>	92
9.2.6 Opérande <i>PRES_VAPE</i>	92
9.2.7 Opérande <i>DEGR_SATU</i>	92
9.3 Mot clé facteur <i>THM_LIQU</i>	93
9.3.1 Syntaxe.....	93
9.3.2 Opérande <i>RHO</i>	93
9.3.3 Opérande <i>UN_SUR_K</i>	93
9.3.4 Opérande <i>ALPHA</i>	93
9.3.5 Opérande <i>CP</i>	93

9.3.6 Opérande VISC	93
9.3.7 Opérande D_VISC_TEMP	93
9.3.8 Opérande LAMBDA	93
9.3.9 Opérande D_LAMBDA_TEMP	94
9.4 Mot clé facteur THM_GAZ	94
9.4.1 Syntaxe	94
9.4.2 Opérande MASS_MOL	94
9.4.3 Opérande CP	94
9.4.4 Opérande VISC	94
9.4.5 Opérande D_VISC_TEMP	95
9.4.6 Opérande LAMBDA	95
9.4.7 Opérande D_LAMBDA_TEMP	95
9.5 Mot clé facteur THM_VAPE_GAZ	95
9.5.1 Syntaxe	95
9.5.2 Opérande MASS_MOL	95
9.5.3 Opérande CP	95
9.5.4 Opérande VISC	95
9.5.5 Opérande D_VISC_TEMP	95
9.6 Mot clé facteur THM_DIFFU	96
9.6.1 Syntaxe	96
9.6.2 Opérande R_GAZ	96
9.6.3 Opérande RHO	96
9.6.4 Opérande CP	97
9.6.5 Opérande BIOT_COEF	97
9.6.6 Opérande SATU_PRES	97
9.6.7 Opérande D_SATU_PRES	97
9.6.8 Opérande PESA_X	97
9.6.9 Opérande PESA_Y	97
9.6.10 Opérande PESA_Z	97
9.6.11 Opérande PERM_IN	97
9.6.12 Opérande PERM_LIQU	97
9.6.13 Opérande D_PERM_LIQU_SATU	97
9.6.14 Opérande PERM_GAZ	97
9.6.15 Opérande D_PERM_SATU_GAZ	97
9.6.16 Opérande D_PERM_PRES_GAZ	98
9.6.17 Opérande FICK	98
9.6.18 Opérande D_FICK_TEMP	98
9.6.19 Opérande D_FICK_GAZ_PRES	98
9.6.20 Opérande LAMBDA	98
9.6.21 Opérande D_LAMBDA_TEMP	98

9.7 Mot clé facteur SURF_ETAT_SATU (cf. [R7.01.14]).....	99
9.7.1 Syntaxe.....	99
9.7.2 Opérande E_CHAR.....	99
9.7.3 Opérande E_DECHAR	99
9.7.4 Opérande EV_KB.....	99
9.7.5 Opérande RF	99
9.7.6 Opérande XN	99
9.7.7 Opérande EV_XM.....	99
9.7.8 Opérande D_E_T.....	100
9.7.9 Opérande ANG_FRT	100
9.7.10 Opérande COHE.....	100
9.7.11 Opérande RESI_TRAC.....	100
9.7.12 Opérande ALPHA0	100
9.7.13 Opérande ALPHA1	100
9.7.14 Opérande ALPHA2	100
9.7.15 Opérande ALPHA3	100
9.7.16 Opérande ALPHA_S	100
9.8 Mot clé facteur SURF_ETAT_NSAT (cf. [R7.01.14]).....	101
9.8.1 Syntaxe.....	101
9.8.2 Opérande E_CHAR.....	101
9.8.3 Opérande E_DECHAR	101
9.8.4 Opérande RF	101
9.8.5 Opérande XN	101
9.8.6 Opérande EV_KB.....	101
9.8.7 Opérande EV_XM.....	102
9.8.8 Opérande EV_A.....	102
9.8.9 Opérande EV_B.....	102
9.8.10 Opérande EV_CT	102
9.8.11 Opérande EV_SIGB	102
9.8.12 Opérande D_E_T	102
9.8.13 Opérande D_E_SUCC.....	102
9.8.14 Opérande ANG_FRT	102
9.8.15 Opérande ANG_FRT_ULT	102
9.8.16 Opérande COHE	102
9.8.17 Opérande D_COEH_SUCC	102
9.8.18 Opérande RESI_TRAC.....	102
9.8.19 Opérande SUCC_ULTM.....	102
9.8.20 Opérande A_SURF_SATU	103
9.8.21 Opérande B_SURF_SATU	103
9.8.22 Opérande C_SURF_SATU	103

9.8.23	Opérande D_SURF_SATU	103
9.9	Mot clé facteur CAM_CLAY_THM (cf. [R7.01.14])	104
9.9.1	Syntaxe	104
9.9.2	Opérande NU	104
9.9.3	Opérande LAMBDA	104
9.9.4	Opérande KAPA	104
9.9.5	Opérande PRES_CRIT	104
9.9.6	Opérande M	104
9.9.7	Opérande GAMA	104
9.9.8	Opérande A0_PC	104
9.9.9	Opérande A1_PC	105
9.9.10	Opérande A2_PC	105
9.9.11	Opérande ALPHA0_PC	105
9.9.12	Opérande ALPHA1_PC	105
9.9.13	Opérande ALPHA2_PC	105
9.9.14	Opérande ALPHA3_PC	105
9.9.15	Opérande ALPHA_S	105
9.10	Mot clé CAM_CLAY	106
9.10.1	Syntaxe	106
9.10.2	Opérandes LAMBDA	106
9.10.3	Opérandes KAPA	106
9.10.4	Opérandes M	106
9.10.5	Opérandes PORO	106
9.10.6	Opérandes PRES_CRIT	106
9.10.7	Opérandes PA	106
9.11	Mot clé facteur CJS	107
9.11.1	Syntaxe	107
9.11.2	Opérande BETA_CJS	108
9.11.3	Opérande RM	108
9.11.4	Opérande N_CJS	109
9.11.5	Opérande KP	109
9.11.6	Opérande RC	109
9.11.7	Opérande A_CJS	109
9.11.8	Opérande R_INIT	109
9.11.9	Opérande B_CJS	109
9.11.10	Opérande C_CJS	110
9.11.11	Opérande PCO	110
9.11.12	Opérande GAMMA_CJS	110
9.11.13	Opérande MU_CJS	110
9.11.14	Opérande PA	110

9.11.15	Opérande Q_INIT	110
9.12	Mot clé facteur LAIGLE	111
9.12.1	Syntaxe	111
9.12.2	Opérande GAMMA_ULT	111
9.12.3	Opérande GAMMA_E	111
9.12.4	Opérande M_ULT	111
9.12.5	Opérande M_E	111
9.12.6	Opérande A_E	112
9.12.7	Opérande M_PIC	112
9.12.8	Opérande A_PIC	112
9.12.9	Opérande ETA	112
9.12.10	Opérande SIGMA_C	112
9.12.11	Opérandes GAMMA et KSI	112
9.12.12	Opérande GAMMA_CJS	112
9.12.13	Opérande SIGMA_P1	112
9.12.14	Opérande SIGMA_P2	112
9.12.15	Opérande PA	112
10	Comportements spécifiques aux éléments 1D	113
10.1	Mots clés facteur VMIS_POUTRE / VMIS_POUTRE_FO	113
10.1.1	Syntaxe	114
10.2	Mot clé facteur ECRO_FLEJOU	114
10.2.1	Syntaxe	114
10.3	Mot clé facteur ECRO_ASYM_LINE (cf. [R5.03.09])	115
10.3.1	Syntaxe	115
11	Comportements particuliers	116
11.1	Mot clé facteur GRAN_IRRA	116
11.1.1	Syntaxe	116
11.2	Mot clé facteur FLU_IRRA	117
11.2.1	Syntaxe	117
11.3	Mot clé facteur DIS_CONTACT	118
11.3.1	Syntaxe	118
11.3.2	Opérandes	119
11.4	Mot clé facteur ASSE_CORN : comportement d'un assemblage boulonné	121
11.4.1	Syntaxe	121
11.4.2	Opérandes	121
11.5	Mot clé facteur ARME : comportement d'un armement de ligne aérienne	122
11.5.1	Syntaxe	122
11.5.2	Opérande	123
12	Comportement fluide	124
12.1	Mot clé facteur FLUIDE	124
12.1.1	Syntaxe	124

12.1.2	Opérandes	124
13	Données Matériaux associées à des post-traitements	125
13.1	Mot clé facteur FATIGUE	125
13.1.1	Syntaxe	125
13.1.2	Opérande WOHLER	125
13.1.3	Opérandes A_BASQUIN / BETA_BASQUIN	126
13.1.4	Opérandes A0 / A1 / A2 / A3 / SL	126
13.1.5	Opérande MANSON_COFFIN	127
13.1.6	Opérande E_REFE	127
13.1.7	Opérande D0	127
13.1.8	Opérande TAU0	127
13.2	Mot clé facteur DOMMA_LEMAITRE	127
13.2.1	Opérande S	127
13.2.2	Opérande EPSP_SEUIL	127
13.3	Mot clé facteur CISA_PLAN_CRIT	128
13.3.1	Opérande MATAKE_A	128
13.3.2	Opérande MATAKE_B	128
13.3.3	Opérande ENDU_FT	128
13.4	Mot clé facteur WEIBULL / WEIBULL_FO	129
13.4.1	Syntaxe	129
13.4.2	Opérandes	130
13.5	Mots clés facteur RCCM / RCCM_FO	130
13.5.1	Syntaxe	130
13.5.2	Opérande SY_02	131
13.5.3	Opérande SM	131
13.5.4	Opérande SU	131
13.5.5	Opérande SC	131
13.5.6	Opérande SH	131
13.5.7	Opérande S	131
13.5.8	Opérande N_KE_RCCM / M_KE_RCCM	131

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]
    | / LMARC,                                 # voir[§ 4.14]
    | / 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]

# 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]

# 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]

# 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'
```

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 = α [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 = α
AMOR_BETA = β

Coefficients α et β 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 = η

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

3.1.6 Opérandes K_DESSIC / B_ENDOGE

◇ / K_DESSIC = k

Coefficient de retrait de dessication.

◇ / 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 ρ_{eq} est définie par :

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

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

ρ_i , ρ_e , ρ_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 (définit le confinement).

3.2.1 Syntaxe

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

3.2.2 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]
                      / rigt ,           [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 = rigt, [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 Opérandes 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 = α
- ◇ AMOR_BETA = β

Coefficients α et β 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

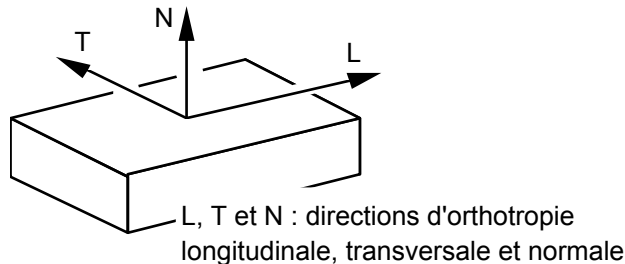
Le lecteur pourra se reporter aux documentations suivantes :

[U4.42.03] DEFI_COQU_MULT

[U4.42.01] AFFE_CARA_ELEM

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

- ◆ $E_L = y_{gl}$ Module d'Young longitudinal.



- ◆ $E_T = y_{gt}$ Module d'Young transversal.
- ◇ $E_N = y_{gn}$ Module d'Young normal.
- ◆ $G_{L_T} = g_{lt}$ Module de cisaillement dans le plan LT.
- ◇ $G_{T_N} = g_{tn}$ Module de cisaillement dans le plan TN.
- ◇ $G_{L_N} = g_{ln}$ 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).

- ◆ $NU_{LT} = n_{ult}$ Coefficient de Poisson dans le plan LT.

Remarques importantes :

*n_{ult} n'est pas égal à n_{utl} . En fait, on a la relation : $n_{utl} = \frac{y_{gt}}{y_{gl}} * n_{ult}$*

n_{ult} 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

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

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 :

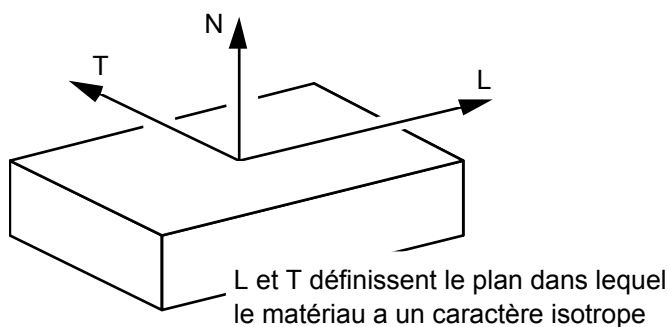
[U4.42.03] DEFI_COQU_MULT

[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.



- ◆ $E_L = ygl$
Module d'Young dans le plan LT.
- ◆ $E_N = ygn$
Module d'Young normal.
- ◆ $GL_N = gln$
Module de cisaillement dans le plan LN.

Remarque :

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

- ◆ $NU_{LT} = nult$
Coefficient de Poisson dans le plan LT.
- ◆ $NU_{LN} = nuln$
Coefficient de Poisson dans le plan LN.

Remarques importantes :

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

On a la relation :
$$\text{nunl} = \frac{y_{gl}}{y_{gn}} * \text{nuln}$$

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

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_LL TZ = 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_LL TZ = 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_LZ LZ = G1313 , [R] ou [fonction**]
    ◇ C_TZ TZ = G2323 , [R] ou [fonction**]
    ◇ C_TZ TZ = G1323 , [R] ou [fonction**]
)
```

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

Membrane :

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

Flexion :

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

Cisaillement :

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

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

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

Membrane :

$$\mathbf{C} = \begin{vmatrix} C_{1111} & C_{1122} & 0 \\ C_{1122} & C_{2222} & 0 \\ 0 & 0 & C_{1212} \end{vmatrix}$$

Flexion :

$$\mathbf{D} = \begin{vmatrix} D_{1111} & D_{1122} & 0 \\ D_{1122} & D_{2222} & 0 \\ 0 & 0 & D_{1212} \end{vmatrix}$$

Cisaillement :

$$\mathbf{G} = \begin{vmatrix} G_{11} & 0 \\ 0 & G_{22} \end{vmatrix}$$

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

Ces coefficients sont à fournir dans le repère local de l'élément. Il est défini par le mot-clé ANGL_REP de AFFE_CARA_ELEM [U4.42.01].

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

Si on souhaite utiliser ELAS_COQUE avec du cisaillement transverse il faut nécessairement employer la modélisation DST. Si on utilise la modélisation DKT, le cisaillement transverse ne sera pas pris en compte, quelque soient les valeurs de 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 :

Membrane :

$$\mathbf{HM} = \begin{vmatrix} H_{1111} & H_{1122} & H_{1112} \\ 0 & H_{2222} & H_{2212} \\ 0 & 0 & H_{1212} \end{vmatrix}$$

Flexion :

$$\mathbf{HF} = \begin{vmatrix} A_{1111} & A_{1122} & A_{1112} \\ 0 & A_{2222} & A_{2212} \\ 0 & 0 & A_{1212} \end{vmatrix}$$

Membrane – flexion :

$$\mathbf{HMF} = \begin{vmatrix} B_{1111} & B_{1122} & B_{1112} \\ 0 & B_{2222} & B_{2212} \\ 0 & 0 & B_{1212} \end{vmatrix}$$

Membrane cisaillement :

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

Flexion - cisaillement :

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

Cisaillement :

$$\mathbf{HC} = \begin{vmatrix} G_{1313} & G_{1323} \\ G_{1323} & G_{2323} \end{vmatrix}$$

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

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

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**]
                    )
```

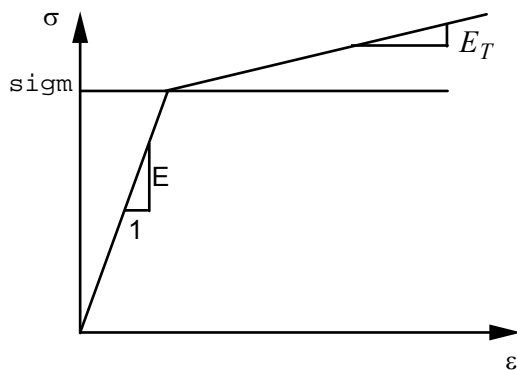
4.2.2 Opérandes

♦ 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 :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 :

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

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

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

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

$$\mathbf{X}_1 = \frac{2}{3} C_1(p) \boldsymbol{\alpha}_1,$$

$$\mathbf{X}_2 = \frac{2}{3} C_2(p) \boldsymbol{\alpha}_2,$$

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

$$\dot{\boldsymbol{\alpha}}_2 = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p - \gamma_2(p) \boldsymbol{\alpha}_2 \dot{p} \quad \text{éq 4.6-3}$$

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

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

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

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

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

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

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 :

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

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

où les différents paramètres du matériau sont S , C_∞ , C_1 , b , m , A , α , 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 = Cinfi , [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 = Cinfi , [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 :

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

avec :

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

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

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

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

Ecrouissage isotrope

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

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

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

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

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

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

Ecrouissage cinématique $\mathbf{X} = \mathbf{X}_1 + \mathbf{X}_2$

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

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

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

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 σ 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)

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

Φ : flux neutronique (neutrons / cm² / 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_RECUIIT   = 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 σ 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)

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

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

Φ : flux neutronique (neutrons / cm² / 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 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 :

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

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

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.

4.14.1 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 :

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

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

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

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

Il est possible de 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 λ .

- 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
σ_1	SIGM_1
f_0	PORO_INIT
f_c	PORO_CRIT
A	PORO_ACCE
A_n	AN
f_l	PORO_LIMI
λ	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 Φ_p le seuil plastique du modèle de ROUSSELIER :

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

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 :

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

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 :

σ' représente le déviateur des contraintes et σ_{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	α	'SEDVP1'
Coefficient 2 de la contrainte équivalente de fluage	β	'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*' : σ (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.

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

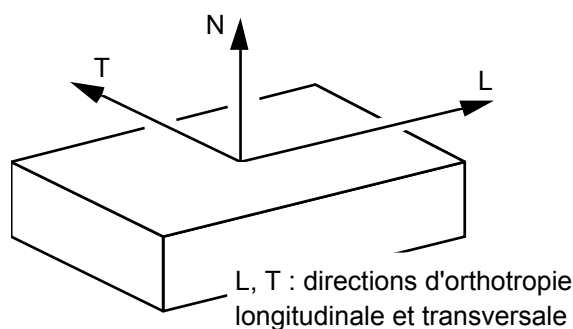
Définition des caractéristiques thermiques pour un matériau orthotrope.

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

- ♦ $\text{COND_NMM} = b_{11}$
terme lié à l'intégrale de $13 \cdot P1 \cdot P1$
- ♦ $\text{COND_NMP} = b_{12}$
terme lié à l'intégrale de $13 \cdot P1 \cdot P2$
- ♦ $\text{COND_NPP} = b_{22}$
terme lié à l'intégrale de $13 \cdot P2 \cdot P2$
- ♦ $\text{COND_NSI} = b_{23}$
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.

- ♦ $\text{CMAS_MM} = c_{11}$
terme lié à l'intégrale de $\text{RHOC} \cdot P1 \cdot P1$
- ♦ $\text{CMAS_MP} = c_{12}$
terme lié à l'intégrale de $\text{RHOC} \cdot P1 \cdot P2$
- ♦ $\text{CMAS_PP} = c_{22}$
terme lié à l'intégrale de $\text{RHOC} \cdot P2 \cdot P2$
- ♦ $\text{CMAS_SI} = c_{23}$
terme lié à l'intégrale de $\text{RHOC} \cdot P2 \cdot P3$

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 $2 \cdot 10^{-13}$ m²/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 Opérandes D1 / ALPHA_BAZANT / N / FONC_DESORP

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

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

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

- ♦ D1= d1
Coefficient de diffusion qui est de l'ordre de 3.10^{-13} m²/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 $\varepsilon_h \leq \varepsilon < \varepsilon_u$
(ε ne peut pas dépasser ε_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 ε_y^n est déduite du cycle $n-1$ par :

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

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

La variable ξ est définie par :

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

où ε_r^{n-1} représente la déformation atteinte à la fin du $n-1$ ème demi-cycle
et $\varepsilon_y^{n-1}, \varepsilon_y^n$ représentent les déformations de fin de linéarité des demi-cycles $n-1$ 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

$$a_5 = 1 + \frac{5 - L/D}{7.5}.$$

ξ' 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 σ_y^n la valeur $\sigma_s^* = \gamma_s b E \frac{b - b_c}{1 - b_c}$ avec $\gamma_s = \frac{11 - L/D}{10 \left(e^{\frac{cL}{D}} - 1 \right)}$.

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 σ_y dans les équations.

- ♦ EPSI_ULTM = epsu, notée ε_u dans les équations.

Déformation ultime.

- ♦ SIGM_ULTM = sigmu, notée σ_u dans les équations.

Contrainte ultime.

- ◇ ELAN = L/D

Elancement de la barre (>5 : flambage).

- ♦ EPSP_HARD = epsh, notée ε_h dans les équations.

Déformation correspondant à la fin du palier plastique.

- ◇ EP_SUR_E = b

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

- ◇ *A1_PM* = *a1*
 Coefficient définissant la courbe de traction du modèle.
- ◇ *A2_PM* = *a2*
 Coefficient définissant la courbe de traction du modèle.
- ◇ *A6_PM* = *a6*
 Coefficient définissant la courbe de traction du modèle en cas de flambage.
- ◇ *C_PM* = *c* utilisé dans γ_s
 Coefficient définissant la courbe de traction du modèle en cas de flambage.
- ◇ *A_PM* = *a*
 Coefficient définissant la courbe de traction du modèle en cas de flambage.
- ◇ *R_PM* =
 Coefficient R_0 (20. Par défaut).

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

7.7 Mots clés facteur BPEL_BETON / BPEL_ACIER

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

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

7.7.1 Syntaxe

```

◇ / ♦ BPEL_BETON = _F (
    ◇ PERT_FLUA = / xflu , [R]
                  / 0. , [DEFAULT]
    ◇ PERT_RETR = / xret , [R]
                  / 0. , [DEFAULT]
)

◇ / ♦ BPEL_ACIER = _F (
    ◇ RELAX_1000 = / rh1000 , [R]
                  / 0. , [DEFAULT]
    ◇ MU0_RELAX = / mu0 , [R]
                  / 0. , [DEFAULT]
    ♦ F_PRG = fprg , [R]
    ◇ FROT_COURB = / f , [R]
                  / 0. , [DEFAULT]
    ◇ FROT_LINE = / phi , [R]
                  / 0. , [DEFAULT]
)
    
```

7.7.2 Opérandes

Comportement : BPEL_BETON

Mot-clé facteur pour 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 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 Drücker Prager. En complément de ces caractéristiques, le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, et le coefficient de dilatation thermique α , ainsi que les coefficients de retrait endogène et de retrait de dessiccation, doivent être définis sous le mot-clé ELAS pour les coefficients réels, ou ELAS_FO, pour les coefficients définis par des fonctions, ou des nappes. Toutes les caractéristiques du modèle, (E , ν , α , f'_c , f'_t , β , 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 θ , qui est conservée en mémoire pour chaque point de Gauss, sous forme de variable interne. Ceci permet de prendre en compte les variations irréversibles de ces caractéristiques à haute température.

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

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= φ
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 κ_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

J1 = J1

• • •

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

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

$$\text{TAUX}_1 = \tau_1$$

• • •

• • •

$$.TAUX_8 = \tau_8$$

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

$$QSR_K = U_C / R \quad [R]$$

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 Opérands 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

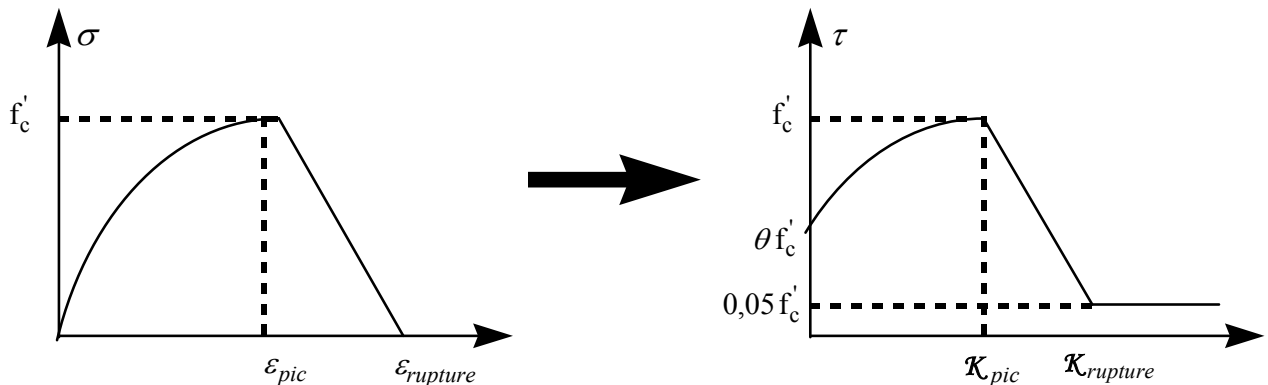
La loi de comportement NADAI_B est un modèle de comportement du béton intégrant des déformations plastiques en compression et un modèle de fissuration en traction. Ce modèle permet de représenter le comportement du béton sous chargement cyclique, une attention particulière étant apportée à la gestion 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 Drücker-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
- θ : 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 , θ , \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 :

```
| / NADAI_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 ν 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 =  $\lambda$ , [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 ε 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 ε pour Ac = 1 et l'horizontale passant par le pic pour Ac = 0 (généralement $0.7 < At < 1$).

◆ BC = Bc

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

◆ 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 = β

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 ; η_r^s la viscosité apparente associée au mécanisme de diffusion au sein de la porosité capillaire ; k_i^s désigne la rigidité apparente associée intrinsèquement aux hydrates à l'échelle microscopique et η_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*) ; η_r^d la viscosité associée à l'eau adsorbée par les feuillets d'hydrates et η_i^d désigne la viscosité associée à l'eau libre.

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
 η_r^s viscosité apparente associée au mécanisme de diffusion au sein de la porosité capillaire
- ♦ ETA_IS : ETA_IS
 η_i^s viscosité apparente associée au mécanisme de diffusion interlamellaire
- ♦ ETA_RD : ETA_RD
 η_r^d viscosité associée à l'eau adsorbée par les feuillets d'hydrates

- ◆ ETA_ID : ETA_ID
- η_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'écrouissage linéaire avec prise en compte du confinement dans le cas spécifique au béton. Afin d'améliorer le comportement en compression on définit un seuil de réversibilité

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*.

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  = 10       ,      [R]
    ◇ QSR_K    = Qapp     ,      [R]
    ◇ D10      = d10      ,      [R]
    ◇ WSR_K    = Wapp     ,      [R]
)
```

8.1.2 Opérands pour les changements de phases

- ♦ TRC = nomtrc

Concept de type `trc` produit par l'opérateur `DEFI_TRC` [U4.43.04] et contenant l'ensemble des informations fournies par les diagrammes TRC (Transformation en Refroidissement Continu) de l'acier considéré.

- ♦ AR3 = ar3

Température quasi-statique de début de décomposition de l'austénite au refroidissement.

- ♦ ALPHA = alpha

Coefficient α de la loi de Koistinen-Marburger exprimant la quantité de martensite formée en fonction de la température :

$$Z_M = 1 - \exp\left(\alpha(M_s - T)\right).$$

- ♦ MSO = mso

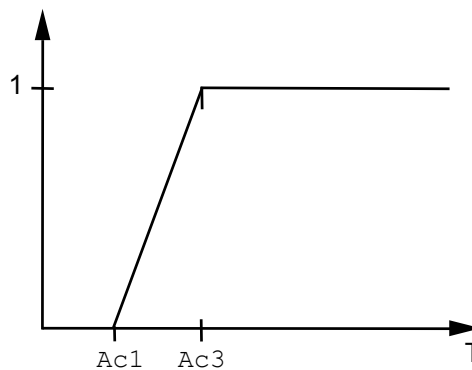
Température de début de transformation martensitique lorsque celle-ci est totale. Dans ce cas $M_s = M_{s0}$.

- ♦ 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.

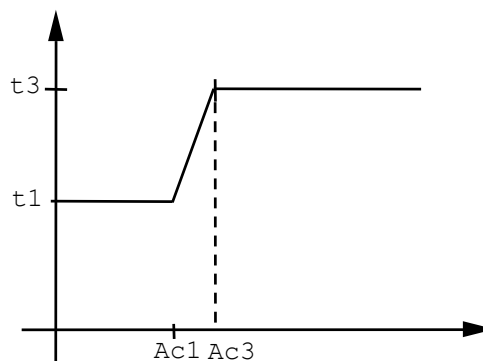
L'évolution de la proportion d'austénite est alors définie par :

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

avec : $Z_{eq}(T)$



et $\tau(T)$



8.1.3 Opérands pour la taille de grains

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

- ◆ `LAMBDA0` = λ_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_{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_{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
 α : phase à froid hexagonale compacte
 β : phase à chaud cubique centrée
- ♦ n = n
Paramètre matériau relatif au modèle donnant la proportion de β en fonction de la température, à l'équilibre.
- ♦ K = K
Paramètre matériau relatif au modèle donnant la proportion de β en fonction de la température, à l'équilibre.
- ♦ TDC = tdc
Température de début de transformation α en β au chauffage.
- ♦ AC = Ac
Paramètre matériau intervenant dans le modèle d'évolution de β au chauffage.
- ♦ M = m
Paramètre matériau intervenant dans le modèle d'évolution de β au chauffage.
- ♦ TDR = tdr
Température de début de transformation β en α au refroidissement.
- ♦ AR = Ar
Paramètre matériau intervenant dans le modèle d'évolution de β au refroidissement.
- ♦ BR = Br
Paramètre matériau intervenant dans le modèle d'évolution de β au refroidissement.

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 α pure, phase froide 2 = phase α mélange et une phase chaude = phase β).

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 =  $\Delta \epsilon$  , [R]
|   ◇ TEMP_DEF_ALPHA =  $T \gamma$  , [R]
|   ◇ PRECISION = /  $\epsilon$  , [R]
|                   / 1. , [DEFAULT]
|   ◇ F1_SY = F_ $\sigma y1$  , [fonction**]
|   ◇ F2_SY = F_ $\sigma y2$  , [fonction**]
|   ◇ F3_SY = F_ $\sigma y3$  , [fonction**]
|   ◇ F4_SY = F_ $\sigma y4$  , [fonction**]
|   ◇ C_SY = F_ $\sigma \gamma$  , [fonction**]
|   ◇ SY_MELANGE = f , [fonction]
|   ◇ F1_S_VP = F_ $\sigma c1$  , [fonction**]
|   ◇ F2_S_VP = F_ $\sigma c2$  , [fonction**]
|   ◇ F3_S_VP = F_ $\sigma c3$  , [fonction**]
|   ◇ F4_S_VP = F_ $\sigma c4$  , [fonction**]
|   ◇ C_S_VP = F_ $\sigma c \gamma$  , [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 = αf
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_γ

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

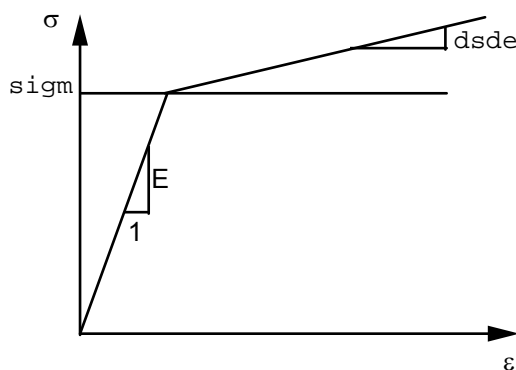
Définition de cinq modules d'écroissage utilisés dans la modélisation du phénomène d'écroissage isotrope linéaire d'un matériau subissant des changements de phases métallurgiques (voir [R4.04.02]). Ces modules dépendent de la température.

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

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 η , n de la loi d'écoulement en puissance, la limite élastique d'écoulement visqueuse, les paramètres C et m relatifs à la restauration d'écrouissage d'origine visqueuse. Ces paramètres dépendent de la température et de la structure métallurgique. Les paramètres limites d'élasticité sont définis dans **ELAS_META**.

8.7.1 Syntaxe

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

8.7.2 Opérandes

- \diamond F1_ETA = η_1
Paramètre η de la loi d'écoulement viscoplastique, pour la phase froide 1.
- \diamond F2_ETA = η_2
Paramètre η de la loi d'écoulement viscoplastique, pour la phase froide 2.
- \diamond F3_ETA = η_3
Paramètre η de la loi d'écoulement viscoplastique, pour la phase froide 3.
- \diamond F4_ETA = η_4
Paramètre η de la loi d'écoulement viscoplastique, pour la phase froide 4
- \diamond C_ETA = η_5
Paramètre η 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'écrouissage 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'écrouissage transmis lors de la transformation de la phase à chaud C en phase à froid. Pour l'acier ; transformation de l'austénite en ferrite, perlite, bainite et martensite. Ainsi, $\theta = 0$ correspond à une restauration totale et $\theta = 1$ à une transmission totale de l'écrouissage.

- ♦ F1_C_THETA= $\theta_{f\gamma}$ F2_C_THETA= $\theta_{p\gamma}$ F3_C_THETA= $\theta_{b\gamma}$ F4_C_THETA= $\theta_{m\gamma}$

Constantes caractérisant le taux d'écrouissage transmis lors de la transformation des phases à froid en phase à chaud. Pour l'acier ; transformation de la ferrite, de la perlite, de la bainite et de la martensite en austénite. Ainsi, $\theta = 0$ correspond à une restauration totale et $\theta = 1$ à une transmission totale de l'écrouissage.

9 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	GAZ	LIQU_GAZ_ATM	LIQU_VAPE_GAZ	LIQU_VAPE	LIQU_SATU_GAT	LIQU_NSAT_GAT
THM_INIT	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
THM_DIFFU	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	T	T	T	T	T	T	O	O
LAMBDA	T	T	T	T	T	T	O	O
D_LAMBDA_TEMP	T	T	T	T	T	T	O	O
THM_LIQU	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
THM_GAZ	I	O	O	O	O	I	O	O
MASS_MOL	I	O	O	O	O	I	O	O
VISC	I	O	O	O	O	I	O	O
D_VISC_TEMP	I	O	O	O	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
THM_VAPE_GAZ	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 nœuds, que nous appelons $\{u\}^{ddl}$ et les valeurs définies sous le mot clé THM_INIT que nous appelons p^{ref} et T^{ref}

$$\{u\}^{ddl} = \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \\ PRE1^{ddl} \\ PRE2^{ddl} \end{Bmatrix}$$

La signification des inconnues PRE1 et PRE2 varie suivant les modèles. En notant p_l la pression de liquide, p_{gs} la pression de gaz sec, p_{vp} la pression de vapeur, $p_g = p_{gs} + p_{vp}$ la pression totale de gaz et $p_c = p_g - p_l$ la pression capillaire (aussi appelée succion), on a les significations suivantes des inconnues PRE1 et PRE2

Comportement KIT	LIQU_SATU	LIQU_GAZ_ATM	GAZ	LIQU_VAPE_GAZ	LIQU_GAZ
PRE1	p_l	$-p_l$	p_g	$p_c = p_g - p_l$	$p_c = p_g - p_l$
PRE2				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, $\frac{dp_l}{\rho_l} = \frac{dp_l}{K_l} - 3\alpha_l dT$ 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` et `LIQU_GAZ` pression capillaire de référence.

9.2.4 Opérande **PRE2**

Pour les comportements : `LIQU_VAPE_GAZ` 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` 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 **]
    ◇ LAMBDA        = lambda ,   [fonction **]
    ◇ D_LAMBDA_TEMP = dlambda ,  [fonction **]
    ◇ COEF_HENRY    = ch ,      [R]
)

```

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 α_l

Si p_l désigne la pression du liquide, ρ_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**.

9.3.8 Opérande **LAMBDA**

Conductivité thermique du liquide. Fonction de la température.

9.3.9 Opérande D_LAMBDA_TEMP

Dérivée par rapport à la température de la conductivité thermique du liquide. Fonction de la température.

L'utilisateur doit assurer la cohérence avec la fonction associée à LAMBDA.

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 **]
    ◇ LAMBDA         = lambda ,   [fonction **]
    ◇ D_LAMBDA_TEMP  = dlambda , [fonction **]
)
```

9.4.2 Opérande MASS_MOL

Masse molaire du gaz sec. M_{gs}

Si p_{gs} désigne la pression du gaz sec, ρ_{gs} sa masse volumique, R la constante des gaz parfaits et

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

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.

9.4.6 Opérande LAMBDA

Conductivité thermique du gaz sec . Fonction de la température.

9.4.7 Opérande D_LAMBDA_TEMP

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

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, ρ_{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_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.

9.6.1 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]
    ◇ FICK            = f    ,      [fonction]
    ◇ D_FICK_TEMP     = dft  ,      [fonction]
    ◇ D_FICK_GAZ_PRES = dfgp ,      [fonction]
    ◇ LAMBDA          = lambda ,    [fonction **]
    ◇ D_LAMBDA_TEMP   = dlamba ,    [fonction **]
    ◇ SIGMA_T         = st   ,      [fonction **]
    ◇ D_SIGMA_T       = dst  ,      [fonction **]
    ◇ PERM_G_INTR     = pgi  ,      [fonction]
    ◇ CHAL_VAPO       = cv   ,      [fonction **]
)
```

9.6.2 Opérande **R_GAZ**

Constante des gaz parfaits.

9.6.3 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**.*

9.6.4 Opérande CP

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

9.6.5 Opérande BIOT_COEF

Coefficient de Biot.

9.6.6 Opérande SATU_PRES

Pour les comportements de matériaux non saturés (*LIQU_VAPE_GAZ*, *LIQU_GAZ*, *LIQU_GAZ_ATM*), isotherme de saturation fonction de la pression capillaire.

9.6.7 Opérande D_SATU_PRES

Pour les comportements de matériaux non saturés (*LIQU_VAPE_GAZ*, *LIQU_GAZ*, *LIQU_GAZ_ATM*), dérivée de la saturation par rapport à la pression.

9.6.8 Opérande PESA_X

Pesanteur selon x, utilisé uniquement si la modélisation choisie dans *AFFE_MODELE* inclut 1 ou 2 variable de pression.

9.6.9 Opérande PESA_Y

Pesanteur selon y, utilisé uniquement si la modélisation choisie dans *AFFE_MODELE* inclut 1 ou 2 variable de pression.

9.6.10 Opérande PESA_Z

Pesanteur selon z, utilisé uniquement si la modélisation choisie dans *AFFE_MODELE* inclut 1 ou 2 variable de pression.

9.6.11 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_{int} est la perméabilité intrinsèque, K_{rel} la perméabilité relative, μ la viscosité, ρ_l la masse volumique du liquide et g l'accélération de la pesanteur.

9.6.12 Opérande PERM_LIQU

Perméabilité relative au liquide : fonction de la saturation.

9.6.13 Opérande D_PERM_LIQU_SATU

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

9.6.14 Opérande PERM_GAZ

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

9.6.15 Opérande D_PERM_SATU_GAZ

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

9.6.16 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.

9.6.17 Opérande *FICK*

Pour le comportement *LIQU_VAPE_GAZ* coefficient de Fick pour la diffusion de la vapeur dans le mélange gazeux : fonction de la température et de la pression de gaz.

9.6.18 Opérande *D_FICK_TEMP*

Pour le comportement *LIQU_VAPE_GAZ* dérivée du coefficient de Fick par rapport à la température : fonction de la température et de la pression de gaz.

9.6.19 Opérande *D_FICK_GAZ_PRES*

Pour le comportement *LIQU_VAPE_GAZ* dérivée du coefficient de Fick par rapport à la pression de gaz fonction de la température et de la pression de gaz.

9.6.20 Opérande *LAMBDA*

Pour le comportement *THER_POLY* conductivité thermique du solide seul.
Pour le comportement *THER_HOMO* conductivité thermique du mélange.

9.6.21 Opérande *D_LAMBDA_TEMP*

Pour le comportement *THER_POLY* dérivée de la conductivité thermique du solide par rapport à la température.
Pour le comportement *THER_HOMO* dérivée de la conductivité thermique du mélange par rapport à la température.

9.7 Mot clé facteur **SURF_ETAT_SATU** (cf. [R7.01.14])

9.7.1 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]  
)
```

9.7.2 Opérande **E_CHAR**

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

9.7.3 Opérande **E_DECHAR**

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

9.7.4 Opérande **EV_KB**

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

9.7.5 Opérande **RF**

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

9.7.6 Opérande **XN**

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

9.7.7 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.

9.7.8 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.

9.7.9 Opérande ANG_FRT

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

9.7.10 Opérande COHE

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

9.7.11 Opérande RESI_TRAC

Résistance en traction du sol.

9.7.12 Opérande ALPHA0

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

9.7.13 Opérande ALPHA1

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

9.7.14 Opérande ALPHA2

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

9.7.15 Opérande ALPHA3

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

9.7.16 Opérande ALPHA_S

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

9.8 Mot clé facteur SURF_ETAT_NSAT (cf. [R7.01.14])

9.8.1 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]
)
```

9.8.2 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 RF

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

9.8.5 Opérande XN

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

9.8.6 Opérande EV_KB

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

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 EV_A

Coefficient a de la surface d'indice des vides.

9.8.9 Opérande EV_B

Coefficient b de la surface d'indice des vides.

9.8.10 Opérande EV_CT

Coefficient c de la surface d'indice des vides.

9.8.11 Opérande EV_SIGB

Coefficient sigma de la surface d'indice des vides.

9.8.12 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.

9.8.13 Opérande D_E_SUCC

Variation du module d'Young avec succion.

9.8.14 Opérande ANG_FRT

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

9.8.15 Opérande ANG_FRT_ULT

Angle de frottement ultime.

9.8.16 Opérande COHE

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

9.8.17 Opérande D_COEH_SUCC

Variation de la cohésion avec la succion.

9.8.18 Opérande RESI_TRAC

Résistance en traction du sol.

9.8.19 Opérande SUCC_ULTM

Succion ultime.

9.8.20 Opérande A_SURF_SATU

Coefficient a de la surface d'état de saturation.

9.8.21 Opérande B_SURF_SATU

Coefficient b de la surface d'état de saturation.

9.8.22 Opérande C_SURF_SATU

Coefficient c de la surface d'état de saturation.

9.8.23 Opérande D_SURF_SATU

Coefficient c de la surface d'état de saturation.

9.9 Mot clé facteur CAM_CLAY_THM (cf. [R7.01.14])

9.9.1 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]  
    )
```

9.9.2 Opérande NU

Coefficient de Poisson.

9.9.3 Opérande LAMBDA

Pente de la droite de chargement.

Valeur recommandée en unité SI entre 0.1 et 0.4.

9.9.4 Opérande KAPA

Pente de la droite de déchargement.

Valeur recommandée en unité SI entre 0.01 et 1.

9.9.5 Opérande PRES_CRIT

Pression critique effective.

9.9.6 Opérande M

Pente de la ligne d'état critique.

Valeur recommandée en unité SI entre 0.8 et 0.9.

9.9.7 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.

9.9.8 Opérande A0_PC

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

9.9.9 Opérande A1_PC

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

9.9.10 Opérande A2_PC

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

9.9.11 Opérande ALPHA0_PC

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

9.9.12 Opérande ALPHA1_PC

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

9.9.13 Opérande ALPHA2_PC

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

9.9.14 Opérande ALPHA3_PC

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

9.9.15 Opérande ALPHA_S

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

9.10 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.

9.10.1 Syntaxe

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

9.10.2 Opérandes **LAMBDA**

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

9.10.3 Opérandes **KAPA**

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

9.10.4 Opérandes **M**

Pente de la droite d'état critique.

9.10.5 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.

9.10.6 Opérandes **PRES_CRIT**

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

9.10.7 Opérandes **PA**

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

9.11 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.

9.11.1 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	γ	β	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	μ	p_{co}	c	P_a
Mot clé	B_CJS	RM	M_CJS	PCO	C_CJS	PA
CJS1		O				O
CJS2		O				O
CJS3	O	O	O	O	O	O

Nous attirons l'attention de l'utilisateur sur le fait que, pour un même matériau, le même coefficient peut prendre des valeurs différentes selon le niveau utilisé. Le niveau utilisé n'est jamais renseigné, il est indiqué par le fait que certains coefficients sont renseignés ou non.

Par ailleurs, le mot clé `ELAS` doit être obligatoirement renseigné quand on utilise la loi CJS (sous un de ses trois niveaux). La définition du module d'Young et du coefficient de Poisson permettent de calculer les coefficients K_o^e et G_o .

9.11.2 Opérande BETA_CJS

Pour niveaux CJS1, CJS2 CJS3.

Paramètre β . Contrôle la variation de volume plastique dans le mécanisme déviatoire.

9.11.3 Opérande RM

Pour niveaux CJS1, CJS2 CJS3.

Valeur maximale d'ouverture du domaine de réversibilité déviatoire.

9.11.4 Opérande N_CJS

Pour niveaux CJS2 CJS3.

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

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

9.11.5 Opérande KP

Pour niveaux CJS2 CJS3.

Module de compressibilité plastique.

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

9.11.6 Opérande RC

Pour niveaux CJS2 CJS3

Valeur critique de la variable R :

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

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

9.11.7 Opérande A_CJS

Pour niveaux CJS2.

Contrôle l'écrouissage isotrope du mécanisme déviatoire ;

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

9.11.8 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`.

9.11.9 Opérande B_CJS

Pour niveaux CJS3.

Contrôle l'écrouissage cinématique du mécanisme déviatoire ;

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

9.11.10 Opérande C_CJS

Pour niveaux CJS3.

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

9.11.11 Opérande PCO

Pour niveaux CJS3.

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

9.11.12 Opérande GAMMA_CJS

Pour niveaux CJS1 CJS2 CJS3.

Contrôle la forme du critère :

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

9.11.13 Opérande MU_CJS

Pour niveaux CJS3.

Contrôle la valeur de rupture de la variable R.

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

9.11.14 Opérande PA

Pour niveaux CJS1 CJS2 CJS3.

pression atmosphérique. Doit être donnée négative.

9.11.15 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 :

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

9.12 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.

9.12.1 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]
)
```

9.12.2 Opérande GAMMA_ULT

Paramètre γ_{ult} : Déformation déviatoire plastique correspondant au palier.

9.12.3 Opérande GAMMA_E

Paramètre γ_e : Déformation déviatoire plastique correspondant à la disparition complète de la cohésion.

9.12.4 Opérande M_ULT

Paramètre m_{ult} : Valeur de m du critère ultime atteinte γ_{ult} .

9.12.5 Opérande M_E

Paramètre m_e : Valeur de m du critère intermédiaire atteinte en γ_e .

9.12.6 Opérande A_E

Paramètre a_e : Valeur de a du critère intermédiaire atteinte en γ_e .

9.12.7 Opérande M_PIC

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

9.12.8 Opérande A_PIC

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

9.12.9 Opérande ETA

Paramètre η : Exposant régulant l'écrouissage.

9.12.10 Opérande SIGMA_C

Paramètre σ_c : Résistance en compression simple.

9.12.11 Opérandes GAMMA et KSI

Paramètres γ et ξ : Paramètres réglant la dilataance.

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 dilataance $\sin \psi$ (en fonction de l'état des contraintes - voir [R7.01.15] peut tendre vers $\frac{\gamma}{\xi}$, ce qui justifie cette condition.

9.12.12 Opérande GAMMA_CJS

Paramètre γ_{cjs} : Paramètre de forme de la surface de charge dans le plan déviatoire.

9.12.13 Opérande SIGMA_P1

Paramètre σ_{p1} : Intersection du critère intermédiaire et du critère de pic.

9.12.14 Opérande SIGMA_P2

Paramètre σ_{p2} : Intersection du critère intermédiaire et du critère ultime.

9.12.15 Opérande PA

Pression atmosphérique. Doit être donnée positive.

Remarque :

Les paramètres M_E , A_E , A_{PIC} , $SIGMA_{P1}$, $SIGMA_C$ et $MPIC$ sont dépendants les uns des autres par la relation : $m_e = \frac{\sigma_c}{\sigma_{p1}} \left(m_{pic} \frac{\sigma_{p1}}{\sigma_c} + 1 \right)^{\frac{a_{pic}}{a_e}}$. Cette dépendance est vérifiée au sein du code.

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 σ_y et de la géométrie de la section. La valeur de λ 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 α_y β_y α_z β_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 σ_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.

σ_{YT}	Effort limite en traction. En valeur absolue.
σ_{YC}	Effort limite en compression. En valeur absolue.
p_T	Déformation plastique cumulée en traction. Valeur algébrique.
p_C	Déformation plastique cumulée en compression. Valeur algébrique.
E_{TT}	Pente d'écrouissage en traction.
E_{TC}	Pente d'écrouissage en compression.

Les équations du modèle de comportement sont :

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

où :

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

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

ε^{th} : déformation d'origine thermique : $\varepsilon^{th} = \alpha(T - T_{ref})$. α est défini sous ELAS.

On remarque que l'on ne peut avoir simultanément plastification en traction et en compression : soit $\dot{p}_C = 0$, soit $\dot{p}_T = 0$, soit les deux sont nulles.

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 Φ 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 Φ 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 noeuds (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 noeuds (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 = μ

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 ΔDR (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 = μ

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).

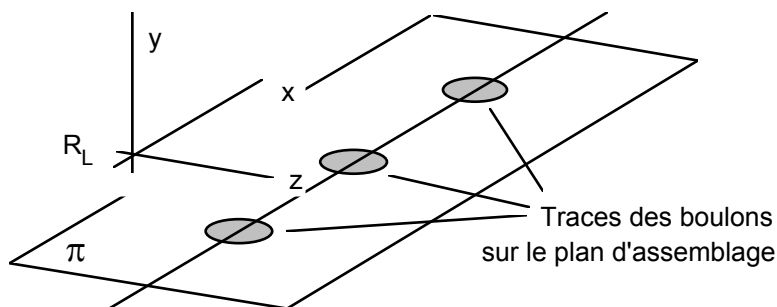
11.4 Mot clé facteur ASSE_CORN : comportement d'un assemblage boulonné

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

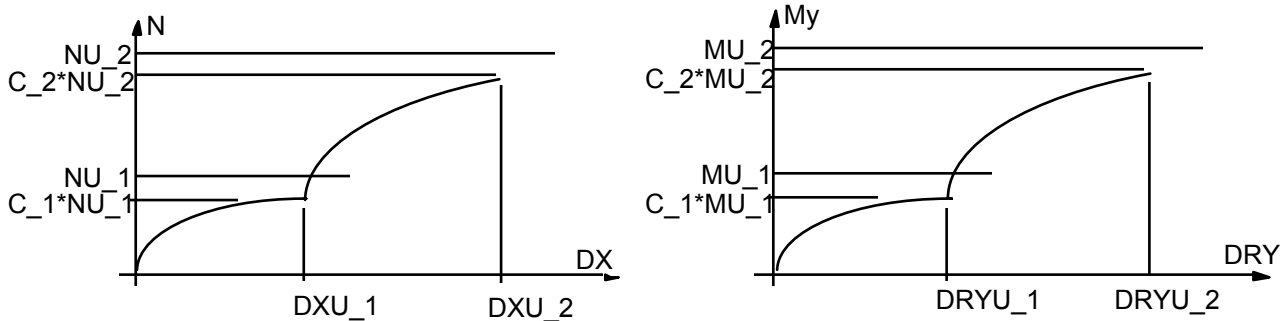
Sur la figure suivante, le plan π représente le plan de l'assemblage. L'axe des boulons est perpendiculaire à ce plan. Le lecteur se reportera à [U4.42.01] *AFFE_CARA_ELEM* pour l'orientation du repère R_L définissant le plan de l'assemblage.



La relation de comportement de l'assemblage est :

- non-linéaire en translation suivant x et en rotation autour de y.
- linéaire suivant les autres degrés de libertés : DY, DZ, DRX, DRZ

Comportements en traction suivant l'axe x et en rotation autour de l'axe y.



Le comportement de la liaison est considéré linéaire dans les autres directions :

KY : raideur en translation suivant Y
KZ : raideur en translation suivant Z
KRX : raideur en rotation autour de X
KRZ : raideur en rotation autour de Z

11.5 Mot clé facteur ARME : comportement d'un armement de ligne aérienne

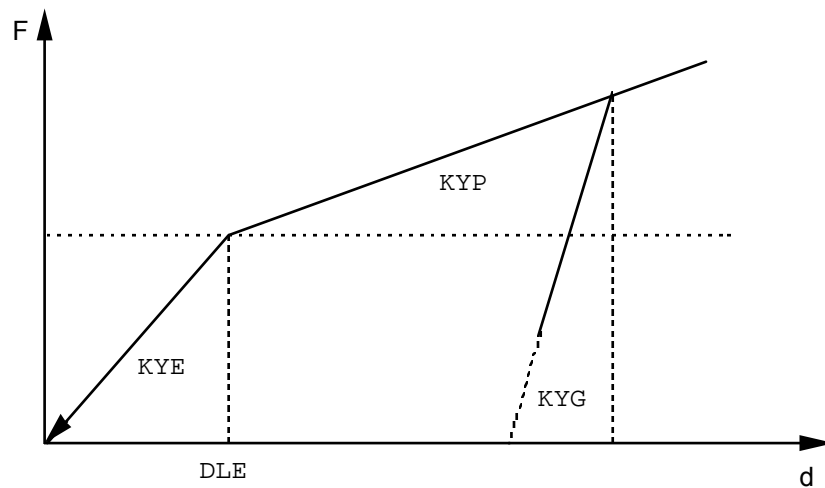
Le bras de chaque armement de phase rompue, représenté par un élément discret, a un comportement non-linéaire en force-déplacement constitué par la différence entre le déplacement maximal d_{lp} de l'extrémité de l'armement dans la phase plastique et le déplacement élastique limite d_{le} .

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 ,
                                                         [R]
                                                         /  ♦  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 ,
                                                         [R]
                                                         ◇  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 = β

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 β 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 β 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 (`
 ◆ `S = s,` [fonction**]
 ◆ `EPSP_SEUIL = pd,` [R]
)

Sous ce mot clé facteur sont regroupées toutes les caractéristiques matériau nécessaires au calcul du dommage de Lemaitre.

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.

13.3 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, σ_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) :

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

σ_ω^0 désignant la contrainte de Weibull définie conventionnellement pour σ_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 δV .

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 : σ_u , SIGM_CNV : σ_{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 (  $\diamond$  SY_02 = sigm , [R]
                   $\diamond$  SM = sigm , [R]
                   $\diamond$  SU = sigm , [R]
                   $\diamond$  SC = sigm , [R]
                   $\diamond$  SH = sigm , [R]
                   $\diamond$  N_KE = h , [R]
                   $\diamond$  M_KE = m , [R]
                )
/ RCCM_FO = _F (  $\diamond$  SY_02 = sigm , [fonction]
                   $\diamond$  SM = sigm , [fonction]
                   $\diamond$  SU = sigm , [fonction]
                   $\diamond$  S = sigm , [fonction]
                   $\diamond$  N_KE = h , [fonction]
                   $\diamond$  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.