

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 | 14 |
| 3 Comportements élastiques généraux | 18 |
| 3.1 Mots clés facteur ELAS / ELAS_FO | 18 |
| 3.1.1 Syntaxe | 18 |
| 3.1.2 Opérandes E / NU | 18 |
| 3.1.3 Opérande RHO | 18 |
| 3.1.4 Opérandes ALPHA / TEMP_DEF_ALPHA / PRECISION | 19 |
| 3.1.5 Opérandes AMOR_ALPHA / AMOR_BETHA / AMOR_HYST | 20 |
| 3.1.6 Opérandes K_DESSIC / B_ENDOGE | 20 |
| 3.1.7 Opérande FONC_DESORP | 20 |
| 3.2 Mot clé facteur ELAS_FLUI | 20 |
| 3.2.1 Syntaxe | 21 |
| 3.2.2 Opérande ELAS_FLUI | 21 |
| 3.3 Mot clé facteur APPUI_ELAS | 22 |
| 3.4 Mot clé facteur CABLE | 22 |
| 3.4.1 Syntaxe | 22 |
| 3.4.2 Opérandes d'élasticité | 22 |
| 3.4.3 Opérande de masse | 23 |
| 3.4.4 Opérande de dilatation | 23 |
| 3.4.5 Opérandes d'amortissement | 23 |
| 3.5 Mots clés facteur ELAS_ORTH / ELAS_ORTH_FO | 24 |
| 3.5.1 Syntaxe | 24 |
| 3.5.2 Opérandes d'élasticité | 25 |
| 3.5.3 Opérande RHO | 26 |
| 3.5.4 Opérandes ALPHA_L / ALPHA_T / ALPHA_N | 26 |
| 3.5.5 Opérandes TEMP_DEF_ALPHA / PRECISION | 26 |
| 3.5.6 Critères de rupture | 26 |
| 3.6 Mots clés facteur ELAS_ISTR / ELAS_ISTR_FO | 27 |
| 3.6.1 Syntaxe | 27 |
| 3.6.2 Opérandes d'élasticité | 28 |
| 3.6.3 Opérande RHO | 29 |
| 3.6.4 Opérandes ALPHA_L / ALPHA_N | 29 |
| 3.6.5 Opérandes TEMP_DEF_ALPHA / PRECISION | 29 |
| 3.7 Mot clés facteur ELAS_COQUE / ELAS_COQUE_FO | 30 |
| 3.7.1 Syntaxe | 30 |
| 4 Comportements mécaniques non linéaires généraux | 32 |
| 4.1 Mot clé facteur TRACTION | 32 |
| 4.1.1 Syntaxe | 32 |
| 4.1.2 Opérande SIGM | 32 |

| | |
|---|----|
| 4.2 Mots clés facteur <i>ECRO_LINE</i> / <i>ECRO_LINE_FO</i> | 32 |
| 4.2.1 Syntaxe | 32 |
| 4.2.2 Opérandes | 32 |
| 4.3 Mots clés facteur <i>PRAGER</i> / <i>PRAGER_FO</i> | 33 |
| 4.3.1 Syntaxe | 33 |
| 4.4 Mot clé <i>CHABOCHE</i> | 34 |
| 4.4.1 Syntaxe | 34 |
| 4.5 Mots clés facteur <i>CIN1_CHAB</i> / <i>CIN1_CHAB_FO</i> | 35 |
| 4.5.1 Syntaxe | 35 |
| 4.6 Mots clés facteur <i>CIN2_CHAB</i> / <i>CIN2_CHAB_FO</i> | 36 |
| 4.6.1 Syntaxe | 37 |
| 4.7 Mots clés facteur <i>TAHERI</i> / <i>TAHERI_FO</i> | 37 |
| 4.7.1 Syntaxe | 38 |
| 4.7.2 Syntaxe | 38 |
| 4.8 Mot clé facteur <i>POLY_CFC</i> / <i>POLY_CFC_FO</i> | 39 |
| 4.8.1 Syntaxe | 40 |
| 4.9 Mots clés facteurs <i>ECOU_VISC1</i> , <i>ECOU_VISC2</i> , <i>ECOU_VISC3</i> , <i>ECRO_CIN1</i> , <i>ECRO_CIN2</i> , <i>ECRO_ISOT1</i> , <i>ECRO_ISOT2</i> | 41 |
| 4.9.1 Syntaxe | 42 |
| 4.10 Mots clés facteur <i>LEMAITRE</i> / <i>LEMAITRE_FO</i> | 43 |
| 4.10.1 Syntaxe | 43 |
| 4.11 Mot clé facteur <i>VISC_SINH</i> | 44 |
| 4.11.1 Syntaxe | 44 |
| 4.12 Mot clé <i>LEMA_SEUIL</i> | 45 |
| 4.12.1 Syntaxe | 45 |
| 4.13 Mot clé facteur <i>ZIRC_CYRA2</i> | 46 |
| 4.13.1 Syntaxe | 46 |
| 4.14 Mot clé facteur <i>ZIRC_EPRI</i> | 46 |
| 4.14.1 Syntaxe | 47 |
| 4.15 Mot clé facteur <i>VISC_IRRA_LOG</i> | 47 |
| 4.15.1 Syntaxe | 47 |
| 4.16 Mots clés facteur <i>LMARC</i> / <i>LMARC_FO</i> | 48 |
| 4.16.1 Syntaxe | 48 |
| 5 Comportements liés à l'endommagement et la rupture | 49 |
| 5.1 Mots clés facteur <i>ROUSSELIER</i> / <i>ROUSSELIER_FO</i> | 49 |
| 5.1.1 Syntaxe | 50 |
| 5.2 Mots clés <i>VENDO_CHAB</i> / <i>VENDO_CHAB_FO</i> | 51 |
| 5.2.1 Syntaxe | 51 |
| 5.3 Mot clé facteur <i>ENDO_ORTH_BETON</i> | 53 |
| 5.3.1 Syntaxe | 53 |
| 5.3.2 Opérande <i>ALPHA</i> | 53 |
| 5.3.3 Opérandes <i>K0</i> / <i>K1</i> / <i>K2</i> | 53 |

Titre : *Opérateur DEFI_MATERIAU*
Auteur(s) : **J.P. LEFEBVRE**

Date : 22/02/06
Clé : U4.43.01-I1 Page : 4/148

| | |
|---|----|
| 5.3.4 Opérandes ECROB / ECROD..... | 53 |
| 5.4 Mot clé facteur NON_LOCAL..... | 54 |
| 5.4.1 Syntaxe..... | 54 |
| 5.4.2 Opérandes LONG_CARA / COEF_RIGI_MINI..... | 54 |
| 5.5 Mot clé facteur RUPT_FRAG / RUPT_FRAG_FO..... | 54 |
| 5.5.1 Syntaxe..... | 54 |
| 5.5.2 Opérande RUPT_FRAG..... | 54 |
| 5.5.3 Opérande SIGM_C..... | 54 |
| 5.5.4 Opérande PENA_ADHERENCE..... | 55 |
| 5.5.5 Opérande PENA_CONTACT..... | 55 |
| 5.6 Mot clé facteur CORR_ACIER..... | 55 |
| 5.6.1 Syntaxe..... | 55 |
| 5.6.2 Opérande D_CORR..... | 55 |
| 5.6.3 Opérandes ECRO_K, ECRO_M..... | 55 |
| 5.6.4 Opérande SY..... | 55 |
| 6 Comportements thermiques..... | 56 |
| 6.1 Mots clés facteur THER / THER_FO..... | 56 |
| 6.1.1 Syntaxe..... | 56 |
| 6.1.2 Opérandes LAMBDA / RHO_CP..... | 56 |
| 6.2 Mot clé facteur THER_ORTH..... | 56 |
| 6.2.1 Syntaxe..... | 56 |
| 6.2.2 Opérandes LAMBDA / RHO_CP..... | 57 |
| 6.3 Mot clé facteur THER_NL (cf. [R5.02.02])..... | 57 |
| 6.3.1 Syntaxe..... | 57 |
| 6.3.2 Opérandes BETA / LAMBDA / RHO_CP..... | 57 |
| 6.4 Mots clés facteur THER_COQUE / THER_COQUE_FO..... | 57 |
| 6.4.1 Syntaxe..... | 58 |
| 6.4.2 Opérandes COND_LMM / COND_LMP / COND_LPP / COND_LSI / COND_TMM / COND_TMP / COND_TPP / COND_TSI..... | 58 |
| 6.4.3 Opérandes COND_NMM / COND_NMP / COND_NPP / COND_NSI..... | 59 |
| 6.4.4 Opérandes CMAS_MM / CMAS_MP / CMAS_PP / CMAS_SI..... | 59 |
| 7 Comportements spécifiques aux bétons..... | 60 |
| 7.1 Mot clé facteur THER_HYDR..... | 60 |
| 7.1.1 Syntaxe..... | 60 |
| 7.1.2 Opérandes LAMBDA / BETA..... | 60 |
| 7.1.3 Opérande AFFINITE..... | 60 |
| 7.1.4 Opérande CHAL_HYDR..... | 60 |
| 7.1.5 Opérande QSR_K..... | 60 |
| 7.2 Mot clé facteur SECH_GRANGER..... | 61 |
| 7.2.1 Syntaxe..... | 61 |
| 7.2.2 Opérandes A / B / QSR_K / TEMP_0_C..... | 61 |

| | |
|---|----|
| 7.3 Mot clé facteur SECH_MENSI | 62 |
| 7.3.1 Syntaxe | 62 |
| 7.3.2 Opérandes A / B | 62 |
| 7.4 Mot clé facteur SECH_BAZANT | 63 |
| 7.4.1 Syntaxe | 63 |
| 7.4.2 Opérandes D1 / ALPHA_BAZANT / N / FONC_DESORP | 63 |
| 7.5 Mot clé facteur SECH_NAPPE | 64 |
| 7.5.1 Syntaxe | 64 |
| 7.5.2 Opérande FONCTION | 64 |
| 7.6 Mot clé facteur PINTO_MENEGOTTO | 64 |
| 7.6.1 Syntaxe | 66 |
| 7.6.2 Opérandes | 66 |
| 7.7 Mots clés facteur BPEL_BETON / BPEL_ACIER | 68 |
| 7.7.1 Syntaxe | 68 |
| 7.7.2 Opérandes | 68 |
| 7.8 Mot clé facteur BETON_DOUBLE_DP | 69 |
| 7.8.1 Syntaxe | 69 |
| 7.8.2 Opérandes F_C / F_T / COEF_BIAX | 70 |
| 7.8.3 Opérandes ENER_COMP RUPT / ENER_TRAC RUPT / COEF_ELAS_COMP | 70 |
| 7.8.4 Opérandes LONG_CARA | 70 |
| 7.8.5 Opérandes COMP_POST_PIC / TRAC_POST_PIC | 71 |
| 7.9 Mot clé facteur GRANGER_FP / GRANGER_FP_INDT / V_GRANGER_FP | 72 |
| 7.9.1 Syntaxe pour le fluage propre | 72 |
| 7.9.2 Opérandes pour le fluage propre | 73 |
| 7.9.3 Syntaxe pour le fluage propre indépendant de la température | 73 |
| 7.9.4 Syntaxe pour le vieillissement | 73 |
| 7.9.5 Opérandes pour le vieillissement | 73 |
| 7.10 Mot clé NADAI_B | 74 |
| 7.10.1 Syntaxe | 75 |
| 7.10.2 Opérandes F_C / F_T | 75 |
| 7.10.3 Opérande CRIT_E_C | 75 |
| 7.10.4 Opérandes EPS_P_C / EPS_R_C / EPSI_R_T | 75 |
| 7.10.5 Opérande FAC_T_C | 75 |
| 7.11 Mot clé facteur BAZANT_FD | 75 |
| 7.11.1 Syntaxe | 75 |
| 7.11.2 Opérande | 75 |
| 7.12 Mot clé LABORD_1D | 76 |
| 7.12.1 Syntaxe | 76 |
| 7.12.2 Opérandes | 76 |
| 7.13 Mot clé facteur MAZARS / MAZARS_FO | 77 |
| 7.13.1 Syntaxe | 77 |

Titre : Opérateur DEFI_MATERIAU

Auteur(s) : J.P. LEFEBVRE

Date : 22/02/06

Clé : U4.43.01-I1 Page : 6/148

| | | |
|---------|--|----|
| 7.13.2 | Opérandes EPSD0..... | 77 |
| 7.13.3 | Opérandes AC / AT / BC / BT | 77 |
| 7.13.4 | Opérande BETA..... | 78 |
| 7.14 | Mot clé BETON_UMLV_FP | 78 |
| 7.14.1 | Syntaxe | 79 |
| 7.14.2 | Opérande | 79 |
| 7.15 | Mots clés facteur BETON_ECRO_LINE..... | 80 |
| 7.15.1 | Syntaxe | 80 |
| 7.15.2 | Opérandes | 80 |
| 7.16 | Mots clés facteur GLRC..... | 80 |
| 7.16.1 | Syntaxe | 80 |
| 7.16.2 | Opérandes | 81 |
| 7.17 | Mot clé JOINT_BA..... | 82 |
| 7.17.1 | Syntaxe | 82 |
| 7.17.2 | Opérandes | 82 |
| 8 | Comportements Métallo-Mécaniques..... | 84 |
| 8.1 | Mot clé facteur META_ACIER..... | 84 |
| 8.1.1 | Syntaxe..... | 84 |
| 8.1.2 | Opérandes pour les changements de phases | 84 |
| 8.1.3 | Opérandes pour la taille de grains | 86 |
| 8.2 | Mot clé facteur META_ZIRC..... | 87 |
| 8.2.1 | Syntaxe..... | 87 |
| 8.2.2 | Opérandes..... | 87 |
| 8.3 | Mot clé facteur DURT_META..... | 88 |
| 8.3.1 | Syntaxe..... | 88 |
| 8.3.2 | Opérandes..... | 88 |
| 8.4 | Mots clés facteur ELAS_META / ELAS_META_FO | 89 |
| 8.4.1 | Syntaxe..... | 89 |
| 8.4.2 | Opérandes..... | 90 |
| 8.5 | Mot clé facteur META_ECRO_LINE..... | 92 |
| 8.5.1 | Syntaxe..... | 92 |
| 8.5.2 | Opérandes..... | 92 |
| 8.6 | Mot clé facteur META_TRACTION..... | 93 |
| 8.6.1 | Syntaxe..... | 93 |
| 8.6.1.1 | Opérandes | 93 |
| 8.7 | Mot clé facteur META_VISC..... | 94 |
| 8.7.1 | Syntaxe..... | 94 |
| 8.7.2 | Opérandes..... | 94 |
| 8.8 | Mot clé facteur META_PT | 96 |
| 8.8.1 | Syntaxe..... | 96 |
| 8.8.2 | Opérandes..... | 96 |

| | |
|--|-----|
| 8.9 Mot clé facteur META_RE..... | 97 |
| 8.9.1 Syntaxe | 97 |
| 8.9.2 Opérandes | 97 |
| 9 Comportements THERMO-HYDRO-MECANIKES et des sols | 98 |
| 9.1 Mot clé simple COMP_THM..... | 98 |
| 9.2 Mot clé facteur THM_INIT..... | 99 |
| 9.2.1 Syntaxe | 99 |
| 9.2.2 Opérande TEMP..... | 100 |
| 9.2.3 Opérande PRE1..... | 100 |
| 9.2.4 Opérande PRE2..... | 100 |
| 9.2.5 Opérande PORO..... | 100 |
| 9.2.6 Opérande PRES_VAPE..... | 100 |
| 9.2.7 Opérande DEGR_SATU..... | 100 |
| 9.3 Mot clé facteur THM_LIQU..... | 101 |
| 9.3.1 Syntaxe | 101 |
| 9.3.2 Opérande RHO..... | 101 |
| 9.3.3 Opérande UN_SUR_K..... | 101 |
| 9.3.4 Opérande ALPHA | 101 |
| 9.3.5 Opérande CP..... | 101 |
| 9.3.6 Opérande VISC | 101 |
| 9.3.7 Opérande D_VISC_TEMP | 101 |
| 9.4 Mot clé facteur THM_GAZ..... | 102 |
| 9.4.1 Syntaxe | 102 |
| 9.4.2 Opérande MASS_MOL..... | 102 |
| 9.4.3 Opérande CP..... | 102 |
| 9.4.4 Opérande VISC..... | 102 |
| 9.4.5 Opérande D_VISC_TEMP | 102 |
| 9.5 Mot clé facteur THM_VAPE_GAZ..... | 102 |
| 9.5.1 Syntaxe | 102 |
| 9.5.2 Opérande MASS_MOL..... | 103 |
| 9.5.3 Opérande CP..... | 103 |
| 9.5.4 Opérande VISC..... | 103 |
| 9.5.5 Opérande D_VISC_TEMP | 103 |
| 9.6 Mot clé facteur THM_AIR DISS..... | 103 |
| 9.6.1 Syntaxe | 103 |
| 9.6.2 Opérande CP..... | 103 |
| 9.6.3 Opérande COEF_HENRY..... | 103 |
| 9.6.4 Opérande D_VISC_TEMP | 103 |
| 9.7 Mot clé facteur THM_DIFFU | 104 |
| 9.7.1 Syntaxe | 104 |
| 9.7.2 Opérande R_GAZ | 105 |

Titre : *Opérateur DEFI_MATERIAU*

Date : 22/02/06

Auteur(s) : **J.P. LEFEBVRE**

Clé : U4.43.01-I1

Page : 8/148

| | |
|---|-----|
| 9.7.3 Opérande RHO | 105 |
| 9.7.4 Opérande CP | 105 |
| 9.7.5 Opérande BIOT_COEF | 105 |
| 9.7.6 Opérande SATU_PRES | 105 |
| 9.7.7 Opérande D_SATU_PRES | 105 |
| 9.7.8 Opérande PESA_X | 105 |
| 9.7.9 Opérande PESA_Y | 105 |
| 9.7.10 Opérande PESA_Z | 105 |
| 9.7.11 Opérande PERM_IN | 106 |
| 9.7.12 Opérande PERMIN_X | 106 |
| 9.7.13 Opérande PERMIN_Y | 106 |
| 9.7.14 Opérande PERMIN_Z | 106 |
| 9.7.15 Opérande PERM_LIQU | 106 |
| 9.7.16 Opérande D_PERM_LIQU_SATU | 106 |
| 9.7.17 Opérande PERM_GAZ | 106 |
| 9.7.18 Opérande D_PERM_SATU_GAZ | 106 |
| 9.7.19 Opérande D_PERM_PRES_GAZ | 106 |
| 9.7.20 Opérande FICKV_T | 106 |
| 9.7.21 Opérande FICKV_S | 106 |
| 9.7.22 Opérande FICKV_PG | 107 |
| 9.7.23 Opérande FICKV_PV | 107 |
| 9.7.24 Opérande D_FV_T | 107 |
| 9.7.25 Opérande D_FV_PG | 107 |
| 9.7.26 Opérande FICKA_T | 107 |
| 9.7.27 Opérande FICKA_S | 107 |
| 9.7.28 Opérande FICKA_PA | 107 |
| 9.7.29 Opérande FICKA_PL | 107 |
| 9.7.30 Opérande D_FA_T | 107 |
| 9.7.31 Opérande LAMB_T | 107 |
| 9.7.32 Opérande LAMB_S | 108 |
| 9.7.33 Opérande LAMB_PHI | 108 |
| 9.7.34 Opérande LAMB_CT | 108 |
| 9.7.35 Opérande D_LB_T | 108 |
| 9.7.36 Opérande D_LB_S | 108 |
| 9.7.37 Opérande D_LB_PHI | 108 |
| 9.7.38 Opérande EMMAG | 108 |
| 9.8 Mot clé facteur SURF_ETAT_SATU (cf. [R7.01.14]) | 109 |
| 9.8.1 Syntaxe | 109 |
| 9.8.2 Opérande E_CHAR | 109 |
| 9.8.3 Opérande E_DECHAR | 109 |

| | |
|---|-----|
| 9.8.4 Opérande EV_KB | 109 |
| 9.8.5 Opérande RF | 109 |
| 9.8.6 Opérande XN | 109 |
| 9.8.7 Opérande EV_XM | 109 |
| 9.8.8 Opérande D_E_T | 110 |
| 9.8.9 Opérande ANG_FRT | 110 |
| 9.8.10 Opérande COHE | 110 |
| 9.8.11 Opérande RESI_TRAC | 110 |
| 9.8.12 Opérande ALPHA0 | 110 |
| 9.8.13 Opérande ALPHA1 | 110 |
| 9.8.14 Opérande ALPHA2 | 110 |
| 9.8.15 Opérande ALPHA3 | 110 |
| 9.8.16 Opérande ALPHA_S | 110 |
| 9.9 Mot clé facteur SURF_ETAT_NSAT (cf. [R7.01.14]) | 111 |
| 9.9.1 Syntaxe | 111 |
| 9.9.2 Opérande E_CHAR | 111 |
| 9.9.3 Opérande E_DECHAR | 111 |
| 9.9.4 Opérande RF | 111 |
| 9.9.5 Opérande XN | 111 |
| 9.9.6 Opérande EV_KB | 111 |
| 9.9.7 Opérande EV_XM | 112 |
| 9.9.8 Opérande EV_A | 112 |
| 9.9.9 Opérande EV_B | 112 |
| 9.9.10 Opérande EV_CT | 112 |
| 9.9.11 Opérande EV_SIGB | 112 |
| 9.9.12 Opérande D_E_T | 112 |
| 9.9.13 Opérande D_E_SUCC | 112 |
| 9.9.14 Opérande ANG_FRT | 112 |
| 9.9.15 Opérande ANG_FRT_ULT | 112 |
| 9.9.16 Opérande COHE | 112 |
| 9.9.17 Opérande D_COEH_SUCC | 112 |
| 9.9.18 Opérande RESI_TRAC | 112 |
| 9.9.19 Opérande SUCC_ULTM | 112 |
| 9.9.20 Opérande A_SURF_SATU | 113 |
| 9.9.21 Opérande B_SURF_SATU | 113 |
| 9.9.22 Opérande C_SURF_SATU | 113 |
| 9.9.23 Opérande D_SURF_SATU | 113 |
| 9.10 Mot clé facteur CAM_CLAY_THM (cf. [R7.01.14]) | 114 |
| 9.10.1 Syntaxe | 114 |
| 9.10.2 Opérande NU | 114 |

Titre : **Opérateur DEFI_MATERIAU**Date : **22/02/06**Auteur(s) : **J.P. LEFEBVRE**Clé : **U4.43.01-I1**Page : **10/148**

| | | |
|---------|------------------------------|-----|
| 9.10.3 | Opérande LAMBDA | 114 |
| 9.10.4 | Opérande KAPA..... | 114 |
| 9.10.5 | Opérande PRES_CRIT..... | 114 |
| 9.10.6 | Opérande M..... | 114 |
| 9.10.7 | Opérande GAMA..... | 114 |
| 9.10.8 | Opérande A0_PC | 114 |
| 9.10.9 | Opérande A1_PC | 115 |
| 9.10.10 | Opérande A2_PC | 115 |
| 9.10.11 | Opérande ALPHA0_PC..... | 115 |
| 9.10.12 | Opérande ALPHA1_PC..... | 115 |
| 9.10.13 | Opérande ALPHA2_PC..... | 115 |
| 9.10.14 | Opérande ALPHA3_PC..... | 115 |
| 9.10.15 | Opérande ALPHA_S | 115 |
| 9.11 | Mot clé CAM_CLAY..... | 116 |
| 9.11.1 | Syntaxe | 116 |
| 9.11.2 | Opérandes LAMBDA | 116 |
| 9.11.3 | Opérandes KAPA..... | 116 |
| 9.11.4 | Opérandes M | 116 |
| 9.11.5 | Opérandes PORO..... | 116 |
| 9.11.6 | Opérandes PRES_CRIT..... | 116 |
| 9.11.7 | Opérandes PA | 116 |
| 9.12 | Mot clé facteur CJS | 117 |
| 9.12.1 | Syntaxe | 117 |
| 9.12.2 | Opérande BETA_CJS..... | 118 |
| 9.12.3 | Opérande RM..... | 118 |
| 9.12.4 | Opérande N_CJS | 119 |
| 9.12.5 | Opérande KP | 119 |
| 9.12.6 | Opérande RC | 119 |
| 9.12.7 | Opérande A_CJS | 119 |
| 9.12.8 | Opérande R_INIT | 119 |
| 9.12.9 | Opérande B_CJS | 119 |
| 9.12.10 | Opérande C_CJS | 120 |
| 9.12.11 | Opérande PCO..... | 120 |
| 9.12.12 | Opérande GAMMA_CJS..... | 120 |
| 9.12.13 | Opérande MU_CJS | 120 |
| 9.12.14 | Opérande PA..... | 120 |
| 9.12.15 | Opérande Q_INIT | 120 |
| 9.13 | Mot clé facteur LAIGLE | 121 |
| 9.13.1 | Syntaxe | 121 |
| 9.13.2 | Opérande GAMMA_ULT..... | 121 |

Titre : **Opérateur DEFI_MATERIAU**

Date : 22/02/06

Auteur(s) : **J.P. LEFEBVRE**

Clé : U4.43.01-I1

Page : 11/148

| | | |
|---------|-------------------------------------|-----|
| 9.13.3 | Opérande GAMMA_E..... | 121 |
| 9.13.4 | Opérande M_ULT..... | 121 |
| 9.13.5 | Opérande M_E..... | 121 |
| 9.13.6 | Opérande A_E..... | 122 |
| 9.13.7 | Opérande M_PIC..... | 122 |
| 9.13.8 | Opérande A_PIC..... | 122 |
| 9.13.9 | Opérande ETA..... | 122 |
| 9.13.10 | Opérande SIGMA_C..... | 122 |
| 9.13.11 | Opérandes GAMMA et KSI..... | 122 |
| 9.13.12 | Opérande GAMMA_CJS..... | 122 |
| 9.13.13 | Opérande SIGMA_P1..... | 122 |
| 9.13.14 | Opérande PA..... | 122 |
| 9.14 | Mot clé facteur DRUCKER_PRAGER..... | 123 |
| 9.14.1 | Syntaxe..... | 123 |
| 9.14.2 | Opérande ECROUISSAGE..... | 123 |
| 9.14.3 | Opérande ALPHA..... | 123 |
| 9.14.4 | Opérande P_ULTM..... | 123 |
| 9.14.5 | Opérande SY..... | 124 |
| 9.14.6 | Opérande H..... | 124 |
| 9.14.7 | Opérande SY_ULTM..... | 124 |
| 9.15 | Mot clé facteur BARCELONE..... | 124 |
| 9.15.1 | Syntaxe..... | 124 |
| 9.15.2 | Opérandes R, BETA..... | 124 |
| 9.15.3 | Opérande KC..... | 124 |
| 9.15.4 | Opérande PCO_INIT..... | 124 |
| 9.15.5 | Opérande KAPAS..... | 124 |
| 9.15.6 | Opérande LAMBDA..... | 125 |
| 9.15.7 | Opérande ALPHAB..... | 125 |
| 9.16 | Mot clé facteur HOEK_BROWN..... | 125 |
| 9.16.1 | Syntaxe..... | 125 |
| 9.16.2 | Opérande GAMMA_RUP..... | 125 |
| 9.16.3 | Opérande GAMMA_RES..... | 125 |
| 9.16.4 | Opérande S_END..... | 125 |
| 9.16.5 | Opérande S_RUP..... | 125 |
| 9.16.6 | Opérande M_END..... | 125 |
| 9.16.7 | Opérande M_RUP..... | 125 |
| 9.16.8 | Opérande BETA..... | 126 |
| 9.16.9 | Opérande ALPHAB..... | 126 |
| 9.16.10 | Opérande PHI_RUP..... | 126 |
| 9.16.11 | Opérande PHI_RES..... | 126 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 9.16.12 | Opérande PHI_END | 126 |
| 10 | Comportements spécifiques aux éléments 1D | 127 |
| 10.1 | Mots clés facteur VMIS_POUTRE / VMIS_POUTRE_FO | 127 |
| 10.1.1 | Syntaxe | 128 |
| 10.2 | Mot clé facteur ECRO_FLEJOU | 128 |
| 10.2.1 | Syntaxe | 128 |
| 10.3 | Mot clé facteur ECRO_ASYM_LINE (cf. [R5.03.09]) | 129 |
| 10.3.1 | Syntaxe | 129 |
| 11 | Comportements particuliers | 130 |
| 11.1 | Mot clé facteur LEMAITRE_IRRA | 130 |
| 11.1.1 | Syntaxe | 131 |
| 11.2 | Mot clé facteur LMARC_IRRA | 131 |
| 11.2.1 | Syntaxe | 132 |
| 11.3 | Mot clé facteur DIS_GRICRA | 132 |
| 11.3.1 | Syntaxe | 133 |
| 11.3.2 | Opérandes | 133 |
| 11.4 | Mot clé facteur GATT_MONERIE | 134 |
| 11.4.1 | Syntaxe | 134 |
| 11.5 | Mot clé facteur DIS_CONTACT | 134 |
| 11.5.1 | Syntaxe | 135 |
| 11.5.2 | Opérandes | 136 |
| 11.6 | Mot clé facteur ASSE_CORN : comportement d'un assemblage boulonné | 138 |
| 11.6.1 | Syntaxe | 138 |
| 11.6.2 | Opérandes | 138 |
| 11.7 | Mot clé facteur ARME : comportement d'un armement de ligne aérienne | 139 |
| 11.7.1 | Syntaxe | 139 |
| 11.7.2 | Opérande | 140 |
| 12 | Comportement fluide | 141 |
| 12.1 | Mot clé facteur FLUIDE | 141 |
| 12.1.1 | Syntaxe | 141 |
| 12.1.2 | Opérandes | 141 |
| 13 | Données Matériaux associées à des post-traitements | 142 |
| 13.1 | Mot clé facteur FATIGUE | 142 |
| 13.1.1 | Syntaxe | 142 |
| 13.1.2 | Opérande WOHLER | 142 |
| 13.1.3 | Opérandes A_BASQUIN / BETA_BASQUIN | 143 |
| 13.1.4 | Opérandes A0 / A1 / A2 / A3 / SL | 143 |
| 13.1.5 | Opérande MANSON_COFFIN | 144 |
| 13.1.6 | Opérande E_REFE | 144 |
| 13.1.7 | Opérande D0 | 144 |
| 13.1.8 | Opérande TAU0 | 144 |
| 13.2 | Mot clé facteur DOMMA_LEMAITRE | 144 |

Titre : **Opérateur DEFI_MATERIAU**

Date : 22/02/06

Auteur(s) : **J.P. LEFEBVRE**

Clé : U4.43.01-I1

Page : 13/148

| | | |
|--------|--|-----|
| 13.2.1 | Opérande S | 144 |
| 13.2.2 | Opérande EPSP_SEUIL | 144 |
| 13.2.3 | Opérande EXP_S | 144 |
| 13.3 | Mot clé facteur CISA_PLAN_CRIT | 145 |
| 13.3.1 | Opérande MATAKE_A | 145 |
| 13.3.2 | Opérande MATAKE_B | 145 |
| 13.3.3 | Opérande ENDU_FT | 145 |
| 13.4 | Mot clé facteur WEIBULL / WEIBULL_FO | 146 |
| 13.4.1 | Syntaxe | 146 |
| 13.4.2 | Opérandes | 147 |
| 13.5 | Mots clés facteur RCCM / RCCM_FO | 147 |
| 13.5.1 | Syntaxe | 147 |
| 13.5.2 | Opérande SY_02 | 148 |
| 13.5.3 | Opérande SM | 148 |
| 13.5.4 | Opérande SU | 148 |
| 13.5.5 | Opérande SC | 148 |
| 13.5.6 | Opérande SH | 148 |
| 13.5.7 | Opérande S | 148 |
| 13.5.8 | Opérande N_KE_RCCM / M_KE_RCCM | 148 |

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]
    |    /   CIN1_CHAB,                       #   voir[§ 4.5]
    |    /   CIN1_CHAB_FO,
    |    /   CIN2_CHAB,                       #   voir[§ 4.6]
    |    /   CIN2_CHAB_FO,
    |    /   TAHERI,                           #   voir[§ 4.7]
    |    /   TAHERI_FO,
    |    /   POLY_CFC,                        #   voir[§ 4.8]
    |    /   POLY_CFC_FO,
    |    ECOUC_VISC1,                        #   voir[§ 4.9]
    |    ECOUC_VISC2,
    |    ECOUC_VISC3,
    |    ECRO_CIN1,
    |    ECRO_CIN2,
    |    ECRO_ISOT1,
    |    ECRO_ISOT2,
    |    /   LEMAITRE,                        #   voir[§ 4.10]
    |    /   LEMAITRE_FO,
    |    VISC_SINH,                           #   voir[§ 4.11]
    |    /   LEMA_SEUIL,                       #   voir[§ 4.12]
    |    /   LEMA_SEUIL_FO,
```

Titre : Opérateur DEFI MATERIAU
Auteur(s) : J.P. LEFEBVRE

Date : 22/02/06
Clé : U4.43.01-I1 Page : 15/148

```
|    ZIRC_CYRA2,                               # voir[§ 4.13]
|    ZIRC_EPRI,                                # voir[§ 4.14]
|    VISC_IRRA_LOG,                            # voir[§ 4.15]
|    /   LMARC,                                # voir[§ 4.16]
|    /   LMARC_FO,
# Comportements liés à l'endommagement et la rupture [§ 5]
|    /   ROUSSELIER,                           # voir[§ 5.1]
|    /   ROUSSELIER_FO,
|    /   VENDO_CHAB,                           # voir[§ 5.2]
|    /   VENDO_CHAB_FO,
|    ENDO_ORTH_BETON,                         # voir[§ 5.3]
|    NON_LOCAL,                                # voir[§ 5.4]
|    /   RUPT_FRAG,                            # voir[§ 5.5]
|    /   RUPT_FRAG_FO,
|    CORR_ACIER,                               # voir[§ 5.6]
# Comportements Thermiques [§ 6]
|    /   THER,                                 # voir[§ 6.1]
|    /   THER_FO,
|    /   THER_ORTH,                            # voir[§ 6.2]
|    /   THER_NL,                              # voir[§ 6.3]
|    /   THER_COQU,                            # voir[§ 6.4]
|    /   THER_COQU_FO,
# Comportements spécifiques aux bétons [§ 7]
|    THER_HYDR,                                # voir[§ 7.1]
|    SECH_GRANGER,                            # voir[§ 7.2]
|    SECH_MENSI,                               # voir[§ 7.3]
|    SECH_BAZANT,                              # voir[§ 7.4]
|    SECH_NAPPE,                               # voir[§ 7.5]
|    PINTO_MENEGOTTO,                         # voir[§ 7.6]
|    BPEL_BETON et BPEL_ACIER,                # voir[§ 7.7]
|    BETON_DOUBLE_BP,                         # voir[§ 7.8]
|    GRANGER_FP, GRANGER_FP_INDT et V_GRANGER_FP,
|                                               # voir[§ 7.9]
|    NADAI_B,                                 # voir[§ 7.10]
|    BAZANT_FD,                                # voir[§ 7.11]
|    LABORD_1D,                                # voir[§ 7.12]
|    /   MAZARS,                                # voir[§ 7.13]
|    /   MAZARS_FO,
|    BETON_UMLV_FP,                            # voir[§ 7.14]
|    BETON_ECRO_LINE,                         # voir[§ 7.15]
|    GLRC,                                     # voir[§ 7.16]
|    JOINT_BA,                                 # voir[§ 7.17]
# Comportements Metallo-Mécaniques [§ 8]
|    META_ACIER,                               # voir[§ 8.1]
|    META_ZIRC,                                # voir[§ 8.2]
|    DURT_META,                                # voir[§ 8.3]
|    /   ELAS_META,                            # voir[§ 8.4]
|    /   ELAS_META_FO,
|    META_ECRO_LINE,                         # voir[§ 8.5]
|    META_TRACTION,                            # voir[§ 8.6]
|    META_VISC,                                # 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'      , # voir[§ 9.1]
                  / 'LIQU_GAZ'        ,
                  / 'GAZ'              ,
                  / 'LIQU_GAZ_ATM'     ,
                  / 'LIQU_VAPE_GAZ'    ,
                  / 'LIQU_VAPE'        ,
                  / 'LIQU_SATU_GAT'    ,
                  / 'LIQU_NSAT_GAT'    ,
                  / 'LIQU_AD_GAZ_VAPE' ,

| THM_INIT,                # voir[§ 9.2]
| THM_LIQU,                # voir[§ 9.3]
| THM_GAZ,                 # voir[§ 9.4]
| THM_VAPE_GAZ,           # voir[§ 9.5]
| THM_AIR DISS,           # voir[§ 9.6]
| THM_DIFFU,              # voir[§ 9.7]
| SURF_ETAT_SATU,         # voir[§ 9.8]
| SURF_ETAT_NSAT,        # voir[§ 9.9]
| CAM_CLAY_THM,           # voir[§ 9.10]
| CAM_CLAY,               # voir[§ 9.11]
| CJS,                    # voir[§ 9.12]
| LAIGLE,                 # voir[§ 9.13]
| DRUCKER_PRAGER,        # voir[§ 9.14]
| BARCELONE,              # voir[§ 9.15]
| HOEK_BROWN,            # voir[§ 9.16]

# Comportement spécifiques aux éléments 1D [§ 10]
| / VMIS_POUTRE,          # voir[§ 10.1]
| / VMIS_POUTRE_FO,
| ECRO_FLEJOU,           # voir[§ 10.2]
| ECRO_ASYM_LINE,        # voir[§ 10.3]

# Comportements particuliers [§ 11]
| LEMAITRE_IRRA,          # voir[§ 11.1]
| LMARC_IRRA,             # voir[§ 11.2]
| DIS_GRICRA,             # voir[§ 11.3]
| GATT_MONERIE,           # voir[§ 11.4]
| DIS_CONTACT,           # voir[§ 11.5]
| ASSE_CORN,              # voir[§ 11.6]
| ARME,                   # voir[§ 11.7]

# 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]
| / WEIBULL_FO,
| / RCCM,                 # voir[§ 13.5]
| / RCCM_FO,
| )
```

Remarque :

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

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


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

3 Comportements élastiques généraux

3.1 Mots clés facteur ELAS / ELAS_FO

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

3.1.1 Syntaxe

```

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

```

3.1.2 Opérands 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 dessiccation.

◇ / K_ENDOGE = e

Coefficient de retrait de endogène.

Ces caractéristiques sont utilisés avec le comportement défini par les mots clés BETON_DOUBLE_BP, GRANGER_FP et BAZANT_FD.

3.1.7 Opérande FONC_DESORP

FONC_DESORP : courbe de sorption-désorption [R7.01.12] donnant l'hygrométrie h en fonction de la teneur en eau C . Opérande obligatoire avec la loi BAZANT_FD [R7.01.01].

3.2 Mot clé facteur ELAS_FLUI

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

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

La masse volumique équivalente de la structure 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 (défini le confinement).

3.2.1 Syntaxe

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

3.2.2 Opérande ELAS_FLUI

◇ / ELAS_FLUI = _F (

Mot clé facteur permettant de calculer la masse volumique équivalente d'une structure poutre avec fluide interne et fluide externe (cette relation de comportement ne peut être utilisée qu'avec des éléments de poutre).

♦ RHO = rho

Masse volumique du matériau.

♦ E = yg

Module d'Young.

♦ NU = nu

Coefficient de Poisson.

♦ PROF_RHO_F_INT = rhoi

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

♦ PROF_RHO_F_EXT = rhoe

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

♦ COEF_MASS_AJOU = fonc_cm

Concept de type [fonction] produit par l'opérateur FONC_FLUI_STRU [U4.35.02].

Cette fonction constante, paramétrée par l'abscisse curviligne, fournit la valeur du coefficient de masse ajoutée C_m .

3.3 Mot clé facteur APPUI_ELAS

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

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

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

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

```
◇ E_N = rign, [R]
Valeur de la raideur surfacique normale.
```

```
◇ E_TAN = rign, [R]
Valeur de la raideur surfacique tangentielle.
```

3.4 Mot clé facteur CABLE

Définition de la caractéristique élastique non linéaire, constante, pour les câbles : deux comportements élastiques différents en traction et en compression, définis par les modules d'Young E et EC (module en compression).

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

3.4.1 Syntaxe

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

3.4.2 Opérandes d'élasticité

```
◇ EC_SUR_E = ecse
```

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

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

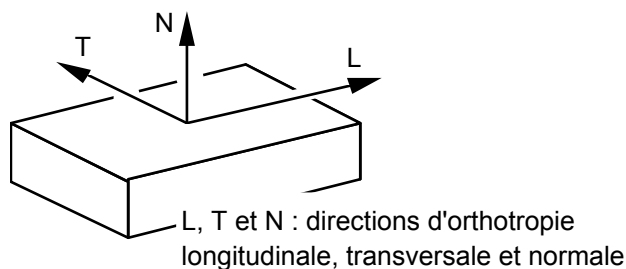
Le lecteur pourra se reporter aux documentations suivantes :

[U4.42.03] DEFI_COQU_MULT

[U4.42.01] AFFE_CARA_ELEM

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

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



- ◆ $E_T = ygt$ Module d'Young transversal.
- ◇ $E_N = ygn$ Module d'Young normal.
- ◆ $GL_T = glt$ Module de cisaillement dans le plan LT.
- ◇ $G_{TN} = gtn$ Module de cisaillement dans le plan TN.
- ◇ $G_{LN} = gln$ Module de cisaillement dans le plan LN.

Remarque :

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

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

Remarques importantes :

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

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

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

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

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

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

◇ NU_TN = nutn Coefficient de Poisson dans le plan TN.

◇ NU_LN = nuln Coefficient de Poisson dans le plan LN.

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

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

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

3.5.3 Opérande RHO

◇ RHO = rho
Masse volumique.

3.5.4 Opérandes ALPHA_L / ALPHA_T / ALPHA_N

◇ ALPHA_L = dil
Coefficient de dilatation thermique moyen longitudinal.

◇ ALPHA_T = dit
Coefficient de dilatation thermique moyen transversal.

◇ ALPHA_N = din
Coefficient de dilatation thermique moyen normal.

3.5.5 Opérandes TEMP_DEF_ALPHA / PRECISION

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

3.5.6 Critères de rupture

Ces différents critères peuvent être utilisés par la commande CALC_ELEM sous le mot clé 'CRIT_ELNO_RUPT' [U4.81.01], [R4.01.01].

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

◇ XC = col
Critère de rupture en compression dans le sens longitudinal.

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

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

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

3.6 Mots clés facteur ELAS_ISTR / ELAS_ISTR_FO

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

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

3.6.1 Syntaxe

```
/ ELAS_ISTR = _F (   ♦ E_L       =   ygl ,       [R]
                     ♦ E_N       =   ygn ,       [R]
                     ♦ G_LN      =   gln ,       [R]
                     ♦ NU_LT     =   nult ,      [R]
                     ♦ NU_LN     =   nuln ,      [R]
                     ◇ ALPHA_L =   / dil ,      [R]
                                 / 0.0 ,      [DEFAULT]
                     ◇ ALPHA_N =   / din ,      [R]
                                 / 0.0 ,      [DEFAULT]
                     ◇ RHO       =   / rho ,     [R]
                                 / 0.0 ,      [DEFAULT]
                                              )

/ ELAS_ISTR_FO = _F (   ♦ E_L       =   ygl ,       [fonction**]
                     ♦ E_N       =   ygn ,       [fonction**]
                     ♦ G_LN      =   gln ,       [fonction**]
                     ♦ NU_LT     =   nult ,      [fonction**]
                     ♦ NU_LN     =   nuln ,      [fonction**]
                     ◇ ALPHA_L =   dil ,       [fonction**]
                     ◇ ALPHA_N =   din ,       [fonction**]
                     ◇ RHO       =   / rho ,     [R]
                                 / 0.0 ,      [DEFAULT]
                     ◇ TEMP_DEF_ALPHA = Tdef , [R]
                     ◇ PRECISION =   / ε ,      [R]
                                         / 1. ,    [DEFAULT]
                                              )
```

3.6.2 Opérands d'élasticité

Le lecteur pourra se reporter aux documentations suivantes :

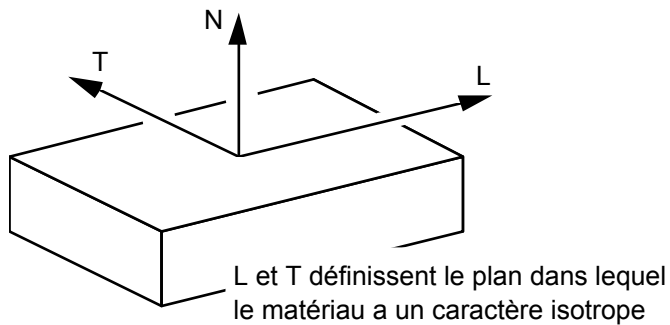
[U4.42.03] DEFI_COQU_MULT

[U4.42.01] AFFE_CARA_ELEM

pour définir un repère (L, T, N) lié aux éléments et définissant l'isotropie transverse du matériau, ce dernier étant isotrope dans le plan LT.

Remarque :

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



- ◆ $E_L = ygl$
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 $gl_t = \frac{ygl}{2(1+nult)}$.

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

Remarques importantes :

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

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

nult doit s'interpréter de la manière suivante :

si l'on exerce une traction selon l'axe N donnant lieu à une déformation de traction selon cet

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

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

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

3.6.3 Opérande RHO

- ◇ RHO = rho
Masse volumique.

3.6.4 Opérandes ALPHA_L / ALPHA_N

- ◇ ALPHA_L = dil
Coefficient de dilatation thermique moyen dans le plan LT.
- ◇ ALPHA_N = din
Coefficient de dilatation thermique moyen normal.

3.6.5 Opérandes TEMP_DEF_ALPHA / PRECISION

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

3.7 Mot clés facteur ELAS_COQUE / ELAS_COQUE_FO

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

3.7.1 Syntaxe

```
/ ELAS_COQUE = _F (
/ ELAS_COQUE_FO = _F
    ◇ MEMB_L = C1111 , [R] ou [fonction**]
    ◇ MEMB_LT = C1122 , [R] ou [fonction**]
    ◇ MEMB_T = C2222 , [R] ou [fonction**]
    ◇ MEMB_G_LT = C1212 , [R] ou [fonction**]
    ◇ FLEX_L = D1111 , [R] ou [fonction**]
    ◇ FLEX_LT = D1122 , [R] ou [fonction**]
    ◇ FLEX_T = D2222 , [R] ou [fonction**]
    ◇ FLEX_G_LT = D1212 , [R] ou [fonction**]
    ◇ CISA_L = G11 , [R] ou [fonction**]
    ◇ CISA_T = G22 , [R] ou [fonction**]
    ◇ RHO = rho , [R] ou [fonction**]
    ◇ ALPHA = alpha , [R] ou [fonction**]
    ◇ M_LLLL = H1111 , [R] ou [fonction**]
    ◇ M_LLTT = H1111 , [R] ou [fonction**]
    ◇ M_LLLT = H1112 , [R] ou [fonction**]
    ◇ M_TTTT = H2222 , [R] ou [fonction**]
    ◇ M_TTLT = H2212 , [R] ou [fonction**]
    ◇ M_LTLT = H1212 , [R] ou [fonction**]
    ◇ F_LLLL = A1111 , [R] ou [fonction**]
    ◇ F_LLLT = A1111 , [R] ou [fonction**]
    ◇ F_LLLT = A1112 , [R] ou [fonction**]
    ◇ F_TTTT = A2222 , [R] ou [fonction**]
    ◇ F_TTLT = A2212 , [R] ou [fonction**]
    ◇ F_LTLT = A1212 , [R] ou [fonction**]
    ◇ MF_LLLL = B1111 , [R] ou [fonction**]
    ◇ MF_LLTT = B1111 , [R] ou [fonction**]
    ◇ MF_LLLT = B1112 , [R] ou [fonction**]
    ◇ MF_TTTT = B2222 , [R] ou [fonction**]
    ◇ MF_TTLT = B2212 , [R] ou [fonction**]
    ◇ MF_LTLT = B1212 , [R] ou [fonction**]
    ◇ MC_LLLZ = E1111 , [R] ou [fonction**]
    ◇ MC_LLTZ = E1111 , [R] ou [fonction**]
    ◇ MC_TTLZ = E1112 , [R] ou [fonction**]
    ◇ MC_TTTZ = E2222 , [R] ou [fonction**]
    ◇ MC_LTLZ = E2212 , [R] ou [fonction**]
    ◇ MC_LTTZ = E1212 , [R] ou [fonction**]
    ◇ FC_LLLZ = F1111 , [R] ou [fonction**]
    ◇ FC_LLTZ = F1111 , [R] ou [fonction**]
    ◇ FC_TTLZ = F1112 , [R] ou [fonction**]
    ◇ FC_TTTZ = F2222 , [R] ou [fonction**]
    ◇ FC_LTLZ = F2212 , [R] ou [fonction**]
    ◇ FC_LTTZ = F1212 , [R] ou [fonction**]
    ◇ C_LZLZ = G1313 , [R] ou [fonction**]
    ◇ C_TZTZ = G2323 , [R] ou [fonction**]
    ◇ C_TZTZ = G1323 , [R] ou [fonction**]
)
```

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

Membrane :

Flexion :

Cisaillement :

$$\mathbf{C} = \frac{\mathbf{E}h}{1-\nu^2} \begin{vmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{1-\nu}{2}\right) \end{vmatrix} \quad \mathbf{D} = \frac{\mathbf{E}h^3}{12(1-\nu^2)} \begin{vmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{1-\nu}{2}\right) \end{vmatrix} \quad \mathbf{G} = \frac{5\mathbf{E}h}{12(1+\nu)} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

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 :

Flexion :

Cisaillement :

$$\mathbf{C} = \begin{vmatrix} C_{1111} & C_{1122} & 0 \\ C_{1122} & C_{2222} & 0 \\ 0 & 0 & C_{1212} \end{vmatrix} \quad \mathbf{D} = \begin{vmatrix} D_{1111} & D_{1122} & 0 \\ D_{1122} & D_{2222} & 0 \\ 0 & 0 & D_{1212} \end{vmatrix} \quad \mathbf{G} = \begin{vmatrix} G_{11} & 0 \\ 0 & G_{22} \end{vmatrix}$$

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 :

Flexion :

Membrane - flexion :

$$\mathbf{HM} = \begin{vmatrix} H_{1111} & H_{1122} & H_{1112} \\ 0 & H_{2222} & H_{2212} \\ 0 & 0 & H_{1212} \end{vmatrix} \quad \mathbf{HF} = \begin{vmatrix} A_{1111} & A_{1122} & A_{1112} \\ 0 & A_{2222} & A_{2212} \\ 0 & 0 & A_{1212} \end{vmatrix} \quad \mathbf{HMF} = \begin{vmatrix} B_{1111} & B_{1122} & B_{1112} \\ 0 & B_{2222} & B_{2212} \\ 0 & 0 & B_{1212} \end{vmatrix}$$

Membrane cisaillement :

Flexion - cisaillement :

Cisaillement :

$$\mathbf{HMC} = \begin{vmatrix} E_{1113} & E_{1123} \\ E_{2213} & E_{2223} \\ E_{1213} & E_{1223} \end{vmatrix} \quad \mathbf{HFC} = \begin{vmatrix} F_{1113} & F_{1123} \\ F_{2213} & F_{2223} \\ F_{1213} & F_{1223} \end{vmatrix} \quad \mathbf{HC} = \begin{vmatrix} G_{1313} & G_{1323} \\ G_{1323} & G_{2323} \end{vmatrix}$$

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'écroûissage se définissent par META ECRO LINE ou META TRACTION.

4.2 Mots clés facteur ECRO_LINE / ECRO_LINE_FO

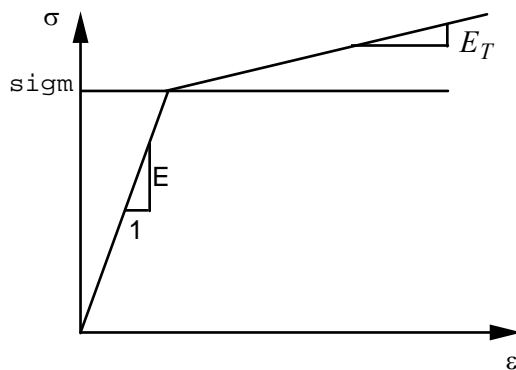
Définition d'une courbe d'écrouissage linéaire ou d'un ensemble de courbes dépendant de la température.

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.
- ◆ $SY = \text{sigm}$
Limite d'élasticité.



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

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

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

Il faut donc respecter : $E_T < E$

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

4.3 Mots clés facteur PRAGER / PRAGER_FO

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

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

4.3.1 Syntaxe

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

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

4.4 Mot clé CHABOCHE

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

Brièvement ces relations sont :

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

avec :

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

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

et des relations classiques de la plasticité.

Remarque :

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

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

Pour ce faire, il faut utiliser *VMIS_CIN1_CHAB_FO* ou *VMIS_CIN2_CHAB_FO*.

4.4.1 Syntaxe

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

4.5 Mots clés facteur CIN1_CHAB / CIN1_CHAB_FO

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

Brièvement ces relations sont :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 prend en compte les variations des paramètres avec la température. Ces termes sont nécessaires car leur non prise en compte conduirait à des résultats inexacts.

4.5.1 Syntaxe

```
CIN1_CHAB (CIN1_CHAB_FO) = _F(
  ♦ R_0 = R_0 , [R] ou [fonction**]
  ♦ R_I = R_I, (inutile si B=0) [R] ou [fonction**]
  ♦ B = b, (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 :

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

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

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

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

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

$$\mathbf{X}_2 = \frac{2}{3} C_2(p) \boldsymbol{\alpha}_2, \quad \text{éq 4.6-3}$$

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

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

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 prend en compte les variations des paramètres avec la température. Ces termes sont nécessaires car leur non prise en compte conduirait à des résultats inexacts.

4.6.1 Syntaxe

```
CIN2_CHAB (CIN2_CHAB_FO) = _F(
    ♦ R_0 = R_0, [R] ou [fonction**]
    ◇ R_I = R_I, (inutile si B=0) [R] ou [fonction**]
    ◇ B = b, (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 :

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

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

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 =  $\alpha$  , [R]
                  ♦ M = m , [R]
                  ♦ A = A , [R]
                  ♦ B = B , [R]
                  ♦ C1 = C1 , [R]
                  ♦ C_INF = Cinf, [R]
                  ♦ S = S , [R]
                  )
/ TAHERI_FO = _F ( ♦ R_0 = R , [fonction**]
                  ♦ ALPHA =  $\alpha$  , [fonction**]
                  ♦ M = m , [fonction**]
                  ♦ A = A , [fonction**]
                  ♦ B = B , [fonction**]
                  ♦ C1 = C1 , [fonction**]
                  ♦ C_INF = Cinf, [fonction**]
                  ♦ S = S , [fonction**]
                  )

```

Remarque :

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

4.7.2 Syntaxe

```

| / OHNO :
  / OHNO_FO : _F ( ♦ 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**]
                  )

```

4.8 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.

4.8.1 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**]
                     )
```


4.9 Mots clés facteurs Ecou_VISC1, Ecou_VISC2, Ecou_VISC3, Ecrou_CIN1, Ecrou_CIN2, Ecrou_ISOT1, Ecrou_ISOT2

Définition des coefficients des modèles de comportement monocristallin ou polycristallin [R5.03.11]. En plus de ces caractéristiques, les constantes élastiques doivent être définies sous le mot clé ELAS ou ELAS_ORTH pour les coefficients réels ou ELAS_FO pour les coefficients dépendant de la température. Le comportement lié à chaque système de glissement d'un monocristal ou d'une phase d'un polycristal est (dans l'ensemble des comportements envisagés) de type élasto-visco-plastique. Du fait que l'on s'intéresse à chaque fois à une seule direction de glissement, le comportement est mono-dimensionnel. Il peut se décomposer en 3 types d'équations :

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

La relation d'écoulement Ecou_VISC1 est :

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

La relation d'écoulement Ecou_VISC2 est :

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

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

La relation d'écoulement Ecou_VISC3 est :

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

les paramètres sont : k, Constante de Boltzmann, en eV/K, τ_μ , Seuil d'écoulement (homogène à une contrainte), $\dot{\gamma}_0^*$ Vitesse d'écoulement initiale, ΔV^* Volume d'activation, ΔG_0 Gain d'énergie lié au franchissement d'obstacle.

L'écrouissage cinématique peut être de la forme Ecrou_CIN1 :

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

ou bien Ecrou_CIN2 :

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

L'écrouissage isotrope peut par exemple être de la forme Ecrou_ISOT1

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

Ou encore Ecrou_ISOT2 :

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

4.9.1 Syntaxe

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

```

      ECOU_VISC1 = _F (   ♦ C        = C                [R]
                       ♦ K        = K,                [R]
                       ♦ N        = n,                [R]
                       )
      ECOU_VISC1 = _F (   ♦ C        = C                [R]
                       ♦ K        = K,                [R]
                       ♦ N        = n,                [R]
                       ♦ A        = K,                [R]
                       ♦ D        = n,                [R]
                       )
      ECOU_VISC3 = _F (   ♦ K        = k                [R]
                       ♦ TAUMU =  $\tau_\mu$                 [R]
                       ♦ GAMMA0 =  $\dot{\gamma}_0^*$                 [R]
                       ♦ DELTAV =  $\Delta V^*$                 [R]
                       ♦ DELTAG0 =  $\Delta G_0$                 [R]
                       )

      ECRO_ISOT1 = _F(   ♦ R_0 = R                        [R]
                       ♦ Q = Q,                        [R]
                       ♦ B = b                        [R]
                       ♦ H = h                        [R]
                       ) ,
      ECRO_ISOT2 = _F (   ♦ R_0 = R0                        [R]
                       ♦ Q1 = Q1                        [R]
                       ♦ B1 = b1                        [R]
                       ♦ H = h                        [R]
                       ♦ Q2 = Q2                        [R]
                       ♦ B2 = b2                        [R]
                       ) ,
      ECRO_CINE1 = _F(   ♦ D = D                        [R] ) ,
                       ) ,
      ECRO_CINE2 = _F(   ♦ D = D                        [R]
                       ♦ GM = M                        [R]
                       ♦ PM = m                        [R]
                       ♦ C = C                        [R]
                       )

```

4.10 Mots clés facteur LEMAITRE / LEMAITRE_FO

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

Les équations sont les suivantes :

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

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

4.10.1 Syntaxe

```

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

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

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.

4.11 Mot clé facteur VISC_SINH

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

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

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

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

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

Ce modèle de viscosité est disponible :

- avec le modèle de Rousselier version PETIT_REAC : loi de comportement ROUSS_VISC
- avec les modèles de plasticité VMIS_ISOT_TRAC et VMIS_ISOT_LINE version SIMO_MIEHE : lois de comportement VISC_ISOT_TRAC et VISC_ISOT_LINE.

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

4.11.1 Syntaxe

```

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

```

4.12 Mot clé LEMA_SEUIL

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

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_e + \varepsilon_{th} + \varepsilon_a + \varepsilon_v$$

$$\sigma = \mathbf{A}(T)\varepsilon_e$$

$$\dot{\varepsilon}_v = g(\sigma_{eq}, \lambda, T) \frac{3}{2} \frac{\tilde{\sigma}}{\sigma_{eq}}$$

avec :

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

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

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

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

et :

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

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

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

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

Quant au paramètre Φ , il s'agit du flux de neutrons qui bombarde le matériau. Il doit être renseigné sous le mot clé facteur VARI_COMM de la commande STAT_NON_LINE.

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

4.12.1 Syntaxe

```

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

```

4.13 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).

Ceci 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.

4.13.1 Syntaxe

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

4.14 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.

4.14.1 Syntaxe

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

4.15 Mot clé facteur VISC_IRRA_LOG

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

La formulation est la suivante :

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

ε_f : déformation axiale de fluage
 Q : énergie d'activation
 T : température d'activation (en °K)
 σ : contrainte axiale appliquée au tube guide
 ϕt : flux neutronique (10^{+20} neutrons / cm²)
 ω : constante de temps
 A, B : constantes

4.15.1 Syntaxe

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

4.16 Mots clés facteur LMARC / LMARC_FO

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

Brièvement, les relations de comportement sont :

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

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

Remarque :

$\tilde{\sigma}$ représente le déviateur des contraintes et $|\tilde{\sigma} - \mathbf{X}|$ 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.

4.16.1 Syntaxe

```

/ LMARC =
/ LMARC_FO = _F (
    ♦ R_0      = R0      , [R] ou [fonction**]
    ♦ DE_0     = eps0    , [R] ou [fonction**]
    ♦ N        = n       , [R] ou [fonction**]
    ♦ K        = k       , [R] ou [fonction**]
    ♦ Y_0      = y0      , [R] ou [fonction**]
    ♦ Y_I      = yinfi   , [R] ou [fonction**]
    ♦ B        = b       , [R] ou [fonction**]
    ♦ A_0      = X0      , [R] ou [fonction**]
    ♦ RM       = rm      , [R] ou [fonction**]
    ♦ M        = m       , [R] ou [fonction**]
    ♦ P        = p       , [R] ou [fonction**]
    ♦ P1       = p1      , [R] ou [fonction**]
    ♦ P2       = p2      , [R] ou [fonction**]
    ♦ M11      = M11     , [R] ou [fonction**]
    ♦ M22      = M22     , [R] ou [fonction**]
    ♦ M33      = M33     , [R] ou [fonction**]
    ♦ M66      = M66     , [R] ou [fonction**]
    ♦ N11      = N11     , [R] ou [fonction**]
    ♦ N22      = M22     , [R] ou [fonction**]
    ♦ N33      = N33     , [R] ou [fonction**]
    ♦ N66      = N66     , [R] ou [fonction**]
    ♦ Q11      = Q11     , [R] ou [fonction**]
    ♦ Q22      = Q22     , [R] ou [fonction**]
    ♦ Q33      = Q33     , [R] ou [fonction**]
    ♦ Q66      = Q66     , [R] ou [fonction**]
    ♦ R11      = R11     , [R] ou [fonction**]
    ♦ R22      = R22     , [R] ou [fonction**]
    ♦ R33      = R33     , [R] ou [fonction**]
    ♦ R66      = R66     , [R] ou [fonction**]
)

```


5 Comportements liés à l'endommagement et la rupture

5.1 Mots clés facteur ROUSSELIER / ROUSSELIER_FO

Définition des coefficients du modèle de comportement de rupture ductile de G. Rousselier (cf. [R5.03.06]).

Brièvement, on résout pour un incrément élastoplastique :

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

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

Avec les coefficients matériaux D , 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 :

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

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 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 :

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

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 :

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

5.2.1 Syntaxe

```
| / VENDO_CHAB :
| / VENDO_CHAB_FO : _F ( ♦ 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.

5.3 Mot clé facteur ENDO_ORTH_BETON

Définition des paramètres de la loi de comportement ENDO_ORTH_BETON, permettant de décrire l'anisotropie induite par l'endommagement du béton, ainsi que les effets unilatéraux [R7.01.09]. On se reportera aux documents [R7.01.09] et [V6.04.176] pour la signification précise des paramètres et la procédure d'identification.

5.3.1 Syntaxe

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

5.3.2 Opérande ALPHA

Constante de couplage entre l'évolution de l'endommagement de traction et celle de l'endommagement de compression. Elle doit être prise entre 0 et 1, plutôt proche de 1. La valeur par défaut est 0.9.

5.3.3 Opérandes K0 / K1 / K2

K0 = k0

Partie constante de la fonction seuil. Permet de calibrer la hauteur du pic en traction.

K1 = k1

Paramètre de la fonction seuil permettant d'augmenter le seuil en compression.

K2 = k2

Paramètre de contrôle de la forme de l'enveloppe de rupture pour des essais biaxiaux. La valeur par défaut est $7 \cdot 10^{-4}$.

5.3.4 Opérandes ECROB / ECROD

◆ ECROB = ecrob

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

◆ ECROD = ecrod

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

Le module d'Young E et le coefficient de Poisson ν sont à préciser par les mots-clés ELAS ou ELAS_FO.

Dans le cas d'un calcul non local avec la formulation GRAD_EPSI, la longueur caractéristique est à préciser derrière le mot-clé NON_LOCAL.

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 AFPE_MODELE [U4.41.01] 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/ RUPT_FRAG_FO

La théorie de la rupture de Francfort et Marigo permet de modéliser l'apparition et la propagation de fissures dans un milieu élastique fragile, voir [R7.02.11]. Elle s'appuie sur le critère de Griffith qui compare la restitution d'énergie élastique et l'énergie dissipée lors de la création d'une surface fissurée, fournie par le mot clé GC.

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]
  ◇ PENA_ADHERENCE     =      pad,                [R]
  ◇ PENA_CONTACT       = / pco,                [R]
                        / 1. ,                [DEFAULT]
                        )
◇ RUPT_FRAG_FO =_F (
  ◆ GC                =      gc ,                [fonction**]
  ◇ SIGM_C             =      sigm,                [fonction**]
  ◇ PENA_ADHERENCE     =      pad,                [fonction**]
  ◇ PENA_CONTACT       =      pco,                [fonction**]
                        )
```

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 PENA_ADHERENCE

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

Remarque :

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

5.5.5 Opérande PENA_CONTACT

Petit paramètre de régularisation.

5.6 Mot clé facteur CORR_ACIER

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

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

5.6.1 Syntaxe

```

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

5.6.2 Opérande D_CORR

Coefficient d'endommagement critique.

5.6.3 Opérandes ECRO_K, ECRO_M

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

5.6.4 Opérande sy

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

6 Comportements thermiques

Les divers comportements thermiques s'excluent mutuellement.

6.1 Mots clés facteur THER / THER_FO

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

6.1.1 Syntaxe

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

6.1.2 Opérandes LAMBDA / RHO_CP

◆ LAMBDA = λ

Conductivité thermique isotrope.

◆ RHO_CP = cp

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

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

6.2 Mot clé facteur THER_ORTH

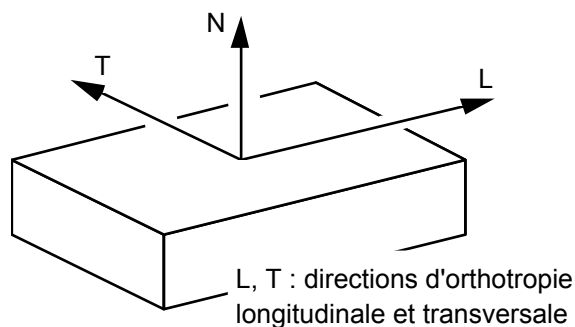
Définition des caractéristiques thermiques pour un matériau orthotrope.

Le lecteur pourra se reporter aux documentations suivantes :

[U4.42.03] DEFI_COQU_MULT

[U4.42.01] AFFE_CARA_ELEM

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



6.2.1 Syntaxe

```
/ THER_ORTH = _F ( ◇ RHO_CP = cp , [R]
                   ◆ LAMBDA_L = λl , [R]
                   ◆ LAMBDA_T = λt , [R]
                   ◇ LAMBDA_N = λn , [R]
                   )
```


6.2.2 Opérandes LAMBDA / RHO_CP

- ♦ LAMBDA_L = λ_l
Conductivité thermique dans le sens longitudinal.
- ♦ LAMBDA_T = λ_t
Conductivité thermique dans le sens transversal.
- ♦ LAMBDA_N = λ_n
Conductivité thermique dans le sens normal.
- ♦ RHO_CP = c_p
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.

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

6.3.1 Syntaxe

```

/  THER_NL = _F      (  ♦  /  BETA   =   $\beta$    ,  [fonction**]
                        /  RHO_CP  =   $c_p$    ,  [fonction**]
                        ♦  LAMBDA   =   $\lambda$    ,  [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 = c_p
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 11, 12 et 13. Les coefficients sont donc définis par l'utilisateur dans le repère d'orthotropie de la plaque.

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

6.4.1 Syntaxe

```

/   THER_COQUE/THER_COQUE_FO =
_F (
    ♦   COND_LMM = a1111 ,           [R] ou [fonction+]
    ♦   COND_TMM = a2211 ,           [R] ou [fonction+]
    ♦   COND_LMP = a1111 ,           [R] ou [fonction+]
    ♦   COND_TMP = a2211 ,           [R] ou [fonction+]
    ♦   COND_LPP = a1111 ,           [R] ou [fonction+]
    ♦   COND_TPP = a2211 ,           [R] ou [fonction+]
    ♦   COND_LSI = a1111 ,           [R] ou [fonction+]
    ♦   COND_TSI = a2211 ,           [R] ou [fonction+]
    ♦   COND_NMM = 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 Opérands 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 Opérandes COND_NMM / COND_NMP / COND_NPP / COND_NSI

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

- ♦ $COND_NMM = b_{11}$
terme lié à l'intégrale de $13 \cdot P1 \cdot P1$
- ♦ $COND_NMP = b_{12}$
terme lié à l'intégrale de $13 \cdot P1 \cdot P2$
- ♦ $COND_NPP = b_{22}$
terme lié à l'intégrale de $13 \cdot P2 \cdot P2$
- ♦ $COND_NSI = b_{23}$
terme lié à l'intégrale de $13 \cdot P2 \cdot P3$

6.4.4 Opérandes CMAS_MM / CMAS_MP / CMAS_PP / CMAS_SI

On a enfin pour le tenseur de capacité thermique.

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

7 Comportements spécifiques aux bétons

7.1 Mot clé facteur THER_HYDR

Permet de définir le comportement associé à l'hydratation du béton.

L'hydratation du béton est un phénomène qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur dépendant de la température [R7.01.12].

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

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

7.1.1 Syntaxe

```

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

```

7.1.2 Opérandes LAMBDA / BETA

- ◆ LAMBDA = lambda

Conductivité thermique isotrope fonction de la température.

- ◇ BETA = beta

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

7.1.3 Opérande AFFINITE

- ◆ AFFINITE = A

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

7.1.4 Opérande CHAL_HYDR

- ◆ CHAL_HYDR = Q

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

7.1.5 Opérande QSR_K

- ◆ QSR_K

Constante d'Arrhénius exprimée en degré Kelvin.

7.2 Mot clé facteur SECH_GRANGER

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

7.2.1 Syntaxe

```
SECH_GRANGER =_F (   ♦   A                =   a                ,                [R]
                         ♦   B                =   b                ,                [R]
                         ♦   QSR_K           =   QsR           ,                [R]
                         ♦   TEMP_0_C       =   t0           ,                [R]
                                                                                  )
```

7.2.2 Opérandes A / B / QSR_K / TEMP_0_C

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

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

- ♦ 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 $\frac{\sigma_y}{E} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_h$
- $\sigma = \sigma_u - \left(\sigma_u - \sigma_y \right) \left(\frac{\varepsilon_u - \varepsilon}{\varepsilon_u - \varepsilon_h} \right)^4$ pour $\varepsilon_h \leq \varepsilon < \varepsilon_u$
(ε ne peut pas dépasser ε_u)

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

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

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

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

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

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

◇ **PERT_FLUA** = **xflu**

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

$\Delta F_{flu} = x_{flu} \cdot F_0$ où F_0 désigne la tension initiale définie 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 la définition des paramètres caractéristiques du matériau acier qui interviennent dans l'estimation des pertes de tension le long des câbles de précontrainte. Ce mot-clé facteur ne peut être utilisé que conjointement avec le mot-clé facteur **ELAS**.

- ◇ RELAX_1000 = rh1000
Relaxation de l'acier à 1000 heures, exprimée en %.
La valeur par défaut est 0 : dans ce cas, on ne tient pas compte des pertes de tension par relaxation de l'acier.
- ◇ MU0_RELAX = mu0
Coefficient adimensionnel de relaxation de l'acier précontraint.
La valeur par défaut est 0.
- ◇ F_PRG = fprg
Contrainte garantie de la charge maximale à rupture (suivant le 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,
|     ◇ ECRO_COMP_P_PIC=    / 'LINEAIRE',    [DEFAULT]
|                               / 'PARABOLE',    [TXM]
|     ◇ ECRO_TRAC_P_PIC=    / '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 , Gc , Gt) de type [fonction*] peuvent dépendre d'une ou de deux variables parmi la température, l'hydratation et le séchage. Lorsqu'elles dépendent de la température, elles sont fonctions du maximum de la température atteinte au cours de l'historique de chargement 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 .
- ♦ $COEF_BIAX = \beta$
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 .
- ♦ $COEF_ELAS_COMP = \varphi$
La limite d'élasticité en compression, donnée par un coefficient de proportionnalité en pourcentage de la résistance au pic $f'_c(\theta)$, en général, de l'ordre de 30% pour les bétons standard.

7.8.4 Opérandes LONG_CARA

Cet opérande permet de surcharger la longueur caractéristique calculée automatiquement, pour chaque maille, en fonction de ses dimensions (à partir de sa surface en 2D, à partir de son volume en 3D).

La longueur caractéristique calculée automatiquement permet, lorsque la finesse du maillage évolue d'un calcul à l'autre, de conserver des résultats stables en évitant les phénomènes de localisation. Cette longueur calculée automatiquement ou donnée par l'utilisateur, conduit à la valeur de l'écroutissement ultime en traction suivant la formule (pour un écroutissement post-pic linéaire) :

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

Dans le cas particulier d'un maillage contenant des mailles adjacentes dont les dimensions sont très différentes, les 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 $\frac{2 \cdot G_t(\theta)}{l_c \cdot f'_t(\theta)}$ 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 / GRANGER_FP_INDT / V_GRANGER_FP

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

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

avec

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

t_c désigne le temps de chargement

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

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

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

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

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

Remarques :

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

Ce comportement peut être associé aux effets de dilatation et de retrait thermique définis par les opérandes K_DESSIC et B_ENDOGE sous le mot clé ELAS_FO.

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

7.9.1 Syntaxe pour le fluage propre

```
| GRANGER_FP = _F (
|   ♦ J1          = J1 ,          [R]
|   ♦ J2          = J2 ,          [R]
|   ♦ J3          = J3 ,          [R]
|   ♦ J4          = J4 ,          [R]
|   ♦ J5          = J5 ,          [R]
|   ♦ J6          = J6 ,          [R]
|   ♦ J7          = J7 ,          [R]
|   ♦ J6          = J8 ,          [R]
|   ♦ TAUX_1      = 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]
```



```

      ◆ QSR_K      =  qsr ,      [R]
      )

```

7.9.2 Opérandes pour le fluage propre

```

      J1      =  J1
      ...
      .J8      =  J8

```

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

```

      TAUX_1    =  τ1
      ...
      .TAUX_8    =  τ8

```

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

```

      QSR_K      =  Uc/R

```

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

7.9.3 Syntaxe pour le fluage propre indépendant de la température

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

7.9.4 Syntaxe pour le vieillissement

Si on utilise la relation de comportement qui prend en compte le phénomène de vieillissement alors il faut renseigner en plus :

```

      V_GRANGER_FP =_F (
          QSR_VEIL = USR      ,      [R]
          FONC_V = k(tceq) ,      [fonction, formule]
      )

```

7.9.5 Opérandes pour le vieillissement

```

      QSR_VEIL = USR

```

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

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

```

      FONC_V = k (tceq)

```

Fonction de vieillissement

7.10 Mot clé NADAI_B

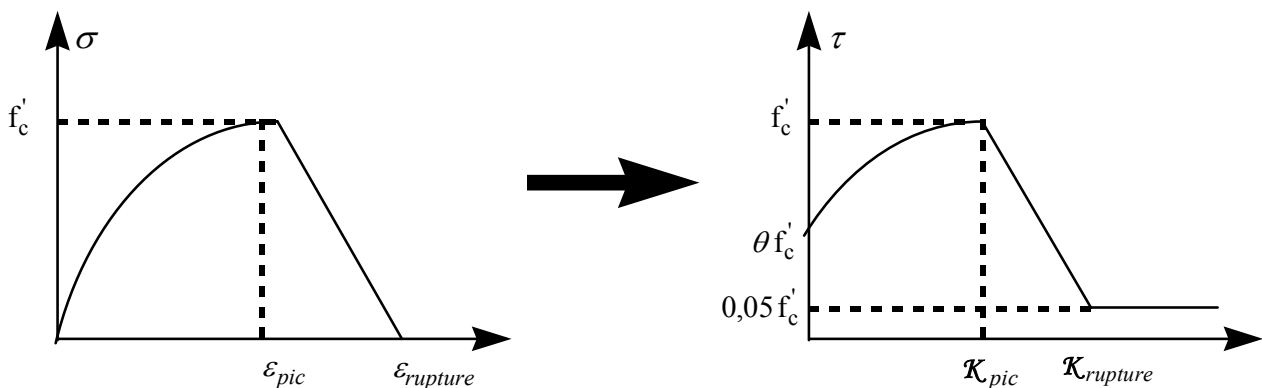
La loi de comportement NADAI_B est un modèle de comportement du béton intégrant des déformations plastiques en compression et un modèle de fissuration en traction. Ce modèle permet de représenter le comportement du béton sous chargement cyclique, une attention particulière étant apportée à la gestion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

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

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

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

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



Essai de compression uniaxial

Courbe contrainte-déformation plastique

De la courbe 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
- κ_{pic} : déformation plastique au pic
- $\kappa_{rupture}$: 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 , κ_{pic} , $\kappa_{rupture}$, $\varepsilon_{rupture}^{traction}$ et le facteur de cisaillement transverse qui est pratiquement inaccessible à la mesure.

7.10.1 Syntaxe

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

```
| / NABAI_B : _F (
    ♦ 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 Opérandes 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 Opérandes 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 opérandes 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 : $\underline{\varepsilon}^d = h \cdot f(\underline{\sigma})$

Où h désigne l'humidité relative interne.

Le modèle de comportement BETON_UMLV_FP est un modèle viscoélastique non vieillissant développé en partenariat avec l'Université de Marne-la-Vallée pour décrire le fluage propre des bétons. Il est particulièrement adapté aux configurations multiaxiales en ne présupposant pas la valeur du coefficient de Poisson de fluage.

Les contraintes sphériques sont à l'origine de la migration de l'eau absorbée aux interfaces entre les hydrates au niveau de la macro-porosité et absorbée au sein de la micro-porosité dans la porosité capillaire. La diffusion de l'eau inter-lamellaire des pores d'hydrates vers la porosité capillaire s'effectue de façon irréversible. La déformation sphérique totale de fluage s'écrit donc comme la somme d'une partie réversible et d'une partie irréversible :

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

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

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

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

Les contraintes déviatoriques sont à l'origine d'un mécanisme de glissement (ou mécanisme de quasi dislocation) des feuillets de CSH dans la nano-porosité. Sous contrainte déviatorique, le fluage s'effectue à volume constant. Par ailleurs, la loi de fluage UMLV suppose l'isotropie du fluage

déviatorique. Phénoménologiquement, le mécanisme de glissement comporte une contribution réversible viscoélastique de l'eau fortement adsorbée aux feuillets de CSH et une contribution irréversible visqueuse de l'eau libre :

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

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

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

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 : _F (
|     ♦ K_RS           : K_RS , [R]
|     ♦ K_IS           : K_IS , [R]
|     ♦ K_RD           : K_RD , [R]
|     ♦ ETA_RS         : ETA_RS , [R]
|     ♦ ETA_IS         : ETA_IS , [R]
|     ♦ ETA_RD         : ETA_RD , [R]
|     ♦ ETA_ID         : ETA_ID , [R]
| )
```

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*.

7.16 Mots clés facteur GLRC

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

7.16.1 Syntaxe

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



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

7.16.2 Opérandes

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

7.17 Mot clé JOINT_BA

Ce modèle de comportement non linéaire de la liaison acier - béton est employé pour le calcul fin des structures en béton armé où la prédiction des fissures et la redistribution des contraintes dans le béton sont très importantes. Disponible pour des analyses sous l'effet de chargements monotones et cycliques, le modèle est écrit dans le cadre de formulation thermodynamique des processus irréversibles. Il permet de tenir compte de l'endommagement de l'interface en cisaillement, en combinaison avec les effets du frottement des fissures, ainsi que des déformations irréversibles. Le document [R7.01.21] décrit les détails correspondants.

Ce modèle doit être employé avec les éléments « joint » en 2D [R3.06.09]. Les armatures d'acier pourront être modélisées avec des éléments plans (QUAD4) ou unidimensionnels (BARRE).

Remarque :

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

7.17.1 Syntaxe

```

◇            /            ◆      JOINT_BA      =    _F      (
                                 ◆    HPEN            =            HPEN            ,            [R]
                                 ◆    GTT            =            GTT            ,            [R]
                                 ◆    GAMD0          =            γ0            ,            [R]
                                 ◆    AD1            =            ad1            ,            [R]
                                 ◆    BD1            =            bd1            ,            [R]
                                 ◆    GAMD2          =            γ2            ,            [R]
                                 ◆    AD2            =            ad2            ,            [R]
                                 ◆    BD2            =            bd2            ,            [R]
                                 ◆    VIFROT          =            vifrot        ,            [R]
                                 ◆    FA            =            alpha        ,            [R]
                                 ◆    FC            =            c            ,            [R]
                                 ◆    EPSTR0        =            εN            ,            [R]
                                 ◆    ADN            =            adn            ,            [R]
                                 ◆    BDN            =            bdn            ,            [R]
                                 ) ;

```

7.17.2 Opérandes

◆ HPEN = HPEN

Paramètre de pénétration entre surfaces par écrasement du béton.
On vérifie que $HPEN > 0.0 \text{ E}+0$.

◆ GTT = GTT

Module de rigidité de la liaison.
On vérifie que $G_{\text{beton}} \leq GTT \leq G_{\text{acier}}$.

◆ GAMD0 = γ0

Seuil d'adhérence parfaite ou limite de déformation élastique.
On vérifie que $1.E-4 \leq GAMD0 \leq 1.E-2$.

◆ AD1 = ad1

Paramètre d'évolution de l'endommagement en région 1 (passage des petites déformations aux grands glissements).
On vérifie que $1.E-1 \leq AD1 \leq 1.E+1$.

◆ BD1 = bd1

Paramètre de puissance décrivant l'évolution de la variable d'endommagement en région 1 (passage des petites déformations aux grands glissements).
On vérifie que $BD1 \geq 1.E-1$.

- ♦ GAMD2 = γ_2
Seuil des grands glissements.
On vérifie que $1.E-4 \leq \text{GAMD2} \leq 1.E+0$.
- ♦ AD2 = ad2
Paramètre d'évolution de l'endommagement en région 2 (résistance maximale de la liaison et dégradation en frottement).
On vérifie que $\text{AD2} \geq 1.E-6$.
- ♦ BD2 = bd2
Paramètre de puissance décrivant l'évolution de la variable d'endommagement en région 2 (résistance maximale de la liaison et dégradation en frottement).
On vérifie que $\text{BD2} \geq 1.E-1$.
- ♦ VIFROT = vifrot
Paramètre matériau décrivant l'influence du frottement des fissures.
On vérifie que $\text{VIFROT} \geq 0.0 \text{ E}+0$.
- ♦ FA = alpha
Paramètre matériau lié à l'écrouissage cinématique par frottement des fissures.
On vérifie que $\text{FA} \geq 0.0 \text{ E}+0$.
- ♦ FC = c
Paramètre décrivant l'influence du confinement sur la résistance de la liaison.
On vérifie que $\text{FC} \geq 0.0 \text{ E}+0$.
- ♦ EPSTRO = ϵ_N
Seuil de déformation élastique sur la direction normale avant la rupture.
On vérifie que $1.E-4 \leq \text{EPSTRO} \leq 1.E+0$.
- ♦ ADN = adn
Paramètre de l'endommagement dans la direction normale par ouverture de la fissure.
On vérifie que $\text{ADN} \geq 1.E-10$.
- ♦ BDN = bdn
Paramètre de puissance décrivant l'évolution de la variable d'endommagement dans la direction normale.
On vérifie que $\text{BDN} \geq 1.E-1$.

8 Comportements Métallo-Mécaniques

Pour le comportement métallurgique (cf. [R4.04.01]), deux lois de comportement sont disponibles : une loi caractéristique des transformations métallurgiques de l'acier et une loi caractéristique des alliages de zirconium.

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 Opérandes pour les changements de phases

- ♦ TRC = nomtrc

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

- ♦ AR3 = ar3

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

- ♦ ALPHA = alpha

Coefficient α de la loi de 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

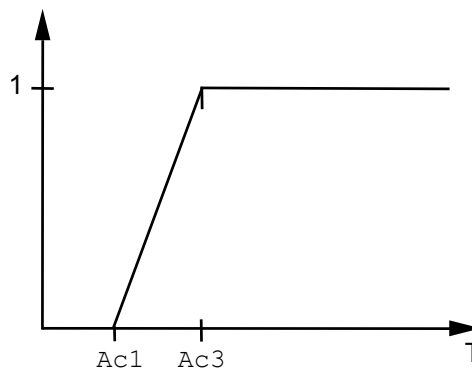
Température de début de transformation martensitique lorsque celle-ci est totale. Dans ce cas $M_s = M_{s0}$.

- ♦ 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.

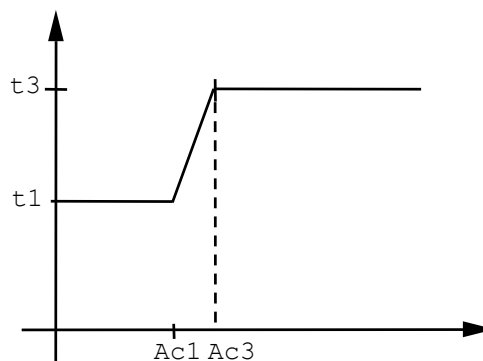
L'évolution de la proportion d'austénite est alors définie par :

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

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 Opérands

- ◆ 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**

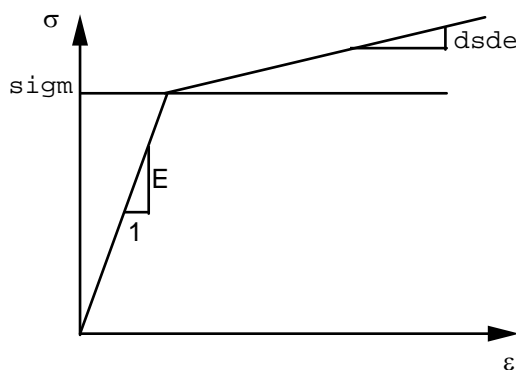
Définition de cinq modules d'écroissage utilisés dans la modélisation du phénomène d'écroissage isotrope linéaire d'un matériau subissant des changements de phases métallurgiques (voir [R4.04.02]). Ces modules dépendent de la température.

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

8.7.2 Opérandes

- ◇ F1_ETA = η_1
Paramètre η de la loi d'écoulement viscoplastique, pour la phase froide 1.
- ◇ F2_ETA = η_2
Paramètre η de la loi d'écoulement viscoplastique, pour la phase froide 2.
- ◇ F3_ETA = η_3
Paramètre η de la loi d'écoulement viscoplastique, pour la phase froide 3.
- ◇ F4_ETA = η_4
Paramètre η de la loi d'écoulement viscoplastique, pour la phase froide 4
- ◇ 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 = _F (  ♦  F1_K = Kf ,           [R]
                    ♦  F2_K = Kp ,           [R]
                    ♦  F3_K = Kb ,           [R]
                    ♦  F4_K = Km ,           [R]
                    ♦  F1_D_F_META = F'f ,   [fonction**]
                    ♦  F2_D_F_META = F'p ,   [fonction**]
                    ♦  F3_D_F_META = F'b ,   [fonction**]
                    ♦  F4_D_F_META = F'm ,   [fonction**]
                    )

```

8.8.2 Opérandes

- ♦ F1_K = Kf F2_K = Kp F3_K = Kb F4_K = Km

Constantes K_i utilisées dans le modèle de plasticité de transformation, pour les différentes phases à froid. Pour l'acier ; phase ferritique, perlitique, bainitique et martensitique.

- ♦ F1_D_F_META=F'f F2_D_F_META=F'p F3_D_F_META=F'b F4_D_F_META=F'm

Fonctions F'_i utilisées dans le modèle de plasticité de transformation, pour les différentes phases à froid. Pour l'acier ; phase ferritique, perlitique, bainitique et martensitique.

8.9 Mot clé facteur **META_RE**

Définition des caractéristiques utilisées dans la modélisation du phénomène de restauration d'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_AT M | LIQU_VAPE_GAZ | LIQU_AD_GAZ_VAPE | LIQU_VAPE |
|-----------------------------|-----------|----------|----------|------------------|---------------|------------------|-----------|
| THM_INIT | O | O | O | O | O | O | O |
| PRE1 | O | O | O | O | O | O | O |
| PRE2 | | O | | | O | O | |
| PORO | O | O | O | O | O | O | O |
| TEMP | T | O | O | T | O | O | O |
| PRES_VAPE | | | | | O | O | O |
| THM_DIFFU | O | O | O | O | O | O | O |
| R_GAZ | | O | O | | O | O | O |
| RHO | O | O | O | O | O | O | O |
| BIOT_COEF | O | O | O | O | O | O | O |
| PESA_X | O | O | O | O | O | O | O |
| PESA_Y | O | O | O | O | O | O | O |
| PESA_Z | O | O | O | O | O | O | O |
| SATU_PRES | | O | I | O | O | O | O |
| D_SATU_PRES | | O | I | O | O | O | O |
| PERM_LIQU | I | O | I | O | O | O | O |
| D_PERM_LIQU_SATU | | O | | O | O | O | O |
| PERM_GAZ | | O | | | O | O | O |
| D_PERM_SATU_GAZ | | O | | | O | O | O |
| D_PERM_PRES_GAZ | | O | | | O | O | O |
| FICKV_T | | | | | O | O | |
| FICKV_PV | | | | | | | |
| FICKV_PG | | | | | | | |
| FICKV_S | | | | | | | |
| D_FV_T | | | | | | | |
| D_FV_PG | | | | | | | |
| FICKA_T | | | | | | O | |
| FICKA_PA | | | | | | | |
| FICKA_PL | | | | | | | |
| FICKA_S | | | | | | | |
| D_FA_T | | | | | | | |
| CP | T | T | T | T | T | T | T |
| PERM_IN/PERM_END /PERM_X | O | O | O | O | O | O | O |
| PERM_Y | | | | | | | |
| PERM_Z | | | | | | | |
| LAMB_T | T | T | T | T | T | T | T |
| LAMB_S | | | | | | | |
| LAMB_PHI | | | | | | | |
| LAMB_CT | | | | | | | |
| D_LB_T | | | | | | | |
| D_LB_S | | | | | | | |
| D_LB_PHI | | | | | | | |
| THM_LIQU | O | O | | O | O | O | O |
| RHO | O | O | | O | O | O | O |
| UN_SUR_K | O | O | | O | O | O | O |
| VISC | O | O | | O | O | O | O |
| D_VISC_TEMP | O | O | | O | O | O | O |
| ALPHA | T | T | | T | T | T | T |
| CP | T | T | | T | T | T | T |
| THM_GAZ | | O | O | O | O | O | |
| MASS_MOL | | O | O | O | O | O | |
| VISC | | O | O | O | O | O | |
| D_VISC_TEMP | | O | O | O | O | O | |
| CP | | T | T | T | T | T | |
| THM_VAPE_GAZ | | | | | O | O | O |
| MASS_MOL | | | | | O | O | O |
| CP | | | | | O | O | O |
| VISC | | | | | O | O | O |
| D_VISC_TEMP | | | | | O | O | O |
| THM_AIR DISS | | | | | | O | |
| CP | | | | | | O | |
| COEF_HENRY | | | | | | O | |

Légendes : O : Mot clé Obligatoire
 T : Mot clé obligatoire en Thermique
 : Mot clé Inutile pour ce type de loi de couplage

La syntaxe est la suivante :

```

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

```

9.2 Mot clé facteur THM_INIT

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

9.2.1 Syntaxe

```

THM_INIT = _F (
  ◆ TEMP      = temp ,      [R]
  ◆ PRE1      = pre1 ,      [R]
  ◆ PRE2      = pre2 ,      [R]
  ◆ PORO      = poro ,      [R]
  ◆ PRES_VAPE = pvap ,      [R]
  ◇ DEGR_SATU = ds ,        [R]
  ◇ PRES_ATMO = patm ,      [R]
)

```

Pour bien comprendre ces données, il faut distinguer les inconnues aux nœuds, que nous appelons $\{u\}^{ddl}$ et les valeurs définies sous le mot clé THM_INIT que nous appelons p^{ref} et T^{ref} .

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

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

| Comportement KIT | LIQU_SATU | LIQU_GAZ_ATM | GAZ | LIQU_VAPE_GAZ | LIQU_GAZ | LIQU_AD_GAZ_VAPE |
|---------------------|-----------|--------------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|
| PRE1 | p_l | $-p_l$ | p_g | $p_c = p_g - p_l$ | $p_c = p_g - p_l$ | $p_c = p_g - p_l$ |
| PRE2 | | | | p_g | p_g | p_g |

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} . De même les conditions aux limites doivent être exprimées par rapport aux inconnues nodales.

Par contre, ce sont les pressions et la température totales qui sont utilisées dans les lois de comportement $\frac{p}{\rho} = \frac{R}{M} T$ pour les gaz parfaits, $\frac{d\rho_l}{\rho_l} = \frac{dp_l}{K_l} - 3\alpha_l dT$ pour le liquide et dans la relation saturation/pression capillaire.

Notons que les valeurs nodales peuvent être initialisées par le mot clé `ETAT_INIT` de la commande `STAT_NON_LINE`.

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

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

9.2.2 Opérande `TEMP`

Température de référence T_{ref} .

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

9.2.3 Opérande `PRE1`

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

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

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

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

9.2.4 Opérande `PRE2`

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

9.2.5 Opérande `PORO`

Porosité initiale.

9.2.6 Opérande `PRES_VAPE`

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

9.2.7 Opérande `DEGR_SATU`

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

9.3 Mot clé facteur **THM_LIQU**

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

9.3.1 Syntaxe

```
THM_LIQU = _F (
    ♦ RHO           = rho ,      [R]
    ◇ UN_SUR_K      = usk ,      [R]
    ◇ ALPHA         = alp ,      [R]
    ◇ CP            = cp ,       [R]
    ◇ VISC           = vi ,      [fonction **]
    ◇ D_VISC_TEMP   = dvi ,      [fonction **]
)
```

9.3.2 Opérande **RHO**

Masse volumique du liquide pour la pression définie sous le mot clé **PRE1** du mot clé facteur **THM_INIT**.

9.3.3 Opérande **UN_SUR_K**

Inverse de la compressibilité du liquide : K_l .

9.3.4 Opérande **ALPHA**

Coefficient de dilatation du liquide 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**.

9.4 Mot clé facteur **THM_GAZ**

Ce mot clé facteur concerne tous les comportements THM faisant intervenir un gaz (cf. [R7.01.11]). Pour les comportements faisant intervenir à la fois un liquide et un gaz, et quand on prend en compte l'évaporation du liquide, les coefficients renseignés ici concernent le gaz sec. Les propriétés de la vapeur sont renseignées sous le mot clé **THM_VAPE_GAZ**.

9.4.1 Syntaxe

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

9.4.2 Opérande **MASS_MOL**

Masse molaire du gaz sec. M_{gs}

Si p_{gs} désigne la pression du gaz sec, 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**.

9.5 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_AIR_DISS

Ce mot clé facteur concerne le comportement THM THM_AD_GAZ_VAPE prenant en compte la dissolution de l'air dans le liquide (cf. [R7.01.11]). Les coefficients renseignés ici concernent l'air dissous.

9.6.1 Syntaxe

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

9.6.2 Opérande CP

Chaleur massique à pression constante de l'air dissous.

9.6.3 Opérande COEF_HENRY

Constante de Henry K_H , permettant de relier la concentration molaire d'air dissous C_{ad}^{ol} (moles/m3) à la pression d'air sec :

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

9.6.4 Opérande D_VISC_TEMP

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

9.7 Mot clé facteur THM_DIFFU

Obligatoire pour tous les comportements THM (cf. [R7.01.11]). L'utilisateur doit s'assurer de la cohérence des fonctions et de leur dérivée.

9.7.1 Syntaxe

```
THM_DIFFU = _F (
  ♦ R_GAZ           = rgaz ,           [R]
  ◇ RHO             = rho ,           [R]
  ◇ CP              = cp ,           [R]
  ◇ BIOT_COEF       = bio ,           [R]
  ◇ SATU_PRES       = sp ,           [fonction]
  ◇ D_SATU_PRES     = dsp ,           [fonction]
  ◇ PESA_X          = px ,           [R]
  ◇ PESA_Y          = py ,           [R]
  ◇ PESA_Z          = pz ,           [R]
  ◇ PERM_IN         = perm ,          [fonction]
  ◇ PERMIN_X        = ox ,           [fonction]
  ◇ PERMIN_Y        = ox ,           [fonction]
  ◇ PERMIN_Z        = ox ,           [fonction]
  ◇ PERM_LIQU       = perml ,         [fonction]
  ◇ D_PERM_LIQU_SATU = dperm ,         [fonction]
  ◇ PERM_GAZ        = permg ,         [fonction]
  ◇ D_PERM_SATU_GAZ = dpsg ,         [fonction]
  ◇ D_PERM_PRES_GAZ = dppg ,         [fonction]
  ◇ FICKV_T         = fvt ,           [fonction]
  ◇ FICKV_PV        = / fvpv ,       [fonction]
  ◇                 / 1 ,           [DEFAULT]
  ◇ FICKV_PG        = / fvpv ,       [fonction]
  ◇                 / 1 ,           [DEFAULT]
  ◇ FICKV_S         = / fvs ,         [fonction]
  ◇                 / 1 ,           [DEFAULT]
  ◇ D_FV_T          = / dfvt ,       [fonction]
  ◇                 / 0 ,           [DEFAULT]
  ◇ D_FV_PG         = / dfvpg ,      [fonction]
  ◇                 / 0 ,           [DEFAULT]
  ◇ FICKA_T         = fat ,           [fonction]
  ◇ FICKA_PA        = / fapv ,       [fonction]
  ◇                 / 1 ,           [DEFAULT]
  ◇ FICKA_PL        = / fapg ,       [fonction]
  ◇                 / 1 ,           [DEFAULT]
  ◇ FICKA_S         = / fas ,         [fonction]
  ◇                 / 1 ,           [DEFAULT]
  ◇ D_FA_T          = / dfat ,       [fonction]
  ◇                 / 0 ,           [DEFAULT]
  ◇ LAMB_T          = / lambt ,      [fonction]
  ◇                 / 0 ,           [DEFAULT]
  ◇ LAMB_S          = / lambs ,      [fonction]
  ◇                 / 1 ,           [DEFAULT]
  ◇ LAMB_PHI        = / lambp ,      [fonction]
  ◇                 / 1 ,           [DEFAULT]
  ◇ LAMB_CT         = / lambct ,     [fonction]
  ◇                 / 0 ,           [DEFAULT]
  ◇ D_LB_S          = / dlams ,      [fonction]
  ◇                 / 0 ,           [DEFAULT]
  ◇ D_LB_T          = / dlambt ,     [fonction]
  ◇                 / 0 ,           [DEFAULT]
  ◇ D_LB_PHI        = / dlambp ,     [fonction]
```



```

/ 0 , [DEFAULT]
◇ SIGMA_T = st , [fonction]
◇ D_SIGMA_T = dst , [fonction]
◇ PERM_G_INTR = pgi , [fonction]
◇ CHAL_VAPO = cv , [fonction **]
◇ EMMAG = em , [R]
)
```

9.7.2 Opérande R_GAZ

Constante des gaz parfaits.

9.7.3 Opérande RHO

Pour les comportements hydrauliques masse volumique homogénéisée.

Remarque :

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

9.7.4 Opérande CP

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

9.7.5 Opérande BIOT_COEF

Coefficient de Biot.

9.7.6 Opérande SATU_PRES

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

9.7.7 Opérande D_SATU_PRES

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

9.7.8 Opérande PESA_X

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

9.7.9 Opérande PESA_Y

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

9.7.10 Opérande PESA_Z

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

9.7.11 Opérande PERM_IN

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

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

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

viscosité, ρ_l la masse volumique du liquide et g l'accélération de la pesanteur. K_{int} est en fait un tenseur diagonal, dans le cas isotrope ses trois composantes sont égales à la valeur renseignée.

9.7.12 Opérande PERMIN_X

Dans le cas orthotrope, composante en x du tenseur de perméabilité intrinsèque. Dans ce cas, PERMIN_Y et PERMIN_Z sont obligatoires.

9.7.13 Opérande PERMIN_Y

Dans le cas orthotrope, composante en y du tenseur de perméabilité intrinsèque.

9.7.14 Opérande PERMIN_Z

Dans le cas orthotrope, composante en z du tenseur de perméabilité intrinsèque.

9.7.15 Opérande PERM_LIQU

Perméabilité relative au liquide : fonction de la saturation.

9.7.16 Opérande D_PERM_LIQU_SATU

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

9.7.17 Opérande PERM_GAZ

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

9.7.18 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.

9.7.19 Opérande D_PERM_PRES_GAZ

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

9.7.20 Opérande FICKV_T

Pour les comportements LIQU_VAPE_GAZ et LIQU_AD_GAZ_VAPE, coefficient de Fick fonction de la température pour la diffusion de la vapeur dans le mélange gazeux. Le coefficient de Fick pouvant être fonction de la saturation, la température, la pression de gaz et la pression de vapeur, on le définit comme un produit de 4 fonctions : FICKV_T, FICKV_S, FICKV_PG, FICKV_VP. Dans le cas de LIQU_VAPE_GAZ et LIQU_AD_GAZ_VAPE, seul FICKV_T est obligatoire.

9.7.21 Opérande FICKV_S

Pour les comportements LIQU_VAPE_GAZ et LIQU_AD_GAZ_VAPE, coefficient de Fick fonction de la saturation pour la diffusion de la vapeur dans le mélange gazeux.

9.7.22 Opérande FICKV_PG

Pour les comportements `LIQU_VAPE_GAZ` et `LIQU_AD_GAZ_VAPE`, coefficient de Fick fonction de la pression de gaz pour la diffusion de la vapeur dans le mélange gazeux.

9.7.23 Opérande FICKV_PV

Pour les comportements `LIQU_VAPE_GAZ` et `LIQU_AD_GAZ_VAPE`, coefficient de Fick fonction de la pression de vapeur pour la diffusion de la vapeur dans le mélange gazeux.

9.7.24 Opérande D_FV_T

Pour les comportements `LIQU_VAPE_GAZ` et `LIQU_AD_GAZ_VAPE`, dérivée du coefficient `FICKV_T` par rapport à la température.

9.7.25 Opérande D_FV_PG

Pour les comportements `LIQU_VAPE_GAZ` et `LIQU_AD_GAZ_VAPE`, dérivée du coefficient `FICKV_PG` par rapport à la pression de gaz.

9.7.26 Opérande FICKA_T

Pour le comportement `LIQU_AD_GAZ_VAPE`, coefficient de Fick fonction de la température pour la diffusion de l'air dissous dans le mélange liquide. Le coefficient de Fick pouvant être fonction de la saturation, la température, la pression d'air dissous et la pression de liquide, on le définit comme un produit de 4 fonctions : `FICKA_T`, `FICKA_S`, `FICKV_PA`, `FICKV_PL`. Dans le cas de `LIQU_AD_GAZ_VAPE`, seul `FICKA_T` est obligatoire.

9.7.27 Opérande FICKA_S

Pour le comportement `LIQU_AD_GAZ_VAPE`, coefficient de Fick fonction de la saturation pour la diffusion de l'air dissous dans le mélange liquide.

9.7.28 Opérande FICKA_PA

Pour le comportement `LIQU_AD_GAZ_VAPE`, coefficient de Fick fonction de la pression d'air dissous pour la diffusion de l'air dissous dans le mélange liquide.

9.7.29 Opérande FICKA_PL

Pour le comportement `LIQU_AD_GAZ_VAPE`, coefficient de Fick fonction de la pression de liquide pour la diffusion de l'air dissous dans le mélange liquide.

9.7.30 Opérande D_FA_T

Pour le comportement `LIQU_AD_GAZ_VAPE`, dérivée du coefficient `FICKA_T` par rapport à la température.

9.7.31 Opérande LAMB_T

Pour le comportement `THER_POLY` partie multiplicative de la conductivité thermique du mélange dépendant de la température (cf. [R7.01.11]).
Pour le comportement `THER_HOMO` conductivité thermique du mélange.
Cette opérande est obligatoire dans le cas thermique.

9.7.32 Opérande **LAMB_S**

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

9.7.33 Opérande **LAMB_PHI**

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

9.7.34 Opérande **LAMB_CT**

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

9.7.35 Opérande **D_LB_T**

Pour le comportement *THER_POLY* dérivée de la partie de la conductivité thermique du mélange dépendant de la température par rapport a la température.

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

9.7.36 Opérande **D_LB_S**

Pour le comportement *THER_POLY* dérivée de la partie de la conductivité thermique du mélange dépendant de la saturation.

9.7.37 Opérande **D_LB_PHI**

Pour le comportement *THER_POLY* dérivée de la partie de la conductivité thermique du mélange dépendant de la porosité.

9.7.38 Opérande **EMMAG**

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

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

9.8.1 Syntaxe

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

9.8.2 Opérande E_CHAR

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

9.8.3 Opérande E_DECHAR

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

9.8.4 Opérande EV_KB

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

9.8.5 Opérande RF

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

9.8.6 Opérande XN

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

9.8.7 Opérande EV_XM

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

9.8.8 Opérande **D_E_T**

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

9.8.9 Opérande **ANG_FRT**

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

9.8.10 Opérande **COHE**

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

9.8.11 Opérande **RESI_TRAC**

Résistance en traction du sol.

9.8.12 Opérande **ALPHA0**

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

9.8.13 Opérande **ALPHA1**

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

9.8.14 Opérande **ALPHA2**

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

9.8.15 Opérande **ALPHA3**

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

9.8.16 Opérande **ALPHA_S**

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

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

9.9.1 Syntaxe

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

9.9.2 Opérande E_CHAR

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

9.9.3 Opérande E_DECHAR

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

9.9.4 Opérande RF

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

9.9.5 Opérande XN

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

9.9.6 Opérande EV_KB

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

9.9.7 Opérande EV_XM

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

9.9.8 Opérande EV_A

Coefficient a de la surface d'indice des vides.

9.9.9 Opérande EV_B

Coefficient b de la surface d'indice des vides.

9.9.10 Opérande EV_CT

Coefficient c de la surface d'indice des vides.

9.9.11 Opérande EV_SIGB

Coefficient sigma de la surface d'indice des vides.

9.9.12 Opérande D_E_T

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

9.9.13 Opérande D_E_SUCC

Variation du module d'Young avec succion.

9.9.14 Opérande ANG_FRT

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

9.9.15 Opérande ANG_FRT_ULT

Angle de frottement ultime.

9.9.16 Opérande COHE

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

9.9.17 Opérande D_COEH_SUCC

Variation de la cohésion avec la succion.

9.9.18 Opérande RESI_TRAC

Résistance en traction du sol.

9.9.19 Opérande SUCC_ULTM

Succion ultime.

9.9.20 Opérande A_SURF_SATU

Coefficient a de la surface d'état de saturation.

9.9.21 Opérande B_SURF_SATU

Coefficient b de la surface d'état de saturation.

9.9.22 Opérande C_SURF_SATU

Coefficient c de la surface d'état de saturation.

9.9.23 Opérande D_SURF_SATU

Coefficient d de la surface d'état de saturation.

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

9.10.1 Syntaxe

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

9.10.2 Opérande NU

Coefficient de Poisson.

9.10.3 Opérande LAMBDA

Pente de la droite de chargement.

Valeur recommandée en unité SI entre 0.1 et 0.4.

9.10.4 Opérande KAPA

Pente de la droite de déchargement.

Valeur recommandée en unité SI entre 0.01 et 1.

9.10.5 Opérande PRES_CRIT

Pression critique effective.

9.10.6 Opérande m

Pente de la ligne d'état critique.

Valeur recommandée en unité SI entre 0.8 et 0.9.

9.10.7 Opérande GAMA

Ecs – 1

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

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

9.10.8 Opérande A0_PC

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

9.10.9 Opérande A1_PC

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

9.10.10 Opérande A2_PC

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

9.10.11 Opérande ALPHA0_PC

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

9.10.12 Opérande ALPHA1_PC

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

9.10.13 Opérande ALPHA2_PC

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

9.10.14 Opérande ALPHA3_PC

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

9.10.15 Opérande ALPHA_S

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

9.11 Mot clé **CAM_CLAY**

Le modèle de Cam-Clay est un modèle élasto-plastique utilisé en mécanique des sols et est spécialement adapté aux matériaux argileux. Le modèle présenté ici est appelé Cam-Clay modifié. Le document [R7.01.14] décrit les équations correspondantes. Ce modèle peut être utilisé indépendamment des comportements THM. Les caractéristiques élastiques doivent être définies sous le mot clé ELAS.

9.11.1 Syntaxe

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

9.11.2 Opérandes **LAMBDA**

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

9.11.3 Opérandes **KAPA**

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

9.11.4 Opérandes **M**

Pente de la droite d'état critique.

9.11.5 Opérandes **PORO**

Porosité initiale. Si **CAM_CLAY** est utilisée sous **RELATION_KIT**, le mot clé **PORO** renseigné sous **CAM_CLAY** et sous **THM_INIT** doit être le même.

9.11.6 Opérandes **PRES_CRIT**

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

9.11.7 Opérandes **PA**

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

9.12 Mot clé facteur CJS

La loi (Cambou, Jaffani, Sidoroff) est une loi de comportement pour les sols. Elle comporte trois mécanismes, l'un correspond à de l'élasticité non linéaire, un autre correspond à une plastification pour des états de contraintes isotropes, et le troisième mécanisme correspond à une plastification liée à un état de contrainte déviatoire. Le document [R7.01.13] décrit avec précision les équations correspondantes.

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

La loi CJS recouvre trois formes possibles (CJS1, CJS2 et CJS3), selon que l'on autorise ou non l'activation des mécanismes non linéaires.

Le tableau ci dessous donne les mécanismes activés pour les trois niveaux CJS1, CJS2 et CJS3 :

| | Mécanisme élastique | Mécanisme plastique isotrope | Mécanisme plastique déviatoire |
|------|---------------------|------------------------------|---------------------------------|
| CJS1 | linéaire | non activé | activé, plasticité parfaite |
| CJS2 | non linéaire | activé | activé, écrouissage isotrope |
| CJS3 | non linéaire | activé | activé, écrouissage cinématique |

Remarque :

En adoptant la correspondance des paramètres pour les états limites, il est possible d'utiliser le comportement CJS1 pour modéliser une loi de Mohr Coulomb en mécanique des sols.

9.12.1 Syntaxe

```
CJS = _F (
    ♦ BETA_CJS = beta ,      [R]
    ♦ RM       = rm  ,      [R]
    ◇ N_CJS    = n   ,      [R]
    ◇ KP       = kp  ,      [R]
    ◇ RC       = rc  ,      [R]
    ◇ A_CJS    = a   ,      [R]
    ◇ B_CJS    = b   ,      [R]
    ◇ C_CJS    = c   ,      [R]
    ♦ GAMMA_CJS = g   ,      [R]
    ◇ MU_CJS   = mu  ,      [R]
    ◇ PCO      = pco ,      [R]
    ♦ PA       = pa  ,      [R]
    ◇ Q_INIT   = q   ,      [R]
    ◇ R_INIT   = r   ,      [R]
)
```

Les différents coefficients sont à renseigner ou non selon le niveau que l'on veut utiliser, conformément au tableau ci dessous (F pour facultatif , O pour obligatoire et rien pour sans objet).

| Symbole | Q_{init} | R_{init} | n | K^P | 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 .

9.12.2 Opérande BETA_CJS

Pour niveaux CJS1, CJS2 CJS3.

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

9.12.3 Opérande RM

Pour niveaux CJS1, CJS2 CJS3.

Valeur maximale d'ouverture du domaine de réversibilité déviatoire.

9.12.4 Opérande N_CJS

Pour niveaux CJS2 CJS3.

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

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

9.12.5 Opérande KP

Pour niveaux CJS2 CJS3.

Module de compressibilité plastique.

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

9.12.6 Opérande RC

Pour niveaux CJS2 CJS3

Valeur critique de la variable R :

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

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

9.12.7 Opérande A_CJS

Pour niveaux CJS2.

Contrôle l'écouissage isotrope du mécanisme déviatoire ;

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

9.12.8 Opérande R_INIT

Pour niveaux CJS2.

Valeur initiale de la variable R . Au premier temps de calcul, si la valeur initiale de R est nulle, soit qu'on ait pas défini d'état initial des variables internes par le mot clé `ETAT_INIT` de `STAT_NON_LINE`, soit que cet état initial soit nul, on prendra comme valeur initiale celle définie par le mot clé `R_INIT` de `DEFI_MATERIAU`.

9.12.9 Opérande B_CJS

Pour niveaux CJS3.

Contrôle l'écouissage cinématique du mécanisme déviatoire ;

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

9.12.10 Opérande C_CJS

Pour niveaux CJS3.

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

9.12.11 Opérande PCO

Pour niveaux CJS3.

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

9.12.12 Opérande GAMMA_CJS

Pour niveaux CJS1 CJS2 CJS3.

Contrôle la forme du critère :

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

9.12.13 Opérande MU_CJS

Pour niveaux CJS3.

Contrôle la valeur de rupture de la variable R.

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

9.12.14 Opérande PA

Pour niveaux CJS1 CJS2 CJS3.

pression atmosphérique. Doit être donnée négative.

9.12.15 Opérande Q_INIT

Pour niveaux CJS1 CJS2 CJS3.

Paramètre numérique permettant de rendre admissible un état de contrainte nul. Peut également être utilisé pour définir une cohésion, au moins pour le niveau CJS1. On utilisera la formule :

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

9.13 Mot clé facteur LAIGLE

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

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

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

9.13.1 Syntaxe

```
LAIGLE =_F (
    ♦ GAMMA_ULT      = gamma_ult ,      [R]
    ♦ GAMMA_E        = gamma_e ,        [R]
    ♦ M_ULT          = m_ult ,          [R]
    ♦ M_E            = m_e ,            [R]
    ♦ A_E            = a_e ,            [R]
    ♦ M_PIC          = m_pic ,          [R]
    ♦ A_PIC          = a_pic ,          [R]
    ♦ ETA            = eta ,            [R]
    ♦ SIGMA_C        = sigma_c ,        [R]
    ♦ GAMMA          = gamma ,          [R]
    ♦ KSI            = ksi ,            [R]
    ♦ GAMMA_CJS      = gamma_cjs ,      [R]
    ♦ SIGMA_P1       = sigma_pl ,       [R]
    ♦ PA             = pa ,             [R]
)
```

9.13.2 Opérande GAMMA_ULT

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

9.13.3 Opérande GAMMA_E

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

9.13.4 Opérande M_ULT

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

9.13.5 Opérande M_E

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

9.13.6 Opérande A_E

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

9.13.7 Opérande M_PIC

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

9.13.8 Opérande A_PIC

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

9.13.9 Opérande ETA

Paramètre η : Exposant régulant l'écrouissage.

9.13.10 Opérande SIGMA_C

Paramètre σ_c : Résistance en compression simple.

9.13.11 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.

9.13.12 Opérande GAMMA_CJS

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

9.13.13 Opérande SIGMA_P1

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

9.13.14 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.

9.14 Mot clé facteur DRUCKER_PRAGER

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

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

où

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

$I_1 = Tr(\boldsymbol{\sigma}')$ est la trace des contraintes effectives,

α est un coefficient de dépendance en pression,

$R(p)$ est une fonction de la déformation plastique cumulée.

Dans le cas linéaire, la fonction R est donnée par :

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

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

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

9.14.1 Syntaxe

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

9.14.2 Opérande ECROUISSAGE

Permet de définir le type d'écrouissage souhaité.

9.14.3 Opérande ALPHA

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

9.14.4 Opérande P_ULTM

Désigne la déformation plastique cumulée ultime.

9.14.5 Opérande SY

Désigne la contrainte plastique. Cette opérande est liée à la combinaison du coefficient de cohésion

C avec l'angle de frottement φ de la façon suivante : $SY = \frac{6C \cos(\varphi)}{3 - \sin(\varphi)}$.

9.14.6 Opérande H

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

9.14.7 Opérande SY_ULTM

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

9.15 Mot clé facteur BARCELONE

Le modèle de Barcelone décrit le comportement élasto-plastique des sols non saturés couplé au comportement hydraulique (Cf. [R7.01.14] pour plus de détail). Ce modèle se ramène au modèle de Cam_Clay dans le cas saturé. Deux critères interviennent : un critère de plasticité mécanique (celui de Cam_Clay) et un critère hydrique contrôlé par la succion (ou pression capillaire). Il ne peut être utilisé que dans le cadre des comportements THHM et HHM. Les caractéristiques nécessaires au modèle doivent être données sous ce mot-clé et sous les mots clés `CAM_CLAY` et `ELAS`.

Il est donc obligatoire de renseigner les paramètres des mots clés `CAM_CLAY` et `ELAS`.

9.15.1 Syntaxe

```
BARCELONE = _F (
    ♦ R          = r , [R]
    ♦ BETA       = beta , [R]
    ♦ KC         = kc , [R]
    ♦ PC0_INIT   = Pc0(0) , [R]
    ♦ KAPAS      = Kappas , [R]
    ♦ LAMBDA     = Lambdas , [R]
    ♦ ALPHAB     = alphab , [R]
)
```

9.15.2 Opérandes R, BETA

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

9.15.3 Opérande KC

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

9.15.4 Opérande PC0_INIT

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

9.15.5 Opérande KAPAS

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

9.15.6 Opérande LAMBDAS

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

9.15.7 Opérande ALPHAB

Coefficient de correction de la normalité de l'écoulement plastique [R7.01.17].

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

9.16 Mot clé facteur HOEK_BROWN

Loi de comportement en mécanique des roches de type loi de HOEK-BROWN modifiée (Cf. [R7.01.18])

Les caractéristiques mécaniques élastiques E, NU, et ALPHA doivent être définies en parallèle sous le mot-clé ELAS.

9.16.1 Syntaxe

```
HOEK_BROWN = _F (
    ♦ GAMMA_RUP      = grup , [R]
    ♦ GAMMA_RES      = gres , [R]
    ♦ S_END          = send , [R]
    ♦ S_RUP          = srup , [R]
    ♦ M_END          = mend , [R]
    ♦ M_RUP          = mrup , [R]
    ♦ BETA           = beta , [R]
    ♦ ALPHAHB        = alphahb , [R]
    ♦ PHI_RUP        = prup , [R]
    ♦ PHI_RES        = pres , [R]
    ♦ PHI_END        = phiend , [R]
)
```

9.16.2 Opérande GAMMA_RUP

Valeur du paramètre d'écrouissage à la rupture du matériau.

9.16.3 Opérande GAMMA_RES

Valeur du paramètre d'écrouissage au début de la résistance résiduelle.

9.16.4 Opérande S_END

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

9.16.5 Opérande s_RUP

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

9.16.6 Opérande M_END

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

9.16.7 Opérande M_RUP

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

9.16.8 Opérande BETA

Paramètre caractérisant le comportement post-rupture du matériau.

9.16.9 Opérande ALPHAB

Paramètre caractérisant le comportement post-rupture du matériau.

9.16.10 Opérande PHI_RUP

Valeur de l'angle de frottement atteinte en GAMMA_RUP.

9.16.11 Opérande PHI_RES

Valeur de l'angle de frottement atteinte en GAMMA_RES.

9.16.12 Opérande PHI_END

Valeur de l'angle de frottement à l'initiation d'endommagement (prise nulle par défaut).

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, ils 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 LEMAITRE_IRRA

Caractéristiques (spécifiques à l'irradiation) du fluage des crayons ou assemblages combustibles (comportement LEMAITRE_IRRA de STAT_NON_LINE).

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

La forme uniaxiale de la loi de grandissement est :

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

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]) :

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

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

On doit alors définir à l'aide de l'opérande 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).

Les paramètres de grandissements sont fournis derrière les mots clés GRAN_A, GRAN_B et GRAN_S. On renseigne les quatre mots-clés QSR_K, BETA, PHI_ZERO, L (les autres paramètres du fluage sont identiques à ceux du comportement LEMAITRE) et le comportement en fluage est alors suivant :

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

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 LEMAITRE_IRRA dans STAT_NON_LINE en renseignant le mot-clés LEMAITRE_IRRA dans DEF_MATERIAU. Il faut alors impérativement affecter UN_SUR_K, A, B, S à zéro et PHI_ZERO à un. Dans ces conditions, il n'est pas nécessaire de définir un champ de fluence.

11.1.1 Syntaxe

```

◇ LEMAITRE_IRRA = _F (
    ◆ N = n, [R]
    ◆ UN_SUR_K = 1/K, [R]
    ◇ UN_SUR_M = / 1/m, [R]
    / 0., [DEFAULT]
    ◇ QSR_K = / Q/R, [R]
    / 0., [DEFAULT]
    ◇ BETA = / β, [R]
    / 0., [DEFAULT]
    ◇ PHI_ZERO = / Φ0, [R]
    / 0., [DEFAULT]
    ◇ L = / L, [R]
    / 0., [DEFAULT]
    ◇ GRAN_A = / a, [R]
    / 0., [DEFAULT]
    ◇ GRAN_B = / b, [R]
    / 0., [DEFAULT]
    ◇ GRAN_S = / s, [R]
    / 0., [DEFAULT]
)

```

11.2 Mot clé facteur LMARC_IRRA

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

Brièvement, les relations de comportement sont :

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

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

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.

11.2.1 Syntaxe

```

|          LMARC = = _F (
|          ♦ R_0      = R0      , [R]
|          ♦ DE_0     = eps0    , [R]
|          ♦ N        = n        , [R]
|          ♦ K        = k        , [R]
|          ♦ Y_0      = y0       , [R]
|          ♦ Y_I      = yinfi    , [R]
|          ♦ B        = b        , [R]
|          ♦ A_0      = X0       , [R]
|          ♦ RM       = rm       , [R]
|          ♦ M        = m        , [R]
|          ♦ P        = p        , [R]
|          ♦ P1       = p1       , [R]
|          ♦ P2       = p2       , [R]
|          ♦ M11      = M11      , [R]
|          ♦ M22      = M22      , [R]
|          ♦ M33      = M33      , [R]
|          ♦ M66      = M66      , [R]
|          ♦ N11      = N11      , [R]
|          ♦ N22      = M22      , [R]
|          ♦ N33      = N33      , [R]
|          ♦ N66      = N66      , [R]
|          ♦ Q11      = Q11      , [R]
|          ♦ Q22      = Q22      , [R]
|          ♦ Q33      = Q33      , [R]
|          ♦ Q66      = Q66      , [R]
|          ♦ R11      = R11      , [R]
|          ♦ R22      = R22      , [R]
|          ♦ R33      = R33      , [R]
|          ♦ R66      = R66      , [R]
|          ◇ GRAN_A = / a, [R]
|                      / 0. , [DEFAULT]
|          ◇ GRAN_B = / b, [R]
|                      / 0. , [DEFAULT]
|          ◇ GRAN_S = / s, [R]
|                      / 0. , [DEFAULT]
|          )

```

11.3 Mot clé facteur DIS_GRICRA

Ce mot clé permet de définir les paramètres associés au comportement non linéaire de la liaison entre la grille et le crayon dans un assemblage combustible modélisée par un élément discret (cf. [R5.03.17]). Le comportement utilisable dans les commandes STAT_NON_LINE et DYNA_NON_LINE à partir de ces paramètres est DIS_GRICRA :

- comportement s'appuyant sur un élément discret à 2 nœuds (modélisation DIS_TR) avec degrés de liberté en translation et en rotation
- contact avec frottement de Coulomb pour les degrés de translation, modélisé par un modèle élastoplastique
- loi de comportement non linéaire en rotation basé sur des considérations géométriques et physiques (cf. [R5.03.17])

Un certain nombre de paramètres supplémentaires, disponibles pour ce comportement mais qui ne figurent pas dans le présent document, sont explicités dans [V6.04.131].

11.3.1 Syntaxe

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

    ◇ KN_BOS      = / kn_bossette,          [R]
    ◇ KT_BOS      = / kt_bossette ,          [R]
    ◇ KN_RES      = / kn_ressort,           [R]
    ◇ KT_RES      = / kt_ressort ,          [R]
    ◇ COUL_BOS    = / mu_bossette ,          [R]
    ◇ COUL_RES    = / mu_ressort,           [R]
    ◇ ECRO_BOS    = / gamma_bossette ,      [R]
    ◇ ECRO_RES    = / gamma_ressort,        [R]
    ◇ FORC_SER    = / forc_serrage,         [R]
    ◇ DIST_BOS    = / distance_bossette,    [R]
)
```

11.3.2 Opérandes

La liaison grille-crayon des assemblages combustibles est constituée d'un système de bossettes et de ressorts (cf. [R5.03.17]), pour lesquels on doit spécifier les paramètres suivants :

KN_BOS = kn_bossette

Rigidité normale des bossettes (en N/m).

KT_BOS = kt_bossette

Rigidité tangentielle des bossettes (en N/m).

KN_RES = kn_ressort

Rigidité normale des ressorts (en N/m).

KT_RES = kt_ressort

Rigidité tangentielle des ressorts (en N/m).

COUL_BOS = mu_bossette

Coefficient de Coulomb pour le frottement des bossettes.

COUL_RES = mu_ressort

Coefficient de Coulomb pour le frottement des ressorts.

ECRO_BOS = gamma_bossette

Paramètre d'écrouissage permettant de traiter le frottement des bossettes (en N/m).

Ce paramètre n'a pas de sens physique, et n'est introduit que pour aider la convergence du calcul lorsqu'il y a glissement (idem plasticité parfaite).

ECRO_RES = gamma_ressort

Paramètre d'érouissage permettant de traiter le frottement des ressorts (en N/m)

Ce paramètre n'a pas de sens physique, et n'est introduit que pour aider la convergence du calcul lorsqu'il y a glissement (idem plasticité parfaite).

FORC_SER = forc_serrage

Force de serrage (positive) initiale du crayon dans la grille (égale à la force appliquée sur les ressorts) (en N).

DIST_BOS = distance_bossette

Distance entre les bossettes (en m).

Ce paramètre doit être recalé dans le cas où on utilise un seul discret pour modéliser plusieurs liaisons grille-crayon, et ne correspond donc pas nécessairement à la véritable distance entre les bossettes mesurée sur les grilles de l'assemblage.

11.4 Mot clé facteur GATT_MONERIE

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

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

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

11.4.1 Syntaxe

◇ GATT_MONERIE = _F (

| | | | |
|-------------|-----|-------------|-----------|
| ◆ D_GRAIN | = / | d_grain, | [R] |
| ◆ PORO_INIT | = / | poro_init , | [R] |
| ◇ EPSI_01 | = / | epsi1, | [R] |
| | | 2.7252E-10, | [DEFAULT] |
| ◇ EPSI_02 | = / | epsi2, | [R] |
| | | 9.1440E-41 | [DEFAULT] |

avec

| | |
|-----------|---|
| D_GRAIN | : taille du grain combustible |
| PORO_INIT | : porosité initiale |
| EPSI_01 | : coefficient vitesse de déformation basse contrainte |
| EPSI_02 | : coefficient vitesse de déformation forte contrainte |

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

11.5 Mot clé facteur DIS_CONTACT

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

- DIS_CONTACT : comportement s'appuyant sur un élément discret à 2 nœuds (modélisations DIS_T et DIS_TR) :
 - 1) contact avec frottement de Coulomb pour les degrés de translation,
 - 2) relation de comportement de type élastoplastique pour les degrés de rotation
- DIS_CHOC : choc avec frottement de Coulomb s'appuyant sur un élément discret à 1 ou 2 nœuds (modélisations DIS_T ou DIS_TR s'appuyant sur des mailles POI1 ou SEG2).

11.5.1 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]
    ◇ EFFO_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]
)

```

11.5.2 Opérandes

Comportement 'DIS_CONTACT' :

Comportement concernant les degrés de liberté de translation

COULOMB = mu

Valeur du coefficient de frottement.

EFFO_N_INIT = Fini

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

KT_ULTM = ktu

Pente de régularisation qui simule un glissement non parfait.

RIGI_N_FO = Fn(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(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 = a1, MOMENT_1 = m1,
ANGLE_2 = a2, MOMENT_2 = m2,
ANGLE_3 = a3, MOMENT_3 = m3,
ANGLE_4 = a4, MOMENT_4 = m4,

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 = cpr

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

Comportement 'DIS_CHOC' :

COULOMB = mu

Valeur du coefficient de frottement

RIGI_NOR = Kn

Valeur de la rigidité normale de choc. Si RIGI_NOR est présent c'est cette valeur qui est prise en compte. Si elle n'est pas présente, les éléments discrets auxquels on affecte ce matériau doivent avoir leur raideur définie par ailleurs (par exemple à l'aide de la commande AFFE_CARA_ELEM avec les mots clés DISCRET ou RIGI_PARASOL).

RIGI_TAN = Kt

Valeur de la rigidité tangentielle de choc

AMOR_NOR = Cn

Valeur de l'amortissement normal de choc

AMOR_TAN = Ct

Valeur de l'amortissement tangentiel de choc

DIST_1 = dist1

Distance caractéristique de matière entourant le premier nœud de choc

DIST_2 = dist2

Distance caractéristique de matière entourant le deuxième nœud de choc (choc entre deux structures mobiles)

JEU = d0

Distance entre le nœud de choc et un obstacle non modélisé (cas d'un choc entre une structure mobile et un obstacle indéformable et immobile).

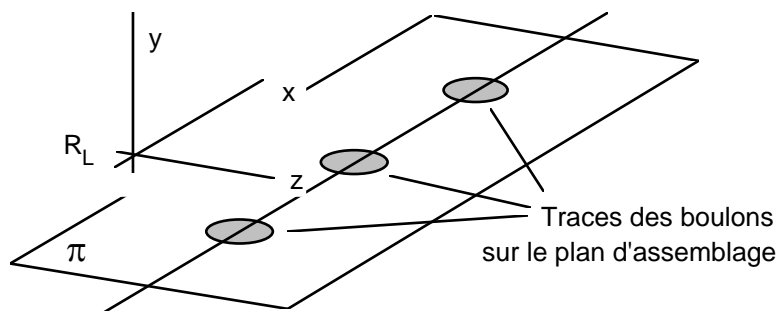
11.6 Mot clé facteur ASSE_CORN : comportement d'un assemblage boulonné

11.6.1 Syntaxe

```
| ASSE_CORN = _F (
    ♦ NU_1      = nu1      [R]
    ♦ MU_1      = mu1      [R]
    ♦ DXU_1     = dxu1     [R]
    ♦ DRYU_1    = dryu1    [R]
    ♦ C_1       = c1       [R]
    ♦ NU_2      = nu2      [R]
    ♦ MU_2      = mu2      [R]
    ♦ DXU_2     = dxu2     [R]
    ♦ DRYU_2    = dryu2    [R]
    ♦ C_2       = c2       [R]
    ♦ KY        = ky       [R]
    ♦ KZ        = kz       [R]
    ♦ KRX       = krx      [R]
    ♦ KRZ       = krz      [R]
    ◇ R_P0      = / rp0    [R]
                      / 1.E-4
)
```

11.6.2 Opérandes

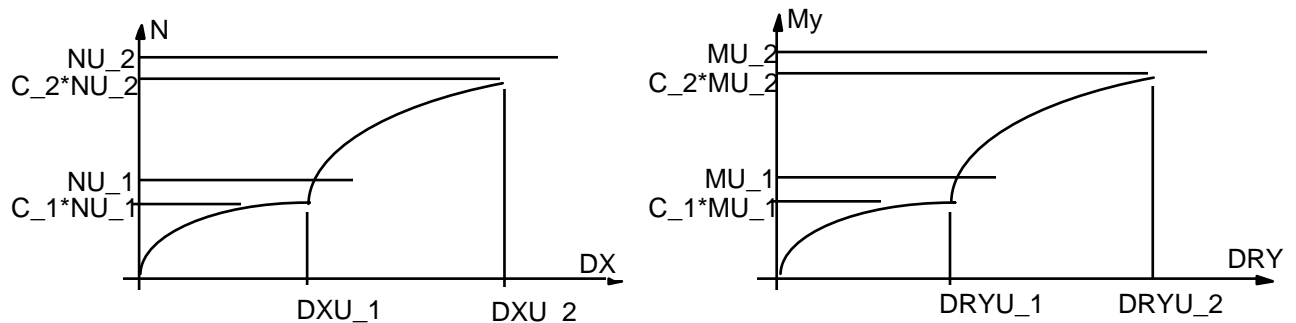
Sur la figure suivante, le plan π représente le plan de l'assemblage. L'axe des boulons est perpendiculaire à ce plan. Le lecteur se reportera à [U4.42.01] AFPE_CARA_ELEM pour l'orientation du repère R_L définissant le plan de l'assemblage.



La relation de comportement de l'assemblage est :

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

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



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

KY : raideur en translation suivant Y
KZ : raideur en translation suivant Z
KRX : raideur en rotation autour de X
KRZ : raideur en rotation autour de Z
R_P0 : Pente à l'origine ou de décharge

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

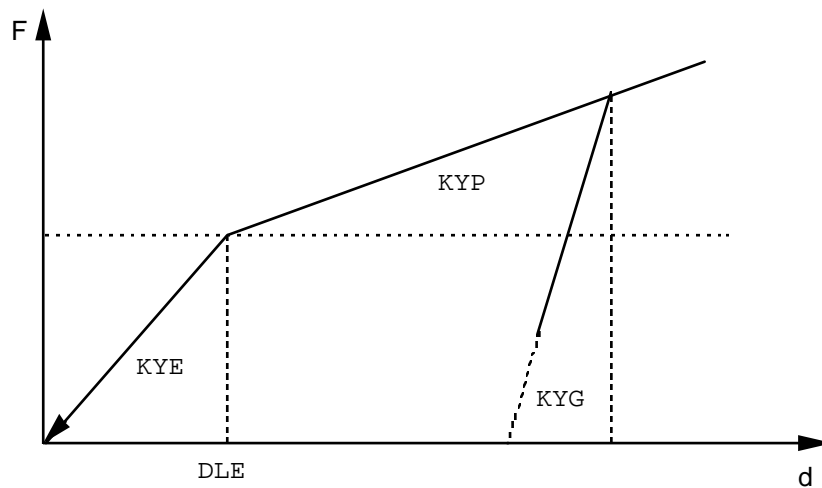
Le bras de chaque armement de phase rompue, représenté par un élément discret, a un comportement non-linéaire en force-déplacement constitué par la différence entre le déplacement maximal d_{lp} de l'extrémité de l'armement dans la phase plastique et le déplacement élastique limite d_{le} .

11.7.1 Syntaxe

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

11.7.2 Opérande

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



12 Comportement fluide

12.1 Mot clé facteur FLUIDE

| FLUIDE

Définitions des caractéristiques de fluide constantes.

12.1.1 Syntaxe

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

12.1.2 Opérandes

♦ RHO = rho

Masse volumique du fluide. Pas de vérification.

◇ / CELE_R = celr

Célérité de propagation des ondes acoustiques dans le milieu fluide (type réel).
Pas de vérification de l'ordre de grandeur.

/ CELE_C = celc

Célérité de propagation des ondes acoustiques dans le milieu fluide (type complexe notamment pour un milieu poreux). Pas de vérification de l'ordre de grandeur.

Pour une modélisation en PHENOMENE : ACOUSTIQUE (commande AFFE_MODELE [U4.41.01]) seule la définition de la célérité à l'aide du mot clé CELE_C est valide.

La définition à l'aide du mot clé CELE_R conduit à un arrêt en erreur.

13 Données Matériaux associées à des post-traitements

13.1 Mot clé facteur **FATIGUE**

On pourra se reporter à [R7.04.01].

13.1.1 Syntaxe

```
◇  FATIGUE = _F (
[fonction]      ◇  /  ◆  WOHLER          =  f_wohl ,

                /  ◆  A_BASQUIN         =  a    ,          [R]
                /  ◆  BETA_BASQUIN      =  β    ,          [R]

                /  ◆  A0                 =  a0   ,          [R]
                /  ◆  A1                 =  a1   ,          [R]
                /  ◆  A2                 =  a2   ,          [R]
                /  ◆  A3                 =  a3   ,          [R]
                /  ◆  SL                 =  SL   ,          [R]

[fonction]      ◇  MANSON_COFFIN       =  f_mans ,

                ◇  E_REFE               =  Ec   ,          [R]
                ◇  D0                   =  d0   ,          [R]
                ◇  TAU0                 =  τ0   ,          [R]

                )
```

13.1.2 Opérande **WOHLER**

Cet opérande permet d'introduire la courbe de Wöhler du matériau sous une forme discrétisée point par point. Cette fonction donne le nombre de cycles à la rupture N_{rupt} en fonction de la demi-amplitude de contrainte $\frac{\Delta\sigma}{2}$.

La courbe de Wöhler est une fonction pour laquelle l'utilisateur choisit le mode d'interpolation :

- **LOG LOG** : interpolation logarithmique sur le nombre de cycles à la rupture et sur la demi-amplitude de la contrainte (formule de Basquin par morceaux),
- **LIN LIN** : interpolation linéaire sur le nombre de cycles à la rupture et sur la demi amplitude de la contrainte (cette interpolation est déconseillée car la courbe de Wöhler n'est absolument pas linéaire dans ce repère),
- **LIN LOG** : interpolation en linéaire sur la demi-amplitude de contrainte, et logarithmique sur le nombre de cycles à la rupture, ce qui correspond à l'expression donnée par Wöhler.

L'utilisateur doit également choisir le type de prolongement de la fonction à droite et à gauche.

13.1.3 Opérandes A_BASQUIN / BETA_BASQUIN

- ♦ A_BASQUIN = a
- ♦ BETA_BASQUIN = 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 = τ_0

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, [fonction**]
    ♦ EXP_S = / pd, [R]
    / 1.0, [DEFAULT]
)
```

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

13.2.1 Opérande s

♦ S = s

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

13.2.2 Opérande EPSP_SEUIL

♦ EPSP_SEUIL = pd

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

13.2.3 Opérande EXP_S

♦ EXP_S = exp

Permet de définir la loi de Lemaitre-Sermage, la valeur par défaut (1.0) correspond au calcul du dommage de Lemaitre

13.3 Mot clé facteur CISA_PLAN_CRIT

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

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

13.3.1 Opérande MATAKE_A

```
◇ MATAKE_A = a ,
```

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

13.3.2 Opérande MATAKE_B

```
◇ MATAKE_B = b ,
```

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

13.3.3 Opérande ENDU_FT

```
◇ ENDU_FT = endu_ft ,
```

Permet de spécifier la valeur du rapport des limites d'endurance en flexion et torsion alternées, cf. [R7.04.01] et [U4.83.02]. Cette valeur doit être supérieure ou égale à un et inférieure ou égale à $\sqrt{3}$.

13.4 Mot clé facteur WEIBULL / WEIBULL_FO

Définition des coefficients du modèle de Weibull [R7.02.06].

Brièvement, la probabilité de rupture cumulée de rupture P_r d'une structure s'écrit, dans le cas d'un chargement monotone :

$$P_r = 1 - \exp \left[- \sum_{V_p} \left(\left(\frac{\sigma_I}{\sigma_u} \right)^m \frac{V_p}{V_0} \right) \right]$$

où la sommation porte sur les mailles V_p plastifiées (i.e. déformation plastique cumulée supérieure à une valeur choisie arbitrairement p_s) et m, 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 : V0
Paramètres associés au modèle de Weibull.
- ♦ SEUIL_EPSP_CUMU = ps
Déformation plastique cumulée.

13.5 Mots clés facteur RCCM / RCCM_FO

Définition des grandeurs nécessaires à l'utilisation des méthodes simplifiées définies dans le règlement RCC-M [R7.04.03]. Ces grandeurs sont constantes ou fonction du paramètre 'TEMP'.

13.5.1 Syntaxe

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

13.5.2 Opérande SY_02

Limite d'élasticité à 0,2% de déformation plastique à la température de calcul. Cet opérande peut varier en fonction de la température.

13.5.3 Opérande SM

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

13.5.4 Opérande SU

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

13.5.5 Opérande SC

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

13.5.6 Opérande SH

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

13.5.7 Opérande S

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

13.5.8 Opérande N_KE_RCCM / M_KE_RCCM

- ♦ N_KE_RCCM = n
- ♦ M_KE_RCCM = m

Ces opérandes permettent de définir les valeurs de n et m deux constantes du matériau.

Ces caractéristiques sont nécessaires pour le calcul du coefficient de concentration élasto-plastique K_e , qui est défini par le RCC-M comme étant le rapport entre l'amplitude de déformation réelle et l'amplitude de déformation déterminée par l'analyse élastique.

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