Comportements non linéaires

1 But

Ce document décrit les comportements non linéaires de *Code_Aster*, introduits par l'intermédiaire du mot-clé COMPORTEMENT dans les opérateurs de calcul non linéaire :

STAT_NON_LINE, DYNA_NON_LINE, SIMU_POINT_MAT, etc...

Pour chaque comportement sont précisés les domaines d'application, les mots-clés définissant les paramètres matériau, le contenu des variables internes et les modélisations supportées.

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

Table des Matières

1 But....1
2 Syntaxe....7
3 Conventions de notation....8
3.1 Nomenclature des modélisations....8
3.2 Variables internes....8
4 Mot clé COMPORTEMENT....10
4.1 Modélisation des contraintes planes par la méthode de Borst....10
4.2 Modélisation locale et non locale....10
4.3 Lois de comportement et variables de commandes....11
4.4 Opérande RELATION....11
4.4.1 Modèles élastiques....11
4.4.1.1 'ELAS'....11
4.4.1.2 'ELAS_HYPER'....12
4.4.1.3 'ELAS_VMIS_LINE'....12
4.4.1.4 'ELAS_VMIS_TRAC'....12
4.4.1.5 'ELAS_VMIS_PUIS'....12
4.4.1.6 'ELAS_POUTRE_GR'....13
4.4.1.7 'CABLE'....13
4.4.1.8 'ELAS_MEMBRANE_SV',....13
4.4.1.9 'ELAS_MEMBRANE_NH'....13
4.4.2 Modèles élasto-plastiques....13
4.4.2.1 'VMIS_ISOT_TRAC'....13
4.4.2.2 'VMIS_ISOT_PUIS'....14
4.4.2.3 'VMIS_ISOT_LINE'....14
4.4.2.4 'VMIS_JOHN_COOK'....14
4.4.2.5 'VMIS_CINE_LINE'....14
4.4.2.6 ' VMIS_ECMI_TRAC '....15
4.4.2.7 ' VMIS_ECMI_LINE '....15
4.4.2.8 ' VMIS_CIN1_CHAB '....15
4.4.2.9 ' VMIS_CIN2_CHAB '....16
4.4.2.10 ' VMIS_CIN2_MEMO '....16
4.4.2.11 ' VMIS_CIN2_NRAD '....16
4.4.2.12 ' VMIS_MEMO_NRAD '....16
4.4.2.13 'DIS_CHOC'....17
4.4.2.14 'DIS_CONTACT'....17
4.4.2.15 'DIS_ECRO_TRAC'....18
4.4.2.16 'ARME'....18
4.4.2.17 'RELAX_ACIER'....19

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

4.4.2.18 'ASSE_CORN'....19
4.4.2.19 'DIS_GOUJ2E_PLAS'....19
4.4.2.20 'DIS_GOUJ2E_ELAS'....19
4.4.2.21 ' VMIS_ASYM_LINE'....20
4.4.2.22 ' DIS_ECRO_CINE '....20
4.4.2.23 ' DIS_BILI_ELAS'....20
4.4.2.24 ' VMIS_CINE_GC '....21
4.4.2.25 'DASHPOT '....21
4.4.3 Modèles élasto-viscoplastiques....21
4.4.3.1 ' VISC_ISOT_LINE'....22
4.4.3.2 ' VISC_ISOT_TRAC '....22
4.4.3.3 ' LEMAITRE '....22
4.4.3.4 ' NORTON '....22
4.4.3.5 ' DIS_VISC '....23
4.4.3.6 ' VISC_CIN1_CHAB '....23
4.4.3.7 ' VISC_CIN2_CHAB '....23
4.4.3.8 ' VISC_CIN2_MEMO '....24
4.4.3.9 ' VISC_CIN2_NRAD '....24
4.4.3.10 ' VISC_MEMO_NRAD '....24
4.4.3.11 ' VISCOCHAB '....25
4.4.3.12 'NORTON_HOFF'....25
4.4.3.13 'VISC_TAHERI'....26
4.4.3.14 'MONOCRISTAL'....26
4.4.3.15 'POLYCRISTAL'....27
4.4.4 Comportements spécifiques aux crayons combustibles et métaux sous irradiation....28
4.4.4.1 'VISC_IRRA_LOG'....28
4.4.4.2 'GRAN_IRRA_LOG'....28
4.4.4.3 'LEMAITRE_IRRA'....28
4.4.4.4 'LEMA_SEUIL'....28
4.4.4.5 'IRRAD3M'....29
4.4.4.6 'DIS_GRICRA'....29
4.4.5 Modèles mécaniques avec effets des transformations métallurgiques....30
4.4.5.1 Lois en kit de type META_* sauf META_LEMA_ANI....30
4.4.5.2 Loi META_LEMA_ANI....32
4.4.5.3 Loi MetaAcierEPIL_PT....32
4.4.6 Modèles locaux et non locaux d'endommagement....33
4.4.6.1 'ROUSSELIER', 'ROUSS_PR', 'ROUSS_VISC'....33
4.4.6.2 'GTN'....34
4.4.6.3 'HAYHURST'....35

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

4.4.6.4 'VENDOCHAB'....35
4.4.6.5 'VISC_ENDO_LEMA'....35
4.4.6.6 'CZM_EXP_REG'....36
4.4.6.7 'CZM_LIN_REG'....36
4.4.6.8 'CZM_EXP'....37
4.4.6.9 'CZM_OUV_MIX'....37
4.4.6.10 'CZM_EXP_MIX'....37
4.4.6.11 'CZM_EXP_MIX'....38
4.4.6.12 'CZM_TAC_MIX'....38
4.4.6.13 'CZM_TRA_MIX'....39
4.4.6.14 'CZM_FAT_MIX'....39
4.4.6.15 'CZM_LAB_MIX'....39
4.4.6.16 'RUPT_FRAG'....40
4.4.6.17 'RANKINE'....40
4.4.6.18 'JOINT_MECA_RUPT'....40
4.4.6.19 'JOINT_MECA_FROT'....41
4.4.6.20 'ENDO_HETEROGENE'....41
4.4.7 Comportements spécifiques à la modélisation du béton et du béton armé....41
4.4.7.1 'ENDO_ISOT_BETON'....41
4.4.7.2 'ENDO_FISS_EXP'....42
4.4.7.3 'ENDO_SCALAIRE'....42
4.4.7.4 'ENDO_CARRE'....42
4.4.7.5 'ENDO_ORTH_BETON'....43
4.4.7.6 'MAZARS'....43
4.4.7.7 'MAZARS_GC'....43
4.4.7.8 'ENDO_PORO_BETON'....44
4.4.7.9 'BETON_DOUBLE_DP'....44
4.4.7.10 'GRILLE_ISOT_LINE'....44
4.4.7.11 'GRILLE_CINE_LINE'....45
4.4.7.12 'GRILLE_PINTO_MEN'....45
4.4.7.13 'PINTO_MENEGOTTO'....45
4.4.7.14 'GLRC_DAMAGE'....45
4.4.7.15 'GLRC_DM'....46
4.4.7.16 ' DHRC '....47
4.4.7.17 'CORR_ACIER'....47
4.4.7.18 'BETON_REGLE_PR'....47
4.4.7.19 'JOINT_BA'....48
4.4.7.20 'BETON_GRANGER'....48
4.4.7.21 ' BETON_GRANGER_V'....48

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

4.4.7.22 'BETON_UMLV'....48
4.4.7.23 'BETON_RAG'....49
4.4.7.24 'BETON_BURGER'....49
4.4.7.25 ' FLUA_PORO_BETON '....49
4.4.7.26 'RGI_BETON'....49
4.4.8 Comportements mécaniques pour les géo-matériaux....50
4.4.8.1 'GONF_ELAS'....50
4.4.8.2 'MOHR_COULOMB'....50
4.4.8.3 'CJS'....50
4.4.8.4 'LAIGLE'....51
4.4.8.5 'LETK'....51
4.4.8.6 'HOEK_BROWN'....51
4.4.8.7 'HOEK_BROWN_EFF'....51
4.4.8.8 'HOEK_BROWN_TOT'....52
4.4.8.9 'CAM_CLAY'....52
4.4.8.10 'BARCELONE'....52
4.4.8.11 'DRUCK_PRAGER'....53
4.4.8.12 'DRUCK_PRAG_N_A'....53
4.4.8.13 'VISC_DRUC_PRAG....53
4.4.8.14 'HUJEUX'....53
4.4.8.15 'JOINT_BANDIS'....54
4.4.8.16 'LKR'....54
4.4.8.17 'Iwan'....54
4.4.9 Comportements intégrés par un logiciel externe....55
4.4.9.1 'UMAT'....55
4.4.9.2 'MFRONT'....55
4.4.10 Comportement pour les poutres multifibres....56
4.4.10.1 ' MULTIFIBRE '....56
4.5 Opérande RELATION_KIT sous COMPORTEMENT....56
4.5.1 KIT associé au comportement métallurgique....57
4.5.2 KIT associé au comportement du béton : 'KIT_DDI'....57
4.5.3 KIT associé au comportement des milieux poreux (modélisations thermo-hydro-mécanique)....58
4.5.3.1 Mot-clé RELATION....58
4.5.3.2 Mot-clé RELATION_KIT....59
4.5.3.3 Comportements mécaniques du squelette (s'il y a modélisation mécanique M)....60
4.5.3.4 Comportements des liquides / gaz....60
4.5.3.5 La loi hydraulique....61
4.5.3.6 Les combinaisons possibles....62

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

4.5.4 KIT associé à la modélisation des câbles frottants : KIT_CG....64
4.6 Opérande DEFORMATION....64
4.6.1 DEFORMATION='PETIT'....64
4.6.2 DEFORMATION='GROT_GDEP'....65
4.6.3 DEFORMATION='PETIT_REAC'....65
4.6.4 DEFORMATION='SIMO_MIEHE'....66
4.6.5 DEFORMATION='GDEF_LOG'....66
4.6.6 Modèles de déformation pour MFront....67
4.7 Opérandes TOUT/GROUP_MA/MAILLE....67
4.8 Opérandes RESI_CPLAN_RELA, RESI_CPLAN_MAXI, ITER_CPLAN_MAXI....67
4.9 Opérande PARM_THETA....68
4.10 Opérandes RESI_INTE_RELA/RESI_INTE_MAXI, ITER_INTE_MAXI....68
4.11 Opérande RESI_RADI_RELA....68
4.12 Opérande ITER_INTE_PAS....69
4.13 Opérande ALGO_INTE....69
4.14 Opérande TYPE_MATR_TANG....69
4.15 Opérande POST_ITER....70
4.16 Opérande POST_INCR....70

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

2 Syntaxe

```
♦  |  COMPORTEMENT = _F (
♦ RELATION =     / 'ELAS',                                  [DEFAUT]
                 / relations incrémentales décrites dans ce document
◊ RELATION_KIT=  / relations kit décrites dans ce document
◊ DEFORMATION =  / 'PETIT',                                 [DEFAUT]
                 / 'PETIT_REAC',
                 / 'SIMO_MIEHE',
                 / 'GROT_GDEP',
                 / 'GDEF_LOG'

◊  /  TOUT = 'OUI',                                         [DEFAUT]
   /  | GROUP_MA=  lgrma,                                [l_gr_maille]
      | MAILLE =   lma,                                        [l_maille]

◊  ITER_CPLAN_MAXI =/ 1                                     [DEFAUT]
                    / iter_cplan_maxi
◊  /  RESI_CPLAN_RELA =/ 1.E-6,                             [DEFAUT]
                       / resi_cplan_rela
   /  RESI_CPLAN_MAXI = resi_cplan_maxi

◊  PARM_THETA =     / 1.  ,                                 [DEFAUT]
                    / theta,                                [R]
◊  RESI_INTE_RELA = / 1.E-6,                                [DEFAUT]
                    / resint,                               [R]
◊  RESI_INTE_MAXI = / 1.E-8,                                [DEFAUT]
                     / resintmax,                           [R]
◊  ITER_INTE_MAXI = / 10,                                   [DEFAUT]
                    / iteint,                               [I]
◊  ITER_INTE_PAS =  / 0,                                    [DEFAUT]
                    / itepas,                               [I]
◊  ALGO_INTE =      / 'ANALYTIQUE',                         [DEFAUT]
                    / 'SECANTE',
                    / 'DEKKER',
                    / 'NEWTON_1D',
                    / 'BRENT',
                    / 'NEWTON', / 'NEWTON_RELI', / 'NEWTON_PERT',
                    / 'RUNGE_KUTTA',
                    / 'SPECIFIQUE'
                    / 'SANS_OBJET'

◊  TYPE_MATR_TANG=  / 'PERTURBATION',
                    / 'VERIFICATION',
                       ◊  VALE_PERT_RELA =  / 1.E-5,        [DEFAUT]
                                            / perturb,          [R]
                  ),
```


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

3 Conventions de notation

3.1 Nomenclature des modélisations

Pour ne pas surcharger ce document, des regroupements des différentes modélisations sont proposés ici. Nous appellerons par la suite :

Modélisation 3D	=	les modélisations 3D, 3D_SI
Modélisation INCO_UPG	=	les modélisations 3D_INCO_UPG, AXIS_INCO_UPG et D_PLAN_INCO_UPG
Modélisation INCO_UP	=	les modélisations 3D_INCO_UP,AXIS_INCO_UP D_PLAN_INCO_UP
Modélisation D_PLAN	=	les modélisations D_PLAN et D_PLAN_SI
Modélisation AXIS	=	les modélisations AXIS et AXIS_SI
Modélisation 2D	=	les modélisations D_PLAN, D_PLAN_SI, AXIS, AXIS_SI
Modélisation C_PLAN	=	les modélisations C_PLAN et C_PLAN_SI
Modélisation COQUE	=	les modélisations COQUE_3D et DKT
Modélisation TUYAU	=	les modélisations TUYAU_3M et TUYAU_6M
Modélisation COQUE1D	=	les modélisations COQUE_AXIS
Modélisation CONT_PLAN	=	les modélisations C_PLAN et COQUE et TUYAU et COQUE1D
Modélisation 3D_DIS	=	les modélisations DIS_T et DIS_TR
Modélisation 2D_DIS	=	les modélisations 2D_DIS_T et 2D_DIS_TR
Modélisation DISCRET	=	les modélisations 3D_DIS et 2D_DIS
Modélisation POU	=	les modélisations POU_D_E, POU_D_T, POU_D_TG
Modélisation GRILLE	=	les modélisations GRILLE et GRILLE_MEMBRANE
Modélisation PMF	=	les modélisations POU_D_EM et POU_D_TGM
Modélisation BARRE	=	les modélisations BARRE et 2D_BARRE
Modélisation CONT_1D	=	les modélisations BARRE et GRILLE
Modélisation CONT_1D(PMF)	=	les modélisations CONT_1D pour les PMF (intégration directe).
Modélisation THM	=	les modélisations thermo_hydro_mécaniques
Modélisation GRAD_VARI	=	les modélisations 3D_GRAD_VARI, D_PLAN_GRAD_VARI, et AXIS_GRAD_VARI
Modélisation JOINT	=	PLAN_JOINT, AXIS_JOINT

3.2 Variables internes

Les variables internes sont décrites succinctement dans ce document pour chaque comportement. Le détail de leur signification est fourni dans les documents de référence spécifiques de ces comportements. Le nom des variables internes est toutefois visible dans le ficher «messages » à l'exécution de STAT_NON_LINE / DYNA_NON_LINE.

Sélectionner le bon numéro de variable interne (V1, V2, V3, etc) est peu pratique à l'usage et devient très difficile lorsque l'on mélange plusieurs comportements. C'est pour cela que certaines commandes permettent d'utiliser leur version nommée à l'aide du mot-clef NOM_VARI : CALC_CHAMP, CREA_TABLE, IMPR_RESU, POST_CHAMP, POST_ELEM, RECU_FONCTION et TEST_RESU.
De plus, lors de l'impression d'un résultat au format MED (IMPR_RESU), un champ nommé (VARI_ELGA_NOMME) est également produit et permet d'afficher aisément ces variables internes.
En fin de ce document (voir page Error: Reference source not found), on trouvera la liste exhaustive de toutes les variables internes, leur nom, une description courte et quel(s) comportement(s) les utilisent.

Remarques :

- En particulier, la variable interne nommée « indicateur de plasticité » indique qu'il y a eu de la plasticité créée au cours du pas de calcul et au point de Gauss courant et non pas au cours de tout le transitoire.
- Les lois de comportement (mot-clef RELATION) ne sont pas les seuls paramètres qui créent des variables internes. Le choix de la déformation (mot-clef DEFORMATION='SIMO_MIEHE'

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

par exemple), mais aussi le mot-clef POST_ITER et l'utilisation de l'algorithme de De Borst utilisent aussi des variables internes.

- L'utilisation de logiciels externes (UMAT et MFront) pour programmer des lois de comportement ne permet pas d'utiliser le nommage des variables internes. Néanmoins, pour les lois de comportement MFront officiellement intégrées dans code_aster, ce nommage est utilisable.
- Les lois de comportement de type polycristallines ne nomment pas non plus leurs variables internes.
- Les lois de comportement de type métallurgiques (META_*) ont un système de nommage spécifique, expliqué en annexe.

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

4 Mot clé COMPORTEMENT

Ce mot clé facteur permet de définir les relations de comportement.

La plupart des lois de comportement (en particulier en plasticité) s'écrivent de façon incrémentale, car l'histoire du matériau influe sur son comportement ; si ce n'est pas le cas on a affaire à des comportement élastiques, linéaires ou non. On peut avoir dans le même calcul certaines parties de la structure obéissant à des comportements incrémentaux, et d'autres parties obéissant à divers comportements élastiques.

C'est le comportement qui détermine (par l'intermédiaire de son catalogue) le type d'intégration utilisé. Par exemple, les comportements CABLE, ELAS_HYPER, ELAS_POUTRE_GR, ELAS_VMIS_LINE, ELAS_VMIS_TRAC, ELAS_VMIS_PUIS sont intégrés de façon élastique (non linéaire) et non pas incrémentale. En ce qui concerne le comportement ELAS, les deux types d'intégration sont possibles

Pour la signification précise de ces différentes relations on se reportera aux différentes documentations de Référence ainsi qu'à la documentation de DEFI_MATERIAU [U4.43.01].

4.1 Modélisation des contraintes planes par la méthode de Borst

Certains modèles de comportements n'ont pas été développés en contraintes planes. Dans ce cas, on utilise automatiquement l'algorithme de De Borst [R5.03.03] qui permet une prise en compte de l'hypothèse des contraintes planes au niveau de l'algorithme d'équilibre (contrairement aux modèles de comportement développés explicitement en contraintes planes, qui prennent cette hypothèse au niveau de l'intégration des lois de comportement). On peut donc également affecter une loi non linéaire quelconque aux éléments de structure DKT, COQUE_3D et TUYAU*). Là encore, il est nécessaire d'utiliser uniquement la matrice tangente.*

De même, pour les cas utilisant un état de contraintes mono-dimensionnel (POU_D_EM, POU_D_TGM, GRILLE, GRILLE_MEMBRANE, BARRE), pour pouvoir utiliser les comportements qui n'ont pas été développés spécifiquement en 1D, on utilise automatiquement une méthode similaire à celle de De Borst pour intégrer en 1D les comportements disponibles en 3D [R5.03.09].

La méthode de De Borst n'est disponible ni pour les comportements métallurgiques ni avec DEFORMATION = 'SIMO_MIEHE'.

Lorsqu'on utilise MFront, le mode De Borst est déclenché automatiquement si la loi n'a pas été écrite en contraintes planes. Si MFront est utilisé en mode « prototype » (mot-clef RELATION='MFRONT'), c'est à l'utilisateur de choisir le mode de fonctionnement (natif contraintes planes dans MFront ou par algorithme de De Borst).

4.2 Modélisation locale et non locale

Dans le cas de comportements adoucissants, la réponse d'un modèle de comportement local avec endommagement est dépendante du maillage. Pour s'affranchir de cette difficulté, certains modèles peuvent être utilisés en non local. Tout modèle écrit en non local entraîne l'introduction d'une caractéristique du matériau supplémentaire, la longueur caractéristique. Pour certains modèles, elle est définie sous le mot clé facteur NON_LOCAL de l'opérateur DEFI_MATERIAU.

La réponse d'une modélisation non locale est davantage indépendante du maillage. Il existe trois types de lois en non local, activables dans AFFE_MODELE par le mot clé MODELISATION :

- '3D_GRAD_VARI', 'D_PLAN_GRAD_VARI' ou 'AXIS_GRAD_VARI'. Il s'agit ici de lois non locales où intervient le gradient des variables internes du modèle local (confer [R5.04.01]).
- '3D_GVNO', 'D_PLAN_GVNO', ou 'AXIS_GVNO'. Il s'agit, comme le type précédent, de lois non locales où intervient le gradient d'endommagement. Le traitement de l'endommagement est

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

désormais nodal, comme degré de liberté du système global et non plus comme variable interne du modèle local (confer [R5.04.04]).
- 'D_PLAN_2DG', 'D_PLAN_DIL' en complément du modèle à régulariser (confer [R5.04.03]). Il s'agit d'un modèle régularisé par une approche micro-structurale où intervient soit le champ de déformation soit la déformation volumique.

4.3 Lois de comportement et variables de commandes

Pour rappel, le modèle peut comporter une ou plusieurs variables de commande (température, séchage, irradiation, phase métallurgique...), dont le champ est affecté sur les mailles du maillage via le mot-clé AFFE_VARC de la commande AFFE_MATERIAU (cf. [U4.43.03]).

Une variable de commande peut impacter les propriétés matériaux, qui en sont alors fonction.

Dans certains cas, elles peuvent en outre générer une déformation. C'est le cas des variables de commande suivantes : la température 'TEMP', le séchage 'SECH' (on parle alors de déformation de retrait de dessiccation), l'hydratation 'HYDR' (déformation de retrait endogène) et les déformations anélastiques 'EPSAXX', 'EPSAYY', 'EPSAZZ', 'EPSAXY', 'EPSAXZ', 'EPSAXZ'. Ces déformations sont souvent appelées « déformations thermiques » par abus de langage.

Suivant la manière dont a été développée la loi de comportement, ces déformations dues aux variables de commande sont prises en compte grâce à un mécanisme générique. Pour d'autres lois, elles sont prises en compte de manière spécifique.

Actuellement, le mécanisme générique de code_aster couvre le périmètre suivant :
- calcul et prise en compte de la déformation thermique avec un coefficient de dilatation thermique ALPHA isotrope / anisotrope / transverse isotrope, et différenciable selon la phase métallurgique dans le cas isotrope ;
- calcul et prise en compte du retrait de dessiccation et du retrait endogène dans le cas où les paramètres matériau les contrôlant, K_DESSIC et B_ENDOGE , sont isotropes ;
- prise en compte des déformations anélastiques.

Ce mécanisme générique n'est disponible que pour les mesures de déformation de type petites déformations (toutes sauf 'SIMO_MIEHE', c'est-à-dire 'PETIT', 'PETIT_REAC', 'GDEF_LOG' et en principe 'GROT_GDEP' cf. §4.6 – toutefois il n'est pas disponible pour cette dernière cinématique). Cela signifie par exemple qu'une variable de commande comme la température ne peut pas être utilisée en même temps qu'une cinématique 'SIMO_MIEHE' ou 'GROT_GDEP' avec le mécanisme générique.

On notera que les lois de type MFront et UMAT suivent le mécanisme générique.

4.4 Opérande RELATION

4.4.1 Modèles élastiques

Sauf indication contraire, tous les modèles peuvent inclure une dépendance par rapport à la température. De plus, ils sont tous intégrés de façon purement implicite.

4.4.1.1 'ELAS'

Relation de comportement élastique "linéaire", c'est-à-dire que la relation entre les déformations et les contraintes considérées est linéaire. Sous certaines conditions cette relation devient incrémentale : elle permet alors de prendre en compte des déplacements et contraintes initiaux ; le comportement ELAS, est donc par défaut non incrémental,sauf dans les cas suivants :si il existe un etat initial (ETAT_INIT, SIGM_INIT) ou si DEFORMATION=PETIT_REAC, ou si la commande est CALCUL. Au besoin, si ces exceptions ne suffisent pas on peut forcer un comportement élastique incrémental en utilisant VMIS_ISOT_LINE par exemple, avec une limite d'élasticité élevée. De même on peut forcer une

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

hyperelasticité en prenant ELAS_VMIS_LINE , avec une limite d'élasticité élevée. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé :

- ELAS(_FO), en ce qui concerne l'élasticité isotrope,
- ELAS_ISTR(_FO), en ce qui concerne l'élasticité isotrope transverse,
- ELAS_ORTH(_FO), en ce qui concerne l'élasticité orthotrope.
- ELAS_GLRC(_FO), en ce qui concerne l'élasticité des éléments de plaques DKTG et Q4GG.

Les paramètres matériau définis sous ELAS sont utilisés pour un certain nombre de comportements, et également pour le calcul de la matrice de rigidité élastique (PREDICTION='ELASTIQUE', ou MATRICE='ELASTIQUE' sous le mot-clé NEWTON cf [U4.51.03].

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN, DISCRET, INCO_UPG, INCO_UP, POU_*, CONT_1D, CONT_1D(PMF), SHB, CABLE, CABLE_POULIE, COQUE_3D, DKTG, Q4GG.
- Nombre de variables internes : 1
- Signification : $V1$: vide donc vaut toujours zéro

4.4.1.2 'ELAS_HYPER'

Relation de comportement hyper-élastique "non-linéaire", c'est à dire que la relation entre les contraintes est la dérivée d'un potentiel hyper-élastique par rapport aux déformations de Green. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés ELAS_HYPER. Cette relation n'est supportée qu'en grands déplacements, rotations et déformations (DEFORMATION='GROT_GDEP').

- Modélisations supportées: 3D, D_PLAN, C_PLAN
- Exemple : voir test SSNV187

4.4.1.3 'ELAS_VMIS_LINE'

Relation de comportement élastique "non linéaire" (loi de HENCKY) de VON MISES à écrouissage isotrope linéaire. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés VMIS_ISOT_LINE et ELAS (confer [R7.02.03] pour plus de détails). Ce comportement est inutilisable avec un état de contraintes initiales non nulles. Ile faut donc pas l'utiliser en reprise.

- Modélisations supportées : 3D, 2D, C_PLAN
- Exemple : voir test SSNP110

4.4.1.4 'ELAS_VMIS_TRAC'

Relation de comportement élastique "non linéaire" (loi de HENCKY), de VON MISES à écrouissage isotrope non linéaire. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés VMIS_ISOT_TRAC et ELAS (confer [R7.02.03] pour plus de détails). Ce comportement est inutilisable avec un état de contraintes initiales non nulles.

- Modélisations supportées : 3D, 2D et C_PLAN
- Exemple : voir test SSNV108

4.4.1.5 'ELAS_VMIS_PUIS'

Relation de comportement élastique "non linéaire" (loi de HENCKY), de VON MISES à écrouissage isotrope non linéaire défini par une fonction puissance. Les paramètres sont fournis dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé ECRO_PUIS (confer [R5.03.02] pour plus de détails). On doit également renseigner le mot clé ELAS(_FO) dans l'opérateur DEFI_MATERIAU. Ce comportement est inutilisable avec un état de contraintes initiales non nulles.

- Modélisations supportées : 3D, 2D

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

- Exemple : voir test COMP001I

4.4.1.6 'ELAS_POUTRE_GR'

Relation de comportement élastique pour les poutres en grands déplacements et grandes rotations (DEFORMATION='GROT_GDEP' est obligatoire). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé ELAS ou ELAS_FO (Cf. [R5.03.40] pour plus de détail).
- Modélisations supportées : POU_D_T_GD
- Variables internes (sans intérêt pour l'utilisateur, mais nécessaire au fonctionnement) : 3
- Exemple : voir test SSNL103

4.4.1.7 'CABLE'

Relation de comportement élastique adaptée aux câbles (DEFORMATION='GROT_GDEP' obligatoire) : le module d'Young du câble peut être différent en compression et en traction (en particulier il peut être nul en compression). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé CABLE (confer [R3.08.02] pour plus de détails).
- Modélisations supportées : CABLE
- Exemple : voir test HSNL100

4.4.1.8 'ELAS_MEMBRANE_SV',

Relation de comportement hyper-élastique de Saint Venant Kirchhoff adaptée aux membranes (DEFORMATION='GROT_GDEP' obligatoire, confer [R3.08.07] pour plus de détails). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé ELAS. Cette relation ne peut pas inclure de dépendance à la température.
- Modélisations supportées : MEMBRANE
- Exemple : voir test SSNS115

4.4.1.9 'ELAS_MEMBRANE_NH'

Relation de comportement hyper-élastique néo-Hookéenne adaptée aux membranes (DEFORMATION='GROT_GDEP' obligatoire, confer [R3.08.07] pour plus de détails). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé ELAS . Cette relation ne peut pas inclure de dépendance à la température.
- Modélisations supportées : MEMBRANE
- Exemple : voir test SSNS115

4.4.2 Modèles élasto-plastiques

4.4.2.1 'VMIS_ISOT_TRAC'

Relation de comportement d'élasto-plasticité de VON MISES à écrouissage isotrope non linéaire. La courbe (σ,ε) en traction simple est fournie dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé TRACTION (Cf. [R5.03.02] pour plus de détails). On peut éventuellement définir plusieurs courbes de traction suivant la température. On doit également renseigner le mot clé ELAS(_FO) dans l'opérateur DEFI_MATERIAU. Dans le cas où on fournit une courbe de traction, le module d'YOUNG utilisé pour la relation de comportement est celui calculé à partir du premier point de la courbe de traction, celui utilisé pour le calcul de la matrice élastique (voir mot clé NEWTON [U4.51.03]) est celui donné dans ELAS(_FO). Exemple : voir test FORMA03.
- Modélisations locales supportées : 3D, 2D, INCO_UPG, INCO_UP, CONT_PLAN, CONT_1D, CONT_1D(PMF),SHB. Les grandes déformations de type SIMO_MIEHE sont disponibles pour ce comportement.
  - Nombre de variables internes : 2

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

- $V1$: déformation plastique cumulée,
- $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 pour élastique, 1 pour plastique).

Exemple : test SSNV501, SSNV156.

4.4.2.2 'VMIS_ISOT_PUIS'

Relation de comportement d'élasto-plasticité de Von Mises à écrouissage isotrope non linéaire défini par une fonction puissance. Les paramètres sont fournis dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé ECRO_PUIS (confer [R5.03.02] pour plus de détails). On doit également renseigner le mot clé ELAS(_FO) dans l'opérateur DEFI_MATERIAU.

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN, CONT_1D, INCO.
  - Nombre de variables internes : 2
    - Signification : $V1$: déformation plastique cumulée, $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 pour élastique, 1 pour plastique).
  - Les grandes déformations de type SIMO_MIEHE sont disponibles pour ce comportement.

Exemple : voir test COMP002.

4.4.2.3 'VMIS_ISOT_LINE'

Relation de comportement d'élasto-plasticité de VON MISES à écrouissage isotrope linéaire. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01] sous les mots clés ECRO_LINE(_FO) et ELAS(_FO) (Cf. [R5.03.02]).

- Modélisations locales supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN, CONT_1D, CONT_1D(PMF), INCO_UPG, INCO_UP.
  - Nombre de variables internes : 2
    •Signification (hormis modélisation BARRE) : $V1$: déformation plastique cumulée, $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 pour élastique, 1 pour plastique).

  Exemple : voir test SSNP156.

  Les grandes déformations de type SIMO_MIEHE sont disponibles pour ce comportement.
- Supporte la méthode IMPL_EX; dans ce cas, la variable $V2$ représente l'incrément de déformation plastique cumulée divisé par l'incrément de temps (soit une approximation de $\dot{p}$

4.4.2.4 'VMIS_JOHN_COOK'

Relation de comportement d'élasto-plasticité de Von Mises à écrouissage isotrope non linéaire défini par la loi de Johnson-Cook. Les paramètres sont fournis dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé ECRO_COOK (Cf. [R5.03.02] pour plus de détails). On doit également renseigner le mot clé ELAS(_FO) dans l'opérateur DEFI_MATERIAU.

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN, CONT_1D, INCO_UPG, INCO_UP.
  - Nombre de variables internes : 5
    - Signification : $V1$: déformation plastique cumulée, $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 pour élastique, nombre d'itérations internes pour plastique), $V3$: incrément de déformation anélastique, $V4$: incrément de temps, $V5$: vitesse de dissipation mécanique.

Exemple : voir test COMP002.

4.4.2.5 'VMIS_CINE_LINE'

Relation de comportement d'élasto-plasticité de VON MISES à écrouissage cinématique linéaire. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés ECRO_LINE(_FO) et ELAS(_FO) (confer [R5.03.02] pour plus de détails).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, INCO_UPG, INCO_UP, CONT_PLAN (méthode 'DE BORST'), CONT_1D, CONT_1D(PMF)
- Nombre de variables internes : 7

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

•Signification : $V1$ à $V6$: 6 composantes du tenseur d'écrouissage cinématique X, $V7$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 pour élastique, 1 pour plastique).
- Nombre de variables internes pour les modélisations BARRE, PMF : 2
- Exemple : voir test SSNP14.

•Pour les modélisations BARRE et PMF, le comportement est alors 1D : 2 variables internes suffisent : $V1$ représente l'unique composante du tenseur de rappel, et V2 l'indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) ; les 5 autres sont nulles.

4.4.2.6 ' VMIS_ECMI_TRAC '

Relation de comportement d'élasto-plasticité de VON MISES à écrouissage combiné, cinématique linéaire et isotrope non linéaire (Cf. [R5.03.16] pour plus de détails). L'écrouissage isotrope est donné par une courbe de traction (σ,ε) ou éventuellement par plusieurs courbes si celles-ci dépendent de la température. Les caractéristiques du matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés PRAGER(_FO) (pour l'écrouissage cinématique), TRACTION (pour l'écrouissage isotrope) et ELAS(_FO).

- Signification : $V1$ à $V6$: 6 composantes du tenseur d'écrouissage cinématique X, $V7$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 pour élastique, 1 pour plastique).
- Nombre de variables internes : 8
- Signification : $V1$: déformation plastique cumulée, V2 : indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 pour élastique, 1 pour plastique), $V3$ à $V8$: 6 composantes du tenseur d'écrouissage cinématique α.
- Exemple : voir test SSNP102.

4.4.2.7 ' VMIS_ECMI_LINE '

Relation de comportement d'élasto-plasticité de VON MISES à écrouissage combiné, cinématique linéaire et isotrope linéaire (confer [R5.03.16] pour plus de détails). Les caractéristiques du matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés PRAGER(_FO) (pour l'écrouissage cinématique), ECRO_LINE(_FO) (pour l'écrouissage isotrope) et ELAS(_FO).
- Modélisations supportées : 3D, 2D, INCO_UPG, INCO_UP, CONT_PLAN, CONT_1D (par DE BORST), CONT_1D(PMF).
- Nombre de variables internes : 8
- Signification : $V1$: déformation plastique cumulée, $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 pour élastique, 1 pour plastique), $V3$ à $V8$: 6 composantes du tenseur d'écrouissage cinématique α.
- Exemple : voir test SSNP102

4.4.2.8 ' VMIS_CIN1_CHAB '

Relation de comportement qui rend compte du comportement cyclique du matériau en élasto-plasticité avec un tenseur d'écrouissage cinématique non linéaire, un écrouissage isotrope non linéaire, un effet d'écrouissage sur la variable tensorielle de rappel. Toutes les constantes du matériau peuvent éventuellement dépendre de la température. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés CIN1_CHAB(_F0), ELAS(_FO) (confer [R5.03.04] pour plus de détails).
- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST), CONT_1D (par DE BORST).
- Nombre de variables internes : 8
- $V1$: déformation plastique cumulée, $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 pour élastique, nombre d'itérations internes pour plastique), $V3$ à $V8$: 6 composantes du tenseur d'écrouissage cinématique α.

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

4.4.2.9 ' VMIS_CIN2_CHAB '

Relation de comportement qui rend compte du comportement cyclique du matériau en élasto-plasticité avec 2 tenseurs d'écrouissage cinématique non linéaire, un écrouissage isotrope non linéaire, un effet d'écrouissage sur la variable tensorielle de rappel. Toutes les constantes du matériau peuvent éventuellement dépendre de la température. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés CIN2_CHAB(_F0), ELAS(_FO) (confer [R5.03.04] pour plus de détails).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST), CONT_1D (par DE BORST).
- Nombre de variables internes : 14
- Signification : $V1$: déformation plastique cumulée, $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 pour élastique, nombre d'itérations internes pour plastique), $V3$ à $V8$: 6 composantes du 1er tenseur de la variable cinématique α_1, $V9$ à $V14$: 6 composantes du 2ème tenseur de la variable cinématique α_2.
- Exemple : voir test SSNV101A

4.4.2.10 ' VMIS_CIN2_MEMO '

Relation de comportement élasto-plastique de J.L.Chaboche à 2 variables cinématiques qui rend compte du comportement cyclique en élasto-plasticité avec 2 tenseurs d'écrouissage cinématique non linéaire, un écrouissage isotrope non linéaire, un effet d'écrouissage sur les variables tensorielles de rappel et un effet de mémoire du plus grand écrouissage. Toutes les constantes du matériau peuvent éventuellement dépendre de la température. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés CIN2_CHAB(_F0), ELAS(_FO),MEMO_ECRO(_FO) (Cf. [R5.03.04] pour plus de détails).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST), CONT_1D (par DE BORST).
- Nombre de variables internes : 28
- Signification : $V1$: déformation plastique cumulée, $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 pour élastique, nombre d'itérations internes pour plastique), $V3$ à $V8$: 6 composantes du 1er tenseur de la variable cinématique α_1, $V9$ à $V14$: 6 composantes du 2ème tenseur de la variable cinématique α_2, $V15$: Fonction d'écrouissage $R(p)$, $V16$: variable relative à la mémoire d'écrouissage q, $V17$ à $V22$: 6 composantes du tenseur relatif à la mémoire d'écrouissage ξ, $V23$ à $V28$: 6 composantes du tenseur déformation plastique.
- Exemple : voir test SSND105, COMP002H

4.4.2.11 ' VMIS_CIN2_NRAD '

Relation de comportement élasto-plastique de Chaboche à 2 variables cinématiques qui rend compte du comportement cyclique en élasto-plasticité avec 2 tenseurs d'écrouissage cinématique non linéaire, un écrouissage isotrope non linéaire, un effet d'écrouissage sur les variables tensorielles de rappel, et un effet de non proportionnalité du chargement. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés CIN2_CHAB(_F0), ELAS(_FO), CIN2_NRAD (confer [R5.03.04] pour plus de détails).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST), CONT_1D (par DE BORST).
- Nombre de variables internes : 14
- Signification : $V1$: déformation plastique cumulée, $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 pour élastique, nombre d'itérations internes pour plastique), $V3$ à $V8$: 6 composantes du 1er tenseur de la variable cinématique α_1, $V9$ à $V14$: 6 composantes du 2ème tenseur de la variable cinématique α_2,
- Exemple : voir test SSND105D

4.4.2.12 ' VMIS_MEMO_NRAD '

Relation de comportement élastoplastique de Chaboche à 2 variables cinématiques qui rend compte du comportement cyclique en élasto-plasticité avec 2 tenseurs d'écrouissage cinématique non linéaire,

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

un écrouissage isotrope non linéaire, un effet d'écrouissage sur les variables tensorielles de rappel, et un effet de non proportionnalité du chargement et un effet de mémoire du plus grand écrouissage. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés CIN2_CHAB(_F0), ELAS(_FO),MEMO_ECRO(_FO), CIN2_NRAD (Cf. [R5.03.04] pour plus de détails).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST), CONT_1D (par DE BORST).
- Nombre de variables internes : 28
- Signification : $V1$: déformation plastique cumulée, $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 pour élastique, nombre d'itérations internes pour plastique), $V3$ à $V8$: 6 composantes du 1er tenseur de la variable cinématique α_1, $V9$ à $V14$: 6 composantes du 2ème tenseur de la variable cinématique α_2, $V15$: Fonction d'écrouissage $R(p)$, $V16$: variable relative à la mémoire d'écrouissage q, $V17$ à $V22$: 6 composantes du tenseur relatif à la mémoire d'écrouissage ξ, $V23$ à $V28$: 6 composantes du tenseur déformation plastique.
- Exemple : voir test SSND115

4.4.2.13 'DIS_CHOC'

Modèle isotherme de contact et choc avec frottement de Coulomb s'appuyant sur un élément discret à 1 ou 2 nœuds, traité par pénalisation. Les paramètres caractérisant le choc et le frottement sont fournis dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé DIS_CONTACT [R5.03.17].

- Modélisations supportées : 3D_DIS, 2D_DIS
- Nombre de variables internes : 8
  Les variables internes décrivent le comportement dans le plan tangentiel défini par les directions locales y et z, qui sont définies par rapport à la direction normale de choc x.
  - $V1$: déplacement suivant y_{local} (déplacement différentiel des nœuds si $SEG2$).
  - $V2$: déplacement suivant z_{local} (déplacement différentiel des nœuds si $SEG2$).
  - $V3$: vitesse suivant y_{local} (vitesse différentielle des nœuds si $SEG2$).
  - $V4$: vitesse suivant z_{local} (vitesse différentielle des nœuds si $SEG2$).
  - $V5$: force suivant y_{local}.
  - $V6$: force suivant z_{local}.
  - $V7$: si le seuil de frottement est atteint =1 sinon =0
  - $V8$: jeu entre les nœuds suivant x_{local}.

4.4.2.14 'DIS_CONTACT'

Modèle isotherme de contact et choc avec frottement de Coulomb s'appuyant sur un élément discret à 1 ou 2 nœuds. Le comportement DIS_CONTACT traduit le contact avec choc et frottement entre deux structures, via deux types de relations :

- la relation de contact unilatéral qui exprime la non inter-pénétrabilité entre les corps solides,
- la relation de frottement qui régit la variation des efforts tangentiels dans le contact. On retiendra pour les présents développements une relation simple : la loi de frottement de Coulomb.

Les paramètres caractérisant le choc et le frottement sont fournis dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé DIS_CONTACT [R5.03.17].

- Modélisations supportées : 3D_DIS.
- Nombre de variables internes : 9
  - $V1$: com posante de l'effort tangent suivant l'axe local y : F_{cy}
  - $V2$: composante de l'effort tangent suivant l'axe local z : F_{cz}
  - $V3$: déplacement dû au glissement dans le plan tangent suivant l'axe local y.
  - $V4$: déplacement dû au glissement dans le plan tangent suivant l'axe local z.
  - $V5$: vitesse suivant l'axe local x.
  - $V6$: vitesse suivant l'axe local y.
  - $V7$: vitesse suivant l'axe local z.
  - $V8$: gestion de l'interpénétration initiale du discret.
  - $V9$: gestion du contact initial.

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

4.4.2.15 'DIS_ECRO_TRAC'

Le comportement DIS_ECRO_TRAC est un comportement non linéaire, permettant de schématiser le comportement d'un dispositif uniaxial, suivant l'axe local x ou dans le plan tangent yz des éléments discrets à deux nœuds (maille SEG2) ou des éléments discrets à un nœud (maille POI1).

Le comportement non-linéaire est donné par une courbe $F = fonction(\Delta U)$:
- pour un SEG2, ΔU représente le déplacement relatif des deux nœuds dans le repère local de l'élément ;
- pour un POI1, ΔU représente le déplacement absolu du nœud dans le repère local de l'élément ;
- pour un SEG2 ou un POI1 , F représente l'effort exprimé dans le repère local de l'élément.

La seule donnée nécessaire est la fonction décrivant le comportement non-linéaire. Cette fonction doit respecter les critères suivants :
- c'est une fonction au sens de code_aster définie avec l'opérateur DEFI_FONCTION ;
- les interpolations sur les axes des abscisses et des ordonnées sont linéaires ;
- le nom de l'abscisse lors de la définition de la fonction est DX ou DTAN ;
- les prolongements à gauche et à droite de la fonction sont exclus ;
- la fonction doit être définie par au moins trois points dans le cas d'un écrouissage isotrope ou d'exactement trois points dans le cas d'un écrouissage cinématique ;
- le premier point est $(0.0, 0.0)$ et doit être fourni dans la définition de la fonction ;
- la fonction doit être strictement croissante ;
- la dérivée de la fonction doit être inférieure ou égale à sa dérivée au point $(0.0,0.0)$.

Le comportement DIS_ECRO_TRAC possède 17 variables internes :

	Nom de la variable	
V1	FORCEX	Force suivant l'axe local x de l'élément.
V2	FORCEY	Force suivant l'axe local y de l'élément.
V3	FORCEZ	Force suivant l'axe local z de l'élément.
V4	DEPLX	Déplacement suivant l'axe local x de l'élément.
V5	DEPLY	Déplacement suivant l'axe local y de l'élément.
V6	DEPLZ	Déplacement suivant l'axe local z de l'élément.
V7	DISSTHER	Dissipation.
V8	PCUM	Indicateur plastique.
V9	DEPLPX	Déplacement anélastique suivant l'axe local x de l'élément.
V10	DEPLPY	Déplacement anélastique suivant l'axe local y de l'élément.
V11	DEPLPZ	Déplacement anélastique suivant l'axe local z de l'élément.
V12	FORCXX	Écrouissage cinématique suivant l'axe local x de l'élément.
V13	FORCXY	Écrouissage cinématique suivant l'axe local y de l'élément.
V14	FORCXZ	Écrouissage cinématique suivant l'axe local z de l'élément.
V15	RAIDEX	Raideur tangente du discret suivant l'axe local x de l'élément.
V16	RAIDEY	Raideur tangente du discret suivant l'axe local y de l'élément.
V17	RAIDEZ	Raideur tangente du discret suivant l'axe local z de l'élément.

4.4.2.16 'ARME'

Relation de comportement élasto-plastique isotherme pour les armements de lignes. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé ARME [R5.03.17].
- Modélisations supportées : 3D_DIS
- Nombre de variables internes : 1
- Signification : $V1$: valeur maximale atteinte de la quantité en valeur absolue $(uy - ule)$ où uy est le déplacement dans la direction locale y de la maille SEG2 et ule le déplacement limite du domaine élastique.
- Exemple : voir test SSNL101.

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

4.4.2.17 'RELAX_ACIER'

Relation de comportement permettant de modéliser la relaxation des câbles de précontrainte, disponible pour les modélisations de type BARRE.
Pour tenir compte de l'influence de la température sur la relaxation, tous les coefficients de la loi peuvent être des fonctions de la température.
Les données nécessaires au matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé RELAX_ACIER [R5.03.9].

- Modélisations supportées : 1D
- Nombre de variables internes : 2
  - $V1$: la déformation anélastique cumulée : ε^{an} .
  - $V2$: mémorisation de la raideur tangente au comportement.
- Exemples : voir tests SSNL143[a,b,c].

4.4.2.18 'ASSE_CORN'

Relation de comportement élasto-plastique isotherme pour les assemblages boulonnés de cornières de pylônes. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé ASSE_CORN [R5.03.32].
- Modélisations supportées : 3D_DIS
- Nombre de variables internes : 7
- Exemple : voir test SSNL102.

4.4.2.19 'DIS_GOUJ2E_PLAS'

Modèle pour représenter le comportement local d'un filet de goujon d'assemblage fileté (élément discret). Le comportement est élastique partout sauf suivant l'axe local Y. Dans cette direction, il s'agit d'une loi d'élastoplasticité isotherme de VON-MISES à écrouissage isotrope non linéaire (voir [R5.03.17] pour plus de détails). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés TRACTION (pour la direction locale Y) et ELAS. La courbe renseignée dans TRACTION représente en réalité la courbe effort de cisaillement-saut de déplacement Y d'un calcul local d'un filet et ELAS définit la rigidité affectée au discret pour les autres directions (en fait X local)).

- Modélisations supportées : 2D_DIS_T
- Nombre de variables internes : 2
- Signification : $V1$: déplacement plastique cumulée, $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 si élastique, 1 si plastique).
- Exemple : voir test ZZZZ120

4.4.2.20 'DIS_GOUJ2E_ELAS'

Modèle pour représenter le comportement élastique local d'un filet de goujon d'assemblage fileté (élément discret). Le comportement est élastique partout (voir [R5.03.17] pour plus de détails). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé ELAS.

- Modélisations supportées : 2D_DIS_T
- Nombre de variables internes : 1
- Signification : $V1$: vide (donc vaut 0).

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

4.4.2.21 ' VMIS_ASYM_LINE'

Relation de comportement isotherme uni-axiale d'élasto-plasticité de VON-MISES à écrouissage isotrope avec des limites d'élasticité différentes en traction et compression. Ce modèle asymétrique d'éléments de barre permet de modéliser l'interaction entre une conduite ou un câble enterré et le sol. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé ECRO_ASYM_LINE (Cf. [R5.03.09] pour plus de détails).

- Modélisation supportée : BARRE
- Nombre de variables internes : 4
- Signification : $V1$: déformation plastique cumulée en traction, $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) en traction, $V3$: déformation plastique cumulée en compression, $V4$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) en compression.
- Exemple : voir test SSNL112.

4.4.2.22 ' DIS_ECRO_CINE '

Modèle à écrouissage cinématique non linéaire s'appuyant sur un élément discret à 1 ou 2 nœuds, défini indépendamment sur chaque degré de liberté (forces, moments), du type $F=K_e(U-U_{an})$. Les paramètres caractérisant la limite élastique F_y, le plateau ductile F_u, la constante d'écrouissage cinématique k_x et la puissance n définissant la partie curviligne de la courbe de traction, sont fournis dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé DIS_ECRO_CINE, voir aussi [R5.03.17] ; de plus, la raideur élastique K_e est donnée via la commande AFFE_CARA_ELEM [U4.42.01].

- Modélisations supportées : DIS_T, DIS_TR, 2D_DIS_T, 2D_DIS_TR.
- Nombre de variables internes : 3.
- Signification : $V1$: déplacement anélastique U_{an}, $V2$: variable d'écrouissage cinématique α, $V3$: énergie dissipée.
- Exemple : voir test SSND102 [V6.08.102].

4.4.2.23 ' DIS_BILI_ELAS'

Le comportement DIS_BILI_ELAS est utilisé pour modéliser un comportement élastique bilinéaire en translation. La loi de comportement a été conçue pour être utilisée avec tous les éléments discrets.
Le comportement est caractérisé par 2 pentes et par un effort qui défini la rupture de pente. Pour chaque degré de liberté considéré, le comportement du discret est soit élastique soit élastique-bilinéaire. Si dans une des directions le comportement bilinéaire n'est pas défini, le comportement dans cette direction est alors élastique et ce sont les valeurs données dans la commande AFFE_CARA_ELEM qui sont prises. La loi DIS_BILI_ELAS ne concerne que les degrés de translation, cela implique donc que le comportement est élastique pour les degrés de liberté de rotation qui existent pour ce discret. Pour chaque direction, les 3 caractéristiques (KDEB, KFIN, FPRE) sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé DIS_BILI_ELAS, voir aussi [R5.03.17] ; elles sont obligatoirement données dans le repère local de l'élément, il est donc nécessaire dans la commande AFFE_CARA_ELEM sous le mot clef facteur DISCRET de préciser REPERE='LOCAL'. Les grandeurs KDEB et KFIN sont des fonctions qui dépendent de la température et peuvent être définies sous forme de fonction, de nappe ou de formule. Le repère local est défini de façon classique dans la commande AFFE_CARA_ELEM sous le mot clef facteur ORIENTATION.
Il y a une variable interne par degré de liberté de translation. Elle peut prendre 3 valeurs :

- $V1=0$, le discret n'a jamais été sollicité dans cette direction.
- $V1=1$, on est dans le cas où $|F|\leq \mathrm{FPREC}$
- $V1=2$, on est dans le cas où $|F|>\mathrm{FPREC}$

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

4.4.2.24 'VMIS_CINE_GC'

Relation de comportement d'élasto-plasticité de Von Mises à écrouissage cinématique linéaire écrite en 1D, basée sur ECRO_LINE. Les caractéristiques du matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clef ECRO_LINE (pour l'écrouissage linéaire).

La modélisation supportée est 1D, le nombre de variables internes est 6 (confer [R5.03.02] « Intégration des relations de comportement élasto-plastique de Von Mises », pour plus de détails).

- $V1$: Critère limite en contrainte,
- $V2$: Critère limite en déformation,
- $V3$: Écrouissage cinématique,
- $V4$: Indicateur plastique,
- $V5$: dissipation non récupérable,
- $V6$: dissipation thermodynamique.

4.4.2.25 'DASHPOT'

Relation de comportement pour les éléments discrets DIS_T liant, à chaque instant de calcul t_i, la force nodale $F(t_i)$ à l'incrément de déplacement $\Delta_x(t_i)$ de la manière suivante : $F(t_i)=K\,\Delta_x(t_i)$ où K est un paramètre de raideur fourni par l'utilisateur via la commande AFFE_CARA_ELEM [U4.42.01] (CARA='K_T_D_L' ou 'K_T_D_N').

Cette loi n'a pas réellement de sens physique, elle est utilisée dans certains calculs complexes où on a besoin de limiter les mouvements de corps rigides tout en réduisant l'intensité de la force de rappel dans l'élément discret . L'idée étant de limiter le plus possible les effets non désirables dues à ces forces de rappel.

L es spécificités de la formulation Dashpot quasi-statique sont :
- A contrario des ressorts elastiques, le modèle ne pren d pas en compte l'histoire du chargement au début du pas de temps ;
- Le Dashpot s'adapte aux changements cinématique s brusques (sauts de déplacement); Si l'incrément de déplacement est grand, la force de rappel est grande par contre si ce dernier est petit, la force de rappel est petite ; ce qui a pour conséquence d'introduire un pilotage plus régulier en force que les ressorts ;
- Le modèle de Dashpot quasi-statique implémenté dans le code n'est pas sensible aux effets liés aux petits pas de temps ; En effet dans certains calculs, le pas de temps peut être suffisament petit s pour pénaliser les avantages initiaux du Dashpot ; Se ramener à l'incrément de déplacement plutôt que l'incrément de déplacement / le pas de temps reste la meilleure approche pour les problèmes quasi-statiques ;
- Dans les cas, où on a un seul pas de temps et qu'on est pas en mode reutilisation d'un calcul non linéaire précédent, le Dashpot se ramène à un ressort élastique.

- Modélisations supportées : DIS_T.
- Nombre de variables internes : 0.
- Exemple : voir test ssnd119a [V6.08.119].

4.4.3 Modèles élasto-viscoplastiques

Sauf indication contraire, tous les modèles peuvent inclure une dépendance par rapport à la température. Il est précisé pour chaque modèle si l'intégration est implicite ou semi-implicite.

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

4.4.3.1 ' VISC_ISOT_LINE'

Relation de comportement visco-élastoplastique en grandes déformations (formulation SIMO_MIEHE uniquement). Le modèle plastique est VMIS_ISOT_LINE c'est-à-dire à écrouissage isotrope linéaire. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01] sous les mots-clés ECRO_LINE(_FO), ELAS(_FO).
La loi de viscosité est une loi en sinus hyperbolique (confer [R5.03.21]. Les paramètres visqueux sont à renseigner sous le mot-clé VISC_SINH dans l'opérateur DEFI_MATERIAU.

- Modélisations supportées : 3D, 2D, INCO_UPG et INCO_UP
- Intégration : implicite
- Nombre de variables internes : 3
- Signification : $V1$: déformation plastique cumulée, $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 pour élastique, 1 pour plastique).
- Exemple : voir test SSNL129D

4.4.3.2 ' VISC_ISOT_TRAC '

Relation de comportement visco-élastoplastique en grandes déformations (formulation SIMO_MIEHE uniquement). Le modèle plastique est VMIS_ISOT_TRAC c'est-à-dire à écrouissage isotrope non linéaire. La courbe (σ,ε) en traction simple est fournie dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot-clé TRACTION (confer [R5.03.02] pour plus de détails). On peut éventuellement définir plusieurs courbes de traction suivant la température. On doit également renseigner le mot-clé ELAS(_FO) dans l'opérateur DEFI_MATERIAU.
La loi de viscosité est une loi en sinus hyperbolique (confer [R5.03.21]. Les paramètres visqueux sont à renseigner sous le mot-clé VISC_SINH dans l'opérateur DEFI_MATERIAU.

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_1D(PMF), INCO_UPG et INCO_UP
- Intégration : implicite
- Nombre de variables internes : 3
- Signification : $V1$: déformation plastique cumulée, $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 pour élastique, 1 pour plastique),
- Exemple : voir test SSNL129A

4.4.3.3 ' LEMAITRE '

Relation de comportement visco-plastique non linéaire de Lemaitre (sans seuil). Un cas particulier de cette relation (en annulant le paramètre UN_SUR_M) donne une relation de NORTON. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés LEMAITRE(_FO) et ELAS(_FO) (confer [R5.03.08] pour plus de détails). La correspondance des variables internes permet le chaînage avec un calcul utilisant un comportement élasto-plastique avec écrouissage isotrope ('VMIS_ISOT_LINE' ou 'VMIS_ISOT_TRAC '). L'intégration de ce modèle est réalisée par une méthode semi-implicite (PARM_THETA=0.5) ou implicite (PARM_THETA=1).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST), INCO_UPG, INCO_UP, CONT_1D (par DE BORST)
- Nombre de variables internes : 2
- Signification : $V1$: déformation plastique cumulée, $V2$: vide donc vaut toujours 0.
- Exemple : voir test SSNA104

4.4.3.4 ' NORTON '

Relation de comportement visco-plastique de Norton (sans seuil). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés LEMAITRE(_FO) et ELAS(_FO) (avec UN_SUR_M=0). L'intégration de ce modèle est réalisée par une theta-méthode avec ALGO_INTE='NEWTON_PERT' (PARM_THETA) ou par une méthode explicite (ALGO_INTE=RUNGE_KUTTA)

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

• Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST), INCO_UPG, INCO_UP, CONT_1D (par DE BORST)
• Nombre de variables internes : 7
• Signification : $V1$ à $V6$: 6 composantes de la déformation plastique, $V7$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 pour élastique, nombre d'itérations internes pour plastique).
• Exemple : voir tests SSNP02E, SSNP02D

4.4.3.5 ' DIS_VISC '

Le comportement DIS_VISC est un comportement rhéologique viscoélastique non linéaire, de type ZENER étendu, permettant de schématiser le comportement d'un amortisseur uniaxial, applicable au degré de liberté local dx des éléments discrets à deux nœuds (maille SEG2) ou et des éléments discrets à un nœud (maille POI1), dans le cas d'une liaison avec un bâti fixe non maillé (voir des exemples statiques et dynamiques dans le cas test SSND101). L'agencement des composants élastiques linéaires permet de prendre en compte une large gamme de situations d'environnement de la partie amortissante de l'appareil et de ses fixations.

La vitesse est estimée via l'incrément de déplacement (et pas par le schéma). Les paramètres caractérisant le modèle sont fournis dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé DIS_VISC, voir aussi [R5.03.17]. Les raideurs élastiques K_e, qui servent à la phase de prédiction de l'algorithme non linéaire, sont données via la commande AFFE_CARA_ELEM [U4.42.01].
- Modélisations supportées : DIS_T, DIS_TR, 2D_DIS_T, 2D_DIS_TR.
- Nombre de variables internes : 4.
  - $V1$: FORCE : contient l'effort σ à chaque instant dans le modèle rhéologique.
  - $V2$: UVISQ : déplacement visqueux de l'amortisseur ε_v
  - $V3$: UVISQ : contient l'énergie dissipée réactualisée à chaque instant : $V2=-\sum F.\Delta U$
  - $V4$: RAIDEUR : raideur tangente au comportement dF/dU
- Exemple : voir test SSND101 [V6.08.101].

4.4.3.6 ' VISC_CIN1_CHAB '

Relation de comportement de Chaboche (rend compte du comportement cyclique du matériau) en élasto-viscoplasticité avec un tenseur d'écrouissage cinématique non linéaire, un écrouissage isotrope non linéaire, un effet d'écrouissage sur la variable tensorielle de rappel et prise en compte de la viscosité. Toutes les constantes du matériau peuvent éventuellement dépendre de la température. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés CIN1_CHAB(_F0), ELAS(_FO) (voir [R5.03.04] pour plus de détails) et LEMAITRE pour la viscosité. L'intégration est totalement implicite.
- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST), INCO_UPG, INCO_UP, CONT_1D (par DE BORST)
- Nombre de variables internes : 8
- Signification : $V1$: déformation visco-plastique cumulée, $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 pour élastique, nombre d'itérations internes pour plastique), V3 à V8 : 6 composantes du tenseur d'écrouissage cinématique α.
- Exemple : voir test HSNV124

4.4.3.7 ' VISC_CIN2_CHAB '

Relation de comportement de Chaboche (rend compte du comportement cyclique du matériau) en élasto-viscoplasticité avec 2 tenseurs d'écrouissage cinématique non linéaire, un écrouissage isotrope non linéaire, un effet d'écrouissage sur la variable tensorielle de rappel et prise en compte de la viscosité. Toutes les constantes du matériau peuvent éventuellement dépendre de la température. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés CIN2_CHAB(_F0), ELAS(_FO) (voir [R5.03.04] pour plus de détails) et LEMAITRE pour la viscosité. L'intégration est totalement implicite.

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

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST]), INCO_UPG, INCO_UP, CONT_1D (par DE BORST)
- Nombre de variables internes : 14
- Signification : $V1$: déformation visco-plastique cumulée, $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 pour élastique, nombre d'itérations internes pour plastique), $V3$ à $V8$: 6 composantes du 1er tenseur de la variable cinématique α_1, $V9$ à $V14$: 6 composantes du 2ème tenseur de la variable cinématique α_2.
- Exemple : voir test HSNV124

4.4.3.8 ' VISC_CIN2_MEMO '

Relation de comportement élastoviscoplastique de Chaboche à 2 variables cinématiques qui rend compte du comportement cyclique en élasto-viscoplasticité avec 2 tenseurs d'écrouissage cinématique non linéaire, un écrouissage isotrope non linéaire, un effet d'écrouissage sur les variables tensorielles de rappel et une effet de mémoire du plus grand écrouissage. Toutes les constantes du matériau peuvent éventuellement dépendre de la température. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés CIN2_CHAB(_F0), ELAS(_FO),MEMO_ECRO(_FO), LEMAITRE pour la viscosité. L'intégration est totalement implicite. (voir [R5.03.04] pour plus de détails).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST), CONT_1D (par DE BORST).
- Nombre de variables internes : 28
- Signification : $V1$: déformation plastique cumulée, $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 pour élastique, nombre d'itérations internes pour plastique), $V3$ à $V8$: 6 composantes du 1er tenseur de la variable cinématique α_1, $V9$ à $V14$: 6 composantes du 2ème tenseur de la variable cinématique α_2, $V15$: Fonction d'écrouissage $R(p)$, $V16$: variable relative à la mémoire d'écrouissage q, $V17$ à $V22$: 6 composantes du tenseur relatif à la mémoire d'écrouissage ξ, $V23$ à $V28$: 6 composantes du tenseur déformation plastique.
- Exemple : voir test SSND105, COMP002H, SSNV118

4.4.3.9 ' VISC_CIN2_NRAD '

- Relation de comportement élastoviscoplastique de Chaboche à 2 variables cinématiques qui rend compte du comportement cyclique en élasto-viscoplasticité avec 2 tenseurs d'écrouissage cinématique non linéaire, un écrouissage isotrope non linéaire, un effet d'écrouissage sur les variables tensorielles de rappel, et un effet de non proportionnalité du chargement. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés CIN2_CHAB(_F0), ELAS(_FO), CIN2_NRAD (confer [R5.03.04] pour plus de détails).
- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST), CONT_1D (par DE BORST).
- Nombre de variables internes : 14
- Signification : $V1$: déformation plastique cumulée, $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 pour élastique, nombre d'itérations internes pour plastique), $V3$ à $V8$: 6 composantes du 1er tenseur de la variable cinématique α_1, $V9$ à $V14$: 6 composantes du 2ème tenseur de la variable cinématique α_2,
- Exemple : voir test SSND105D

4.4.3.10 ' VISC_MEMO_NRAD '

- Relation de comportement élastoplastique de Chaboche à 2 variables cinématiques qui rend compte du comportement cyclique en élasto-viscoplasticité avec 2 tenseurs d'écrouissage cinématique non linéaire, un écrouissage isotrope non linéaire, un effet d'écrouissage sur les variables tensorielles de rappel, et un effet de non proportionnalité du chargement et un effet de mémoire du plus grand écrouissage. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés CIN2_CHAB(_F0), ELAS(_FO),MEMO_ECRO(_FO), CIN2_NRAD (confer [R5.03.04] pour plus de détails).

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

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST), CONT_1D (par DE BORST).
- Nombre de variables internes : 28
- Signification : $V1$: déformation plastique cumulée, $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 pour élastique, nombre d'itérations internes pour plastique), $V3$ à $V8$: 6 composantes du 1er tenseur de la variable cinématique α_1, $V9$ à $V14$: 6 composantes du 2ème tenseur de la variable cinématique α_2, $V15$: Fonction d'écrouissage $R(p)$, $V16$: variable relative à la mémoire d'écrouissage q, $V17$ à $V22$: 6 composantes du tenseur relatif à la mémoire d'écrouissage ξ, $V23$ à $V28$: 6 composantes du tenseur déformation plastique.
- Exemple : voir test SSND115

4.4.3.11 ' VISCOCHAB '

Relation de comportement élastoviscoplastique de Chaboche à 2 variables cinématiques qui rend compte du comportement cyclique en élasto-plasticité avec 2 tenseurs d'écrouissage cinématique non linéaire, un écrouissage isotrope non linéaire, un effet d'écrouissage sur les variables tensorielles de rappel, un effet de mémoire du plus grand écrouissage, et de effets de restauration. Toutes les constantes du matériau peuvent éventuellement dépendre de la température. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés VISCOCHAB(_F0), ELAS(_FO). L'intégration est soit implicite, soit explicite (RUNGE_KUTTA) (Cf. [R5.03.12] pour plus de détails).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_1D (par DE BORST).
- Nombre de variables internes : 28
- Signification : $V1$ à $V12$: 12 composantes des 2 tenseurs cinématique X_1, X_2, $V13$: déformation plastique cumulée, $V14$: Fonction d'écrouissage $R(p)$, $V15$: variable relative à la mémoire d'écrouissage q, variable relative à la mémoire d'écrouissage q, $V16$ à $V21$: 6 composantes du tenseur relatif à la mémoire d'écrouissage ξ, $V22$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 pour élastique, 1 pour plastique), $V23$ à $V28$: 6 composantes du tenseur déformation plastique (uniquement dans le cas explicite).
- Exemple : voir test HSNV125D, COMP002I, SSNV118

4.4.3.12 'NORTON_HOFF'

Relation de comportement de viscosité indépendante de la température, à utiliser pour le calcul de charges limites de structures, à seuil de VON MISES. Le seul paramètre matériau est la limite d'élasticité à renseigner dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01] sous le mot-clé ECRO_LINE (confer [R7.07.01] et [R5.03.12] pour plus de détails). Pour le calcul de la charge limite, il existe un mot clé spécifique sous PILOTAGE pour ce modèle (voir mot clé PILOTAGE :'ANA_LIM' de STAT_NON_LINE [U4.51.03]). Il est fortement conseillé d'employer de la recherche linéaire (voir mot clé RECH_LINEAIRE de STAT_NON_LINE [U4.51.03]). En effet, le calcul de la charge limite requiert beaucoup d'itérations de recherche linéaire (de l'ordre de 50) et d'itérations de Newton (de l'ordre de 50).

- Modélisation supportée : INCO_UPG, INCO_UP
- Nombre de variables internes : 1
- Signification : $V1$: vide donc vaut 0.
- Exemple : voir test SSNV124

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

4.4.3.13 'VISC_TAHERI'

Relation de comportement (visco)-plastique modélisant la réponse de matériaux sous chargement plastique cyclique, et en particulier permettant de représenter les effets de rochet. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés TAHERI(_FO) pour la description de l'écrouissage, LEMAITRE(_FO) pour la viscosité et ELAS(_FO) (confer [R5.03.05] pour plus de détails). En l'absence de LEMAITRE, la loi est purement élasto-plastique.

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST), INCO_UPG, INCO_UP, CONT_1D (par DE BORST).
- Nombre de variables internes : 9
- Signification : $V1$: déformation plastique cumulée, $V2$: contrainte de pic, $V3$ à $V8$: 6 composantes du tenseur de déformations plastiques à la dernière décharge, $V9$: indicateur de charge/décharge (0 pour décharge élastique, 1 si charge plastique classique, 2 si charge plastique à deux surfaces, 3 si pseudo-décharge).
- Exemple : voir tests SSNV102 (sans viscosité) et SSNV170 (avec viscosité).

4.4.3.14 'MONOCRISTAL'

♦ **COMPOR = comp [compor]**

Ce modèle permet de décrire le comportement d'un monocristal dont les relations de comportement sont fournies via le concept compor, issu de DEFI_COMPOR.

Le nombre de variables internes est fonction des choix effectués dans DEFI_COMPOR :

Les six premières sont les 6 composantes de la déformation visco-plastique : $\boldsymbol{E}_{ij}^{vp}$:

$\boldsymbol{E}^{vp}=\sum_t \left(\Delta \boldsymbol{E}^{vp}\right)$ avec $\Delta \boldsymbol{E}^{vp}=\sum_s \mu_s \Delta\gamma_s$

$V_1=E_{xx}^{vp}$, $V_2=E_{yy}^{vp}$, $V_3=E_{zz}^{vp}$, $V_4=\sqrt{(2)}\,E_{xy}^{vp}$, $V_5=\sqrt{(2)}\,E_{xz}^{vp}$, $V_6=\sqrt{(2)}\,E_{yz}^{vp}$

V_7, V_8, V_9 sont les valeurs de α_1 γ_1 p_1 pour le système de glissement $s=1$

V_{10}, V_{11}, V_{12} correspondent au système $s=2$, et ainsi de suite,où :

- α_s représente la variable cinématique du système s dans le cas des modèles phénoménologiques, et la densité de dislocations dans un modèle issu de la DD ;
- γ_s représente le glissement plastique du système s
- p_1 représente le glissement plastique cumulé du système s

Prise en compte de l'irradiation :

- dans le cas DD_CC_IRRA, il faut ajouter $n_{irra}=12$ variables internes : V_{6+3n_s+1} à V_{6+3n_s+12} contiennent pour chaque système de glissement la densité de dislocations liée à l'irradiation ρ_s^{irr}
- dans le cas DD_CFC_IRRA, il faut ajouter $n_{irra}=24$ variables internes : V_{6+3n_s+1} à V_{6+3n_s+12} contiennent pour chaque système de glissement ρ_s^{loops} V_{6+3n_s+13} à V_{6+3n_s+24} contiennent pour chaque système de glissement ϕ_s^{voids}

On stocke ensuite les cissions pour chaque système de glissement : τ_1 , … τ_{n_s}

Dans le cas où on prend en compte la rotation du réseau cristallin, il faut ajouter $n_{rota}=16$ variables internes :

• V_{6+3n_s+1} à V_{6+3n_s+9} sont les 9 composantes de la matrice de rotation $\mathbf{Q}$,

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

- V_{6+3n_s+10} à V_{6+3n_s+12} sont les 3 composantes de $\Delta\omega^p$,
- V_{6+3n_s+13} à V_{6+3n_s+15} sont les 3 composantes de $\Delta\omega^e$,
- V_{6+3n_s+16} représente Θ

L'antépénultième variable interne est la contrainte de clivage : $\max_s(\Sigma.n):n$

L'avant dernière variable interne contient la déformation plastique cumulée globale, définie par :

$V_{p-1}=\sum\Delta E_{eq}^{vp}$ avec $\Delta E_{eq}^{vp}=\sqrt{\frac{2}{3}\left(\Delta\mathbf{E}^{vp}:\Delta\mathbf{E}^{vp}\right)}$

La dernière variable interne, Vp , ($p=6+3n_s+n_{rota}+3$, n_s étant le nombre total de systèmes de glissement) est un indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (seuil dépassé en au moins un système de glissement au pas de temps courant). S'il est nul, il n'y a pas eu d'accroissement de variables internes à l'instant courant. Sinon, il contient le nombre d'itérations de Newton local (pour une résolution implicite) qui ont été nécessaires pour obtenir la convergence.

Pour plus de précisions consulter [R5.03.11].

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST).
- Exemple : voir test SSNV194

4.4.3.15 'POLYCRISTAL'

♦ **COMPOR = comp [compor]**

Ce modèle permet de décrire le comportement d'un polycristal dont les relations de comportement sont fournies via le concept compor, issu de DEFI_COMPOR.

Le nombre de variables internes est $p=7+6m+\sum_{g=1,m}\left(3n_s(g)\right)+6m+1$, m étant le nombre de phases et $n_s(g)$ étant le nombre de systèmes de glissement de la phase g)

•Les six premières variables internes sont les composantes de la déformation viscoplastique macroscopique $\boldsymbol{E}^{vp}$:

$V_1=E_{xx}^{vp}$, $V_2=E_{yy}^{vp}$, $V_3=E_{zz}^{vp}$, $V_4=\sqrt{(2)}E_{xy}^{vp}$, $V_5=\sqrt{(2)}E_{xz}^{vp}$, $V_6=\sqrt{(2)}E_{yz}^{vp}$;

•la septième est la déformation viscoplastique équivalente cumulée macroscopique P :

$V_7=\sum\Delta E_{eq}^{vp}$ avec $\Delta E_{eq}^{vp}=\sqrt{\frac{2}{3}\left(\Delta\mathbf{E}^{vp}:\Delta\mathbf{E}^{vp}\right)}$;

•puis, pour chaque phase, on trouve les 6 composantes des déformations viscoplastiques ou du tenseur β de la phase : $\left\{\varepsilon_{xx}^{vp}(g),\varepsilon_{yy}^{vp}(g),\varepsilon_{zz}^{vp}(g),\sqrt{(2)}\varepsilon_{xy}^{vp}(g),\sqrt{(2)}\varepsilon_{xz}^{vp}(g),\sqrt{(2)}\varepsilon_{yz}^{vp}(g)\right\}_{g=1,m}$;

•ensuite, pour chaque phase :

◦pour chaque système de glissement de la phase, on trouve les valeurs de α_s γ_s p_s ;

◦dans le cas où le comportement prend en compte l'irradiation (actuellement MONO_DD_CC_IRRA), il faut ensuite ajouter 12 variables internes : les densités de dislocations dues à l'irradiation.

•puis, pour chaque phase, on trouve les 6 composantes des contraintes de la phase : $\left\{\sigma_{xx}(g),\sigma_{yy}(g),\sigma_{zz}(g),\sqrt{(2)}\sigma_{xy}(g),\sqrt{(2)}\sigma_{xz}(g),\sqrt{(2)}\sigma_{yz}(g)\right\}_{g=1,m}$;

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

•la dernière variable interne est un indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (seuil dépassé en au moins un système de glissement au pas de temps courant).

Pour plus de précisions consulter [R5.03.11].
- Modélisations supportées : 3D
- Exemple : voir test SSNV171

4.4.4 Comportements spécifiques aux crayons combustibles et métaux sous irradiation

4.4.4.1 'VISC_IRRA_LOG'

Loi de fluage axial sous irradiation des assemblages combustibles. Elle permet de modéliser le fluage primaire et secondaire, paramétré par la fluence neutronique (cf. [R5.03.09]) Les paramètres sont fournis dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés VISC_IRRA_LOG. Le champ de fluence est défini par le mot-clé AFFE_VARC de la commande AFFE_MATERIAU.
- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST), CONT_1D, CONT_1D(PMF).
- Nombre de variables internes : 2. $V1$: déformation visco-plastique équivalente cumulée, $V2$: mémorisation de l'historique d'irradiation (fluence).
- Exemple : voir test SSNV113

4.4.4.2 'GRAN_IRRA_LOG'

Relation de comportement de fluage et de grandissement sous irradiation pour les assemblages combustibles, similaire à la loi VISC_IRRA_LOG pour la déformation viscoplastique, et intégrant en plus une déformation de grandissement sous irradiation (cf. [R5.03.09]). Le champ de fluence est défini par le mot-clé AFFE_VARC de la commande AFFE_MATERIAU. Les caractéristiques du comportement sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot-clé GRAN_IRRA_LOG. Le grandissement ne se faisant que selon une direction, il est nécessaire dans les cas 3D et 2D de donner la direction du grandissement par l'opérande ANGL_REP du mot clé MASSIF de l'opérateur AFFE_CARA_ELEM.
- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST), CONT_1D, CONT_1D(PMF).
- Nombre de variables internes : 3. $V1$: déformation visco-plastique équivalente cumulée, $V2$: mémorisation de l'historique d'irradiation (fluence), $V3$: déformation de grandissement.
- Exemple : voir test SSNL128

4.4.4.3 'LEMAITRE_IRRA'

Relation de comportement de fluage et de grandissement sous irradiation pour les assemblages combustibles. Le champ de fluence est défini par le mot-clé AFFE_VARC de la commande AFFE_MATERIAU. Les caractéristiques du comportement sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot-clé LEMAITRE_IRRA. Le grandissement ne se faisant que selon une direction, il est nécessaire dans les cas 3D et 2D de donner la direction du grandissement par l'opérande ANGL_REP du mot clé MASSIF de l'opérateur AFFE_CARA_ELEM. Le schéma d'intégration est implicite ou semi-implicite, mais on conseille d'utiliser une intégration semi-implicite c'est-à-dire PARM_THETA= 0.5.

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST).
- Nombre de variables internes : 3. $V1$: déformation plastique cumulée, $V2$: nulle, $V3$: déformation de grandissement.
- Exemple : voir test SSNL121.

4.4.4.4 'LEMA_SEUIL'

Relation de comportement viscoplastique avec seuil sous irradiation pour les assemblages combustibles (cf. [R5.03.08]). Le champ de fluence est défini par le mot-clé AFFE_VARC de la

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

commande AFFE_MATERIAU . Les caractéristiques du grandissement sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot-clé LEMA_SEUIL . L'intégration du modèle est réalisée par une méthode semi-implicite ou implicite.

- Modélisations supportées : 3D , 2D , CONT_PLAN (par DE BORST), CONT_1D (par DE BORST).
- Nombre de variables internes : 2
- $V1$: déformation plastique cumulée,
- $V2$: représente le seuil actuel
- Exemple : voir test SSNA104

4.4.4.5 'IRRAD3M'

Relation de comportement élasto-plastique sous irradiation des aciers inoxydables 304 et 316, matériaux dont sont constitués les structures internes de cuve des réacteurs nucléaires. Le champ de fluence est défini par le mot-clé AFFE_VARC de la commande AFFE_MATERIAU. Le modèle prend en compte la plasticité, le fluage sous irradiation, le gonflement sous flux neutronique. Les caractéristiques sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot-clé IRRAD3M. L'intégration du modèle est réalisée par un schéma implicite en temps (cf. [R5.03.13]).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST)
- Nombre de variables internes : 5
  - $V1$: déformation plastique équivalente cumulée,
  - $V2$: seuil pour le fluage d'irradiation
  - $V3$: déformation plastique équivalente d'irradiation
  - $V4$: gonflement
  - $V5$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1)
- Exemple : voir test SSNA118

4.4.4.6 'DIS_GRICRA'

Le comportement DIS_GRICRA permet de modéliser les liaisons entre grilles et crayons des assemblages combustibles. Il s'appuie sur des éléments discrets à 2 nœuds, avec 6 ddl par nœud (translation+rotation). La loi de comportement sur chaque sous-système (glissement -frottement axial, rotation dans le plan, et rotation hors plan) est du type plasticité avec écrouissage positif dans les directions tangentielles au discret pour modéliser le glissement, et du type élastique unilatéral dans la direction du discret pour modéliser le contact. Les paramètres de DIS_GRICRA, caractérisant le contact et le frottement, sont directement des rigidités en rotation et des seuils en rotation (type angles critiques). Ces paramètres sont fournis dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé DIS_GRICRA .Contrairement aux autres discrets, on ne prend pas en compte les caractéristiques de rigidité de AFFE_CARA_ELEM. La matrice de rigidité du discret doit donc être prise nulle dans AFFE_CARA_ELEM. La rigidité est seulement issue des paramètres dans DEFI_MATERIAU.
Le contact unilatéral a lieu dans la direction X donnée par la maille SEG2 de l'élément discret, et le glissement a lieu dans la direction Y donnée par le mot clé ORIENTATION de AFFE_CARA_ELEM (confer [R5.03.17] pour plus de détails). La matrice tangente est symétrique.

- Modélisations supportées : DIS_TR
- Nombre de variables internes : 6
  - $V1$: déplacement plastique cumulée
  - $V2$: indicateur de contact/frottement (1 si glissement, 0 si non glissement)
  - $V3$: indicateur de décollement en rotation
  - $V4$: angle plastique (glissement)
  - $V5$: angle plastique cumulé
  - $V6$: mémorisation de l'historique d'irradiation (fluence)
- Exemple : voir test SSNL131

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

4.4.5 Modèles mécaniques avec effets des transformations métallurgiques

Les relations de comportement suivantes s'appliquent à un matériau qui subit des changements de phases métallurgiques (confer [R4.04.02] pour plus de détail). Les calculs mécaniques prenant en compte la métallurgie s'appuient sur un calcul d'évolution des phases métallurgiques (voir la commande CALC_META [U4.85.01]).

4.4.5.1 Lois en kit de type META_* sauf META_LEMA_ANI

On peut activer par le mot clé RELATION_KIT deux types de matériau, soit ACIER qui comporte au plus cinq phases métallurgiques différentes, soit ZIRC qui comporte au plus trois phases métallurgiques différentes.

De plus, le nom de la relation de comportement est de la forme META_x_yy_zzz, avec les possibilités suivantes

x	=	P	ou	V		
yy	=	IL	ou	INL	ou	CL
zzz	=	PT	ou	RE	ou	PT_RE

La signification des lettres définies ci-dessus est la suivante :

P	=	comportement plastique
V	=	comportement viscoplastique
IL	=	écrouissage isotrope linéaire
IN L	=	écrouissage isotrope non linéaire
CL	=	écrouissage cinématique linéaire
PT	=	plasticité de transformation
RE	=	restauration d'écrouissage d'origine métallurgique

Exemples :

```
COMPORTEMENT =  (RELATION       =  'META_P_INL'
                 RELATION_KIT   =  'ZIRC' )

COMPORTEMENT =  (  RELATION     =  'META_V_CL_PT_RE'
                RELATION_KIT =  'ACIER'   )
```

Voir aussi les tests : HSNV101, HSNV1202, HSNV103, HSNV104, HSNV105, HTNA100.

Remarque : *pour toutes les lois métallurgiques, les contraintes planes sont impossibles même avec la méthode* DE BORST *.*

Les données matériau nécessaires au calcul mécanique sont à définir pour chaque phase métallurgique en présence dans le matériau. Elles sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01] :

		Type de comportement	Mot-clés de DEFI_MATERIAU
P	=	comportement élastoplastique	ELAS_META(_FO) suivi d'un écrouissage…
V	=	comportement viscoplastique	META_VISC_FO et les données élastoplastiques
IL	=	écrouissage isotrope linéaire	ELAS_META(_FO) et META_ECRO_LINE
INL	=	écrouissage isotrope non linéaire	ELAS_META(_FO) et META_TRACTION (*)
CL	=	écrouissage cinématique linéaire	ELAS_META(_FO) et META_ECRO_LINE
PT	=	plasticité de transformation	META_PT
RE	=	restauration d'écrouissage d'origine métallurgique	META_RE

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

Remarque : Attention, sous META_TRACTION , il faut renseigner non pas la courbe contrainte – déformation mais la courbe écrouissage isotrope en fonction de la déformation plastique cumulée

Nombre de variables internes et significations

On regroupe ici les renseignements sur les variables internes car leur nombre varie en fonction du type d'écrouissage (isotrope ou cinématique), du type de matériau (ACIER ou ZIRC) et du type de déformations (PETIT, PETIT_REAC, GROT_GDEP ou SIMO_MIEHE).

Les phases de l'acier sont les suivantes :

Phase	Type	Nom
Ferrrite	Froide	FERRITE
Perlite	Froide	PERLITE
Bainite	Froide	BAINITE
Martensite	Froide	MARTENSITE
Austénite	Chaude	AUSTENITE

Les phases du zircaloy sont les suivantes :

Phase	Type	Nom
Alpha	Froide	ZIRCALPH
Alpha+Bêta	Froide	ZIRCALBE
Bêta	Chaude	ZIRCBETA

Les variables internes dépendent du type de déformation et du type d'écrouissage :

Déformation	Écrouissage isotrope		Écrouissage cinématique	
	ACIER	ZIRC	ACIER	ZIRC
PETIT, PETIT_REAC et GROT_GDEP	$V1$ à $V5$: variables liées à l'écrouissage isotrope pour les 5 phases	$V1$ à $V3$: variables liées à l'écrouissage isotrope pour les 3 phases	$V1$ à $V30$: variables liées à l'écrouissage cinématique α pour les 5 phases	$V1$ à $V18$: variables liées à l'écrouissage cinématique α pour les 3 phases
	$V6$: écrouissage isotrope moyen	$V4$: écrouissage isotrope moyen	$V31$ à $V36$: écrouissage cinématique moyen X	$V19$ à $V24$: écrouissage cinématique moyen X
	$V7$: indicateur de plasticité (0 si élastique, 1 si plastique)	$V5$: indicateur de plasticité (0 si élastique, 1 si plastique)	$V37$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 si élastique, 1 si plastique)	$V25$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 si élastique, 1 si plastique)
SIMO_MIEHE	$V8$: trace des déformations élastiques divisée par 3 utilisée en grandes déformations	$V6$: trace des déformations élastiques divisée par 3 utilisée en grandes déformations	N'existe pas	N'existe pas

La première ligne du tableau donne les variables internes classiques de la plasticité (voir §4.4.2), par phase. Elles sont donc nommées également par phase. Par exemple, pour un écrouissage isotrope

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

d'un alliage d'acier, on a : FERRITE#EPSPEQ, PERLITE#EPSPEQ, BAINITE#EPSPEQ, MARTENSITE#EPSPEQ et AUSTENITE#EPSPEQ.
Les lignes suivantes sont des quantités *globales*. Par exemple, on applique la loi des mélanges sur les variables internes par phase.

4.4.5.2 Loi META_LEMA_ANI

META_LEMA_ANI est une loi de comportement viscoplastique anisotrope prenant en compte la métallurgie, pour le Zirconium uniquement [R4.04.04] et [R4.04.05] (et les tests HSNV134 et HSNV135).
Les caractéristiques sont :

- prise en compte des trois phases métallurgiques du Zircaloy.
- viscosité de type Lemaitre, sans seuil
- anisotropie avec critère de Hill

Les modélisations supportées sont : 3D, 2D, INCO.

Les coefficients matériau sont définis dans l'opérateur DEFI_MATERIAU sous 'META_LEMA_ANI'.

Les variables internes du modèle META_LEMA_ANI sont :
$V1 \rightarrow VN$: N composantes du tenseur symétriques des déformations élastiques
$VN+1$: p : déformation visqueuse cumulée
$VN+2$: Zb : proportion de phase bêta
$VN+3$: epsther : déformation thermique
$VN+4$: seq : contrainte équivalente de Hill
$VN+5,+6,+7$: sv1, sv2, sv3 : contrainte visqueuse respectivement des phases α pure, $\alpha\beta$ et β
$VN+8$: pch : indicateur de changement de phase (0 ou 1)
$VN+9$: tdeq instant auquel la température vaut TDEQ (voir [R4.04.04]) (initialisé à 0 en début de calcul)
$VN+10$: tfeq instant auquel la température vaut TFEQ (voir [R4.04.04]) (initialisé à 0 en début de calcul)

4.4.5.3 Loi MetaAcierEPIL_PT

La loi MetaAcierEPIL_PT est une loi spécifique aux alliages de type ACIER (cinq phases métallurgiques) qui subissent des changements de phases métallurgiques. Cette loi est caractérisée par un écrouissage isotrope linéaire et permet de prendre en compte la plasticité de transformation.

L'ensemble des paramètres matériaux sont renseignés dans le mot clé facteur MetaAcierEPIL_PT (_FO) de la commande DEFI_MATERIAU .

Les variables internes dépendent du type de modélisation, 2D ou 3D :

Type de modélisation	
2D	3D
$V1$ à $V4$: composantes du tenseur des déformations élastiques	$V1$ à $V6$: composantes du tenseur des déformations élastiques
$V5$ à $V9$: variables liées à l'écrouissage isotrope pour les 5 phases	$V7$ à $V11$: variables liées à l'écrouissage isotrope pour les 5 phases
$V10$: écrouissage isotrope moyen	$V12$: écrouissage isotrope moyen

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

$V11$: indicateur de plasticité (0 si élastique, 1 si plastique)	$V13$: indicateur de plasticité (0 si élastique, 1 si plastique)

Les modélisations supportées sont 3D, AXIS et D_PLAN. Ces modélisations peuvent êtres employées avec les mots clés DEFORMATION = 'PETIT', 'PETIT_REAC' ou 'GROT_GDEP'.

La mise en œuvre de la loi MetaAcierEPIL_PT est illustrée dans le cas test mfron06.

4.4.6 Modèles locaux et non locaux d'endommagement

4.4.6.1 'ROUSSELIER', 'ROUSS_PR', 'ROUSS_VISC'

Remarque :

Les trois modèles suivants 'ROUSSELIER' (modèle élastoplastique), 'ROUSS_PR' (modèle élastoplastique) et 'ROUSS_VISC' (modèle élastoviscoplastique) sont trois versions différentes du modèle de Rousselier. Ce modèle est une relation de comportement élasto(visco)plastique qui permet de rendre compte de la croissance des cavités et de décrire la rupture ductile dans les aciers. En dehors du coté plastique/visqueux, la différence essentielle réside dans la manière dont sont traitées les grandes déformations. Pour le modèle 'ROUSSELIER' il s'agit d'une formulation type Simo_Miehe (DEFORMATION :'SIMO_MIEHE') et pour les deux autres d'une formulation type 'PETIT_REAC' (DEFORMATION :'PETIT_REAC'). Sur différents exemples traités en plasticité, on a constaté que le modèle 'ROUSS_PR' a besoin de beaucoup plus d'itérations de Newton pour converger par rapport au modèle 'ROUSSELIER' .
Il faut noter également que ces trois modèles traitent de manière différente le matériau rompu. Dans les modèles 'ROUSS_PR' et 'ROUSS_VISC' , lorsque la porosité atteint une porosité limite, on considère le matériau rompu. Le comportement est alors remplacé par une chute imposée des contraintes. Pour activer cette modélisation du matériau rompu, il faut alors renseigner dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé ROUSSELIER(_FO) , les deux coefficients 'PORO_LIMI' et 'D_SIGM_EPSI_NORM' . Pour 'ROUSSELIER' , on ne fait rien de particulier car la contrainte tend naturellement vers zéro lorsque la porosité tend vers un. Les deux paramètres précédents peuvent être renseignés mais n'ont pas d'impact sur le modèle.

'ROUSSELIER'

Relation de comportement élasto-plastique. Elle permet de rendre compte de la croissance des cavités et de décrire la rupture ductile. Ce modèle s'emploie exclusivement avec le mot clé DEFORMATION = 'SIMO_MIEHE'). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés ROUSSELIER(_FO) et ELAS(_FO) (Cf. [R5.03.06] pour plus de détails). Pour faciliter l'intégration de ce modèle, il est conseillé d'utiliser systématiquement le redécoupage global du pas de temps (voir STAT_NON_LINE [U4.51.03], mot clé INCREMENT). Ce modèle n'est pas développé en contrainte plane. De plus, avec le mot clé SIMO_MIEHE, on ne peut pas utiliser les contraintes planes par la méthode DE BORST.

Modélisations locales supportées : 3D, 2D, INCO_UPG (si DEFORMATION='PETIT' ou 'SIMO_MIEHE')
- Nombre de variables internes : 9
- Signification : $V1$: déformation plastique cumulée, $V2$: valeur de la porosité, $V3$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 si élastique, 1 si plastique avec solution régulière, 2 si plastique avec solution singulière). $V4$ à $V9$: 6 composantes d'un tenseur eulérien en grandes déformations de déformations élastiques,
- Exemple : voir test SSNV147.

Modélisation non locale supportée : utiliser les modélisations INCO avec longueur interne

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

- Nombre de variables internes : 12
- Signification :
  - $V1$: déformation plastique cumulée,
  - $V2$ à $V4$: gradient de la déformation plastique cumulée suivant les axes x, y, z, respectivement,
  - V5 : porosité,
  - $V6$ à $V11$: déformations élastiques utilisées pour SIMO_MIEHE,
  - $V12$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) (0 si élastique, 1 si plastique et solution régulière, 2 si plastique et solution singulière).
- Exemple : voir test SSNP122

'ROUSS_PR'

Relation de comportement élasto-plastique. Elle permet de rendre compte de la croissance des cavités et de décrire la rupture ductile. Ce modèle s'emploie exclusivement avec les mots clés DEFORMATION :'PETIT_REAC' ou 'PETIT', (utiliser de préférence la modélisation 'PETIT_REAC' car c'est un modèle grandes déformations). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés ROUSSELIER(_FO) et ELAS(_FO) (Cf. [R5.03.06] pour plus de détails). On peut également prendre en compte la nucléation des cavités. Il faut alors renseigner le paramètre AN (mot clé non activé pour le modèle ROUSSELIER et ROUSS_VISC) sous ROUSSELIER(_FO) Pour faciliter l'intégration de ce modèle, il est conseillé d'utiliser le redécoupage automatique local du pas de temps (mot clé ITER_INTE_PAS).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST), INCO_UPG, INCO_UP.
- Nombre de variables internes : 5
- Signification : $V1$: déformation plastique cumulée, $V2$: valeur de la porosité, $V3$: indicateur de dissipation, $V4$ = énergie stockée, $V5$ = indicateur de plasticité (cf. Remarque 1)
- Exemple : test SSNV103

'ROUSS_VISC'

Relation de comportement élasto-visco-plastique. Elle permet de rendre compte de la croissance des cavités et de décrire la rupture ductile. Ce modèle s'emploie exclusivement avec les mots clés DEFORMATION ='PETIT_REAC' ou 'PETIT', (prendre la modélisation 'PETIT_REAC' car c'est un modèle grandes déformations). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés VISC_SINH, ROUSSELIER(_FO) et ELAS(_FO) (Cf. [R5.03.06] pour plus de détails). Pour faciliter l'intégration de ce modèle, il est conseillé d'utiliser le redécoupage automatique local du pas de temps, mot clé ITER_INTE_PAS). Pour l'intégration de cette loi, une θ-méthode est disponible et on conseille d'utiliser une intégration semi-implicite c'est-à-dire : PARM_THETA = 0.5

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST), INCO.
- Nombre de variables internes : 5
- Signification : $V1$: déformation plastique cumulée, $V2$: valeur de la porosité, $V3$: indicateur de dissipation, $V4$ = énergie stockée, $V5$ = indicateur de plasticité (cf. Remarque 1)
- Exemple : test SSNP117.

4.4.6.2 'GTN'

La loi de comportement intitulée 'GTN', du nom de ses auteurs Gurson, Tvergaard et Needleman, est un modèle élasto-visco-plastique qui rend compte de l'endommagement ductile des métaux en décrivant les phases de germination, de croissance et de coalescence de cavités.

Par nature, ce modèle s'appuie sur une cinématique de grandes déformations, restreinte à 'GDEF_LOG'.

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

Outre la version locale du modèle, une formulation à gradient de déformation plastique cumulée (modélisation '*_GRAD_VARI') est également disponible pour contrôler la localisation des déformations, inhérente aux modèles d'endommagement. Enfin, des déformations plastiques isochores sont généralement observées sur une grande plage du chargement ; les problèmes d'incompressibilité qui en résultent peuvent requérir l'emploi d'éléments finis mixtes déplacements – pression – gonflement (modélisations '*_INCO_UPG' en local ou '*_GRAD_INCO' en non local).

Les données qui caractérisent le matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés ELAS, ECRO_NL, GTN, VISC_SINH_REG et NON_LOCAL. Ce modèle n'est pas développé en contraintes planes, ces dernières n'étant pas compatibles sur le plan théorique avec les gradients prononcés qui résultent de la localisation des déformations.

Les variables internes sont au nombre de 9, auxquelles se rajoutent l'archivage des contraintes **T** propres à 'GDEF_LOG' . Leur signification est la suivante :
- $V1$: déformation plastique cumulée
- $V2$: porosité
- $V3$: indicateur de plasticité (0 = élastique, 1 = plastique régulier, 2 = régime de pointe)
- $V4$ à $V9$: composantes de la déformation plastique

On pourra se reporter aux cas-tests SSN V250 à SSNV257 pour des exemples d'utilisation.

4.4.6.3 'HAYHURST'

Modèle élasto-viscoplastique de Hayhurst, pour décrire le comportement des aciers austénitiques, avec un endommagement scalaire en sinus hyperbolique, fonction de la contrainte principale maximale ou de la trace des contraintes, un écrouissage isotrope et une loi visqueuse en sinus hyperbolique.
Ce modèle s'emploie avec les mots clés DEFORMATION = PETIT ou PETIT_REAC. ou GDEF_LOG.
Les données nécessaires sont définies dans DEFI_MATERIAU sous les mots clés HAYHURST et ELAS.

- Modélisations supportées : 3D, 2D, INCO_UPG, INCO_UP.
- Nombre de variables internes : 12
- Signification : $V1$ à $V6$: 6 composantes de la déformation viscoplastique, $V7$: déformation plastique cumulée, $V8$ et $V9$: variables d'écrouissage H_1 et H_2, $V10$: variable ϕ, $V11$: endommagement, $V12$: indicateur.
- Exemple : test SSNV222

4.4.6.4 'VENDOCHAB'

Modèle viscoplastique couplé à l'endommagement isotrope de Lemaitre-Chaboche [R5.03.15]. Ce modèle s'emploie avec les mots clés DEFORMATION = PETIT ou PETIT_REAC. Les données nécessaires sont définies dans DEFI_MATERIAU sous les mots clés VENDOCHAB (_FO), LEMAITRE (_FO) et ELAS (_FO).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, INCO_UPG, INCO_UP.
- Nombre de variables internes : 9
- Signification : $V1$ à $V6$: déformation viscoplastique, $V7$: déformation plastique cumulée, $V8$: écrouissage isotrope, $V9$: endommagement.
- Exemple : test SSNV183

4.4.6.5 'VISC_ENDO_LEMA'

Modèle viscoplastique couplé à l'endommagement isotrope de Lemaitre-Chaboche , correspondant à une version simplifiée du modèle VENDOCHAB dans le cas où les coefficients ALPHA_D et BETA_D

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

sont nuls et K_D = R_D. cf. [R5.03.15]. Ce modèle s'emploie avec les mots clés DEFORMATION = PETIT ou PETIT_REAC. Les données nécessaires sont définies dans DEFI_MATERIAU sous les mots clés VISC_ENDO(_FO), LEMAITRE(_FO) et ELAS (_FO).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, INCO_UPG, INCO_UP.
- Nombre de variables internes : 9
- Signification : $V1$ à $V6$: déformation viscoplastique, $V7$: déformation plastique cumulée, $V8$: écrouissage isotrope, $V9$: endommagement.
- Exemple : test SSND108

4.4.6.6 'CZM_EXP_REG'

Relation de comportement cohésive (Cohesive Zone Model EXPonentielle REGularisée) (Cf. [R7.02.11] pour plus de détail) modélisant l'ouverture d'une fissure. Cette loi est utilisable avec l'élément fini linéaire de type joint (Cf. [R3.06.09] pour plus de détail) ou avec sa version THM (cf. [R7.02.15]) et permet d'introduire une force de cohésion entre les lèvres de la fissure. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé RUPT_FRAG. L'utilisation de ce modèle requiert souvent la présence du pilotage par PRED_ELAS (cf. [U4.51.03]).

- Modélisation supportée : PLAN_JOINT, AXIS_JOINT, 3D_JOINT, AXIS_JHMS, PLAN_JHMS.
- Nombre de variables internes : 9
- Signification : $V1$: seuil correspondant au plus grand saut de déplacement (en norme) jamais atteint, $V2$: indicateur de dissipation (0 : non, 1 : oui), $V3$ indicateur d'endommagement (0 : sain, 1 : endommagé), $V4$: indicateur du pourcentage d'énergie dissipée, $V5$: valeur de l'énergie dissipée, $V7$ à $V9$: valeurs du saut, (V9=0 en 2D)
- Exemple : voir test SSNP118, SSNP133, SSNV199

4.4.6.7 'CZM_LIN_REG'

Relation de comportement cohésive (Cohesive Zone Model LINéaire REGularisée) (Cf. [R7.02.11] pour plus de détail) modélisant l'ouverture d'une fissure. L'intérêt d'une telle loi, comparée à CZM_EXP_REG, est de pouvoir représenter un vrai front de rupture. Ce dernier est visible grâce à la variable interne $V3$ ($V3=2$ correspond à un élément totalement cassé). Cette loi est utilisable avec l'élément fini linéaire de type joint (Cf. [R3.06.09] pour plus de détail) ou avec sa version THM (cf. [R7.02.15]) et permet d'introduire une force de cohésion entre les lèvres de la fissure. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé RUPT_FRAG. L'utilisation de ce modèle requiert souvent la présence du pilotage par PRED_ELAS (voir [U4.51.03]).

- Modélisation supportée : PLAN_JOINT, AXIS_JOINT, 3D_JOINT, AXIS_JHMS, PLAN_JHMS.
- Nombre de variables internes : 9
- Signification : $V1$: seuil correspondant au plus grand saut de déplacement (en norme) jamais atteint, $V2$: indicateur de dissipation (0 : non, 1 : oui), V3 indicateur d'endommagement (0 : sain, 1 : endommagé, 2 : rompu), $V4$: indicateur du pourcentage d'énergie dissipée, $V5$: valeur de l'énergie dissipée, $V7$ à $V9$: valeurs du saut, (V9=0 en 2D)
- Exemple : voir test SSNP118, SSNV199

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

4.4.6.8 'CZM_EXP'

Relation de comportement cohésive (Cohesive Zone Model EXPonentielle) (voir [R7.02.12] pour plus de détail) modélisant l'ouverture d'une fissure. Cette loi est utilisable avec l'élément fini à discontinuité interne (voir [R7.02.12] pour plus de détail) et permet d'introduire une force de cohésion entre les lèvres de la fissure. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé RUPT_FRAG. L'utilisation de ce modèle requiert la présence du pilotage par PRED_ELAS (cf. [U4.51.03]).

•Modélisation supportée : PLAN_ELDI, AXIS_ELDI.
•Nombre de variables internes : 7
•Signification : $V1$: saut normal, $V2$: saut tangentiel, $V3$: variable seuil, $V4$: indicateur de fissuration (0 pour régime linéaire, 1 pour régime adoucissant), $V5$: indicateur du pourcentage d'énergie dissipée, $V6$: contrainte normale, $V7$: contrainte tangentielle.
•Exemple : voir test SSNP118.

4.4.6.9 'CZM_OUV_MIX'

•
• Relation de comportement cohésive (Cohesive Zone Model OUVerture MIXte) (Cf. [R7.02.11]) modélisant l'ouverture et la propagation d'une fissure. Cette loi est utilisable avec l'élément fini d'interface basé sur une formulation mixte lagrangien augmenté (voir [R3.06.13]) et permet d'introduire une force de cohésion entre les lèvres de la fissure en mode d'ouverture uniquement. Cette loi est utilisée lorsqu'on impose des conditions de symétrie sur l'élément d'interface. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé RUPT_FRAG. L'utilisation de ce modèle requiert la présence du pilotage par PRED_ELAS (cf. [U4.51.03]).
•
• Modélisation supportée : toutes les modélisations de type INTERFACE (cf. U3.13.14).
• Nombre de variables internes : 9
$V1$: seuil en saut (plus grande norme atteinte),
$V2$: indicateur du régime de la loi = -1 : Contact, 0 : Adhérence initiale ou courante, 1 : Endommagement, 2 : Rupture, 3 : Retour à zéro à contrainte nulle.
$V3$: indicateur d'endommagement 0 si matériau sain, 1 si matériau endommagé, 2 si matériau rompu.
$V4$: pourcentage d'énergie dissipée,
$V5$: valeur de l'énergie dissipée,
$V6$: valeur de l'énergie résiduelle courante : nulle pour cette lois (valable pour CZM_xxx_REG).
$V7$: saut normal, $V8$: saut tangentiel, $V9$: saut tangentiel (nul en 2D).
Exemples : voir tests SSNP118 et SSNV199.

4.4.6.10 'CZM_EXP_MIX'

Relation de comportement cohésive (Cohesive Zone Model EXPonentielle MIXte) (Cf. [R7.02.11]) modélisant l'ouverture et la propagation d'une fissure. Cette loi est utilisable avec l'élément fini d'interface basé sur une formulation mixte lagrangien augmenté (voir [R3.06.13]) et permet d'introduire une force de cohésion entre les lèvres de la fissure en mode d'ouverture selon une forme exponentielle. Elle convient lors de la modélisation de matériau quasi-fragile comme le béton. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé RUPT_FRAG. L'utilisation de ce modèle peut parfois nécessiter d'utiliser les techniques de pilotage par PRED_ELAS pour faciliter la convergence (cf. [U4.51.03]).

• Modélisation supportée : toutes les modélisations de type INTERFACE (cf. U3.13.14).
• Nombre de variables internes : 9

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

$V1$: seuil en saut (plus grande norme atteinte),
$V2$: indicateur du régime de la loi = -1 : Contact, 0 : Adhérence initiale ou courante, 1 : Endommagement, 2 : Rupture, 3 : Retour à zéro à contrainte nulle.
$V3$: indicateur d'endommagement 0 si matériau sain, 1 si matériau endommagé, 2 si matériau rompu.
$V4$: pourcentage d'énergie dissipée,
$V5$: valeur de l'énergie dissipée,
$V6$: valeur de l'énergie résiduelle courante : nulle pour cette lois (valable pour CZM_xxx_REG).
$V7$: saut normal, $V8$: saut tangentiel, $V9$: saut tangentiel (nul en 2D).

- Exemples : voir tests SSNP118 et SSNP166.

4.4.6.11 'CZM_EXP_MIX'

Relation de comportement cohésive (Cohesive Zone Model EXPonentielle MIXte) (Cf. [R7.02.11]) modélisant l'ouverture et la propagation d'une fissure. Cette loi est utilisable avec l'élément fini d'interface basé sur une formulation mixte lagrangien augmenté (voir [R3.06.13]) et permet d'introduire une force de cohésion entre les lèvres de la fissure en mode d'ouverture selon une forme exponentielle. Elle convient lors de la modélisation de matériau quasi-fragile comme le béton. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé RUPT_FRAG. L'utilisation de ce modèle peut parfois nécessiter d'utiliser les techniques de pilotage par PRED_ELAS pour faciliter la convergence (cf. [U4.51.03]).

- Modélisation supportée : toutes les modélisations de type INTERFACE (cf. U3.13.14).
- Nombre de variables internes : 9
  $V1$: seuil en saut (plus grande norme atteinte),
  $V2$: indicateur du régime de la loi = -1 : Contact, 0 : Adhérence initiale ou courante, 1 : Endommagement, 2 : Rupture, 3 : Retour à zéro à contrainte nulle.
  $V3$: indicateur d'endommagement 0 si matériau sain, 1 si matériau endommagé, 2 si matériau rompu.
  $V4$: pourcentage d'énergie dissipée,
  $V5$: valeur de l'énergie dissipée,
  $V6$: valeur de l'énergie résiduelle courante : nulle pour cette lois (valable pour CZM_xxx_REG).
  $V7$: saut normal, $V8$: saut tangentiel, $V9$: saut tangentiel (nul en 2D).
- Exemples : voir tests SSNP118 et SSNP166.

4.4.6.12 'CZM_TAC_MIX'

Relation de comportement cohésive (Cohesive Zone Model TAlon-Curnier MIXte) (voir [R7.02.11]) modélisant l'ouverture et la propagation d'une fissure. Cette loi est utilisable avec l'élément fini d'interface basé sur une formulation mixte lagrangien augmenté (voir [R3.06.13]) et permet d'introduire une force de cohésion entre les lèvres de la fissure dans les trois modes de rupture avec une irréversibilité de type Talon-Curnier. Attention, cette loi ne peut être utilisée lorsqu'on impose des conditions de symétrie sur l'élément d'interface. Dans ce cas de figure il faut utiliser CZM_OUV_MIX.
Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé RUPT_FRAG. L'utilisation de ce modèle requiert la présence du pilotage par PRED_ELAS (cf. [U4.51.03]).

- Modélisation supportée : toutes les modélisations de type INTERFACE (cf. U3.13.14).
- Nombre de variables internes : 9
  $V1$: seuil en saut (plus grande norme atteinte),
  $V2$: indicateur du régime de la loi = -1 : Contact (uniquement pour CZM_OUV_MIX), 0 : Adhérence initiale ou courante, 1 : Endommagement, 2 : Rupture, 3 : Retour à zéro à contrainte nulle.

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

$V3$: indicateur d'endommagement 0 si matériau sain, 1 si matériau endommagé, 2 si matériau rompu.
$V4$: pourcentage d'énergie dissipée,
$V5$: valeur de l'énergie dissipée,
$V6$: valeur de l'énergie résiduelle courante : nulle pour cette lois (valable pour CZM_xxx_REG).
$V7$: saut normal, $V8$: saut tangentiel, $V9$: saut tangentiel (nul en 2D).

- Exemples : voir tests SSNP118, SSNA115, SSNV199.

4.4.6.13 'CZM_TRA_MIX'

Relation de comportement cohésive (Cohesive Zone Model TRApèze MIXte) (voir [R7.02.11]) modélisant l'ouverture et la propagation d'une fissure en rupture ductile. Cette loi est utilisable avec l'élément fini d'interface basé sur une formulation mixte lagrangien augmenté (voir [R3.06.13]) et permet d'introduire une force de cohésion entre les lèvres de la fissure uniquement en mode d'ouverture. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé RUPT_DUCT.

- Modélisation supportée : toutes les modélisations de type INTERFACE (cf. U3.13.14).
- Nombre de variables internes : 9
  $V1$: seuil en saut, permet de prendre en compte l'irréversibilité de la fissuration, voir sa définition dans les partie précédentes (spécifique à chaque loi).
  $V2$: indicateur du régime de la loi $V2=-1$: Contact, $V2=0$: adhérence initiale ou courante, $V2=1$: dissipation, $V2=2$: rupture finale, $V2=3$: plateau.
  $V3$: indicateur d'endommagement $V3=0$ si matériau sain, $V3=1$ si matériau endommagé, $V3=2$ si matériau cassé.
  $V4$: pourcentage d'énergie dissipée.
  $V5=V4\times G_c$: valeur de l'énergie dissipée.
  $V6$: valeur de l'énergie résiduelle courante : nulle pour cette lois (valable pour CZM_xxx_REG).
  $V7=\delta_n$: saut normal, $V8=\delta_t$: saut tangentiel, $V9=\delta_\tau$ saut tangentiel (nul en 2D).
- Exemples : voir tests SSNP151, SSNA120.

4.4.6.14 'CZM_FAT_MIX'

Relation de comportement cohésive pour la fatigue (voir [R7.02.11]). Cette loi est utilisable avec l'élément fini d'interface basé sur une formulation mixte lagrangien augmenté (voir [R3.06.13]). Le but est de simuler la propagation de fissure en fatigue en 2D ou 3D (mode I uniquement) avec la possibilité de considérer un matériau environnant non linéaire afin de modéliser (entre autre) l'effet retard lié à une surcharge. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé RUPT_FRAG. L'utilisation de ce modèle requiert la présence du pilotage par PRED_ELAS (cf. [U4.51.03])..

- Modélisation supportée : toutes les modélisations de type INTERFACE (cf. U3.13.14).
- Nombre de variables internes : 9
- Exemple : voir tests SSNP118, SSNP139

4.4.6.15 'CZM_LAB_MIX'

Relation de comportement cohésive (Cohesive Zone Model Liaison Acier-Béton MIXte) (cf. [R7.02.11]) modélisant le comportement d'une interface acier-béton. Cette loi est utilisable avec les éléments finis d'interface basés sur une formulation mixte de type lagrangien augmenté (cf. [R3.06.13]) et permet de modéliser le glissement de l'acier par rapport au béton.
Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé CZM_LAB_MIX.

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

- Modélisations supportées : toutes les modélisations de type INTERFACE (cf. U3.13.14).
- Nombre de variables internes : 5
  $V1$: seuil en saut (plus grande norme atteinte),
  $V2$: indicateur du régime de la loi = 0 : Adhérence initiale ou courante, 1 : Endommagement, 2 : Rupture, 3 : Retour à zéro à contrainte nulle.
  $V3$: saut normal, $V4$: saut tangentiel, $V5$: saut tangentiel (nul en 2D).
- Exemple : voir test SSNS110.

4.4.6.16 'RUPT_FRAG'

Relation de comportement non locale basée sur la formulation de J.J. Marigo et G. Francfort de la mécanique de la rupture (pas d'équivalent en version locale). Ce modèle décrit l'apparition et la propagation de fissures dans un matériau élastique (cf. [R7.02.11]). Les caractéristiques du matériau sont définies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01] sous les mots clés ELAS, RUPT_FRAG et NON_LOCAL.

- Modélisation non locale supportée : GRAD_VARI.
- Nombre de variables internes : 4
- Signification : $V1$: valeur de l'endommagement, $V2$ à $V4$: 3 composantes du gradient de l'endommagement.
- Exemple : voir test SSNA101.

4.4.6.17 'RANKINE'

Relation de comportement utilisée pour la modélisation simplifiée de joints des barrages en béton [R7.01.39]. Il s'agit d'un critère de plasticité parfaite en traction portant sur les composantes des contraintes principales : $\sigma_{i=1,2,3} \leq \sigma_t$. Quand une contrainte principale atteint la valeur seuil σ_t, le joint s'ouvre dans cette direction. Il est à noter que la déformation plastique ainsi créée n'est pas réversible, le modèle ne permet donc pas de représenter la re-fermeture du joint et n'est valable que sur un trajet de chargement monotone. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé RANKINE.

- Modélisation supportées : D_PLAN, C_PLAN, AXIS, 3D.
- Nombre de variables internes : 9
- Exemple : voir tests SSNV515, SSNV516

4.4.6.18 'JOINT_MECA_RUPT'

Relation de comportement de contact, élastique avec résistance à la traction et rupture (Cf. [R7.01.25]). Cette loi est utilisable avec les éléments finis de joint en linéaire et en quadratique. La modélisation hydromécanique n'est possible que pour les joints quadratique (Cf. [R3.06.09] pour plus de détail). Le comportement normal est de type cohésif, tandis que le comportement tangentiel est toujours linéaire avec une rigidité dépendante de l'ouverture normale du joint. La pression hydrostatique due à la présence de liquide dans le joint est prise en compte, le couplage hydromécanique est également possible. La procédure d'injection du béton sous pression (le clavage), qui est spécifique à la construction des barrages, est aussi implémentée. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé JOINT_MECA_RUPT.

- Modélisation supportées : PLAN_JOINT, AXIS_JOINT, 3D_JOINT, PLAN_JOINT_HYME, 3D_JOINT_HYME.
- Nombre de variables internes : 18
- Exemple : voir tests SSNP162, SSNP142, SSNP143

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

4.4.6.19 'JOINT_MECA_FROT'

Une version élastoplastique de la loi de frottement type Mohr-Coulomb (confer [R7.01.25]). Cette loi est utilisable avec les éléments finis de joint en linéaire et en quadratique. La modélisation hydromécanique n'est possible que pour les joints quadratique (Cf. [R3.06.09] pour plus de détail). . Seule la partie tangentielle du déplacements est décomposée en deux composantes - plastique et élastique. L'écoulement est normal pour cette partie tangentielle. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé JOINT_MECA_FROT.

- Modélisation supportée : PLAN_JOINT, AXIS_JOINT, 3D_JOINT, PLAN_JOINT_HYME, 3D_JOINT_HYME.
- Nombre de variables internes : 18
- Exemple : voir tests SSNP162d/e/f/j/k/l, SSNP142c/d/g/h

4.4.6.20 'ENDO_HETEROGENE'

La loi ENDO_HETEROGENE est un modèle d'endommagement isotrope représentant la formation et la propagation des fissures à partir d'une répartition de micro-défauts donnée par un modèle de Weibull. La présence de fissure dans la structure est modélisée par des lignes d'éléments cassés ($d=1$). La rupture des éléments peut être causée soit par l'amorçage d'une nouvelle fissure, soit par propagation (voir [R7.01.29] pour plus de détails). Il s'agit donc d'un modèle à deux seuils. Cette loi est adaptée aux matériaux hétérogènes comme par exemple l'argilite.

Les caractéristiques du matériau sont définies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01] sous les mots clés ENDO_HETEROGENE,ELAS et NON_LOCAL.

Modélisation non locale supportée : D_PLAN_GRAD_SIGM

- Nombre de variables internes pour la modélisation D_PLAN_GRAD_SIGM : 12
- Signification :
- $V1$: valeur de l'endommagement d ,
- $V2$: élément sain (0), pointé (1), rompu par amorçage (2), rompu par propagation (3)
- $V3$: contrainte de rupture par amorçage,
- $V4$: contrainte de rupture par propagation,
- $V5$: numéro de l'élément pointé numéro 1,
- $V6$: numéro de l'élément pointé numéro 2 (quand amorçage),
- $V7$: itération de Newton de rupture,
- $V8$: itération de Newton courante,
- $V9$: coordonnée X de la pointe de fissure après rupture par propagation,
- $V10$: coordonnée Y de la pointe de fissure après rupture par propagation,
- $V11$: coordonnée X de la pointe de fissure 2 lors de l'amorçage,
- $V12$: coordonnée Y de la pointe de fissure 2 lors de l'amorçage,

- Exemple : voir test ssnp147 et ssnp148

4.4.7 Comportements spécifiques à la modélisation du béton et du béton armé

4.4.7.1 'ENDO_ISOT_BETON'

Relation de comportement élastique fragile. Il s'agit d'une modélisation locale à endommagement scalaire et à écrouissage isotrope linéaire négatif qui distingue le comportement en traction et en compression du béton (voir [R7.01.04] pour plus de détails). Les caractéristiques du matériau sont définies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01] sous les mots clés BETON_ECRO_LINE et ELAS.

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

Modélisations locales supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST), INCO_UPG, INCO_UP, CONT_1D (par DE BORST)
- Nombre de variables internes : 2
- Signification : $V1$: valeur de l'endommagement, $V2$: indicateur d'endommagement (0 pour régime élastique (endommagement nul), 1 si endommagé, 2 si rompu (endommagement égal à 1)).
- Exemple : voir test SSNV149.

4.4.7.2 'ENDO_FISS_EXP'

Relation de comportement quasi-fragile non locale destinée à la modélisation de la fissuration du béton à l'échelle de la fissure individuelle. Le modèle introduit un seuil d'endommagement caractéristique du béton, restaure une partie de la rigidité dans les directions de sollicitations en compression et tend vers une loi cohésive lorsque la longueur interne (l'échelle non locale) tend vers zéro (voir [R5.03.28] pour plus de détails). Les caractéristiques du béton sont définies idéalement dans l'opérateur DEFI_MATER_GC [U4.42.07] en termes de grandeurs de l'ingénieur ou, sinon, dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01] (mots-clés facteurs ENDO_FISS_EXP, ELAS et NON_LOCAL) pour renseigner les valeurs des paramètres internes de la loi.

Modélisation locale non supportée.

Modélisation non locale supportée : GRAD_VARI
- Nombre de variables internes : 9
- Signification : V1 = valeur de l'endommagement, V2 = indicateur d'endommagement (0 pour régime élastique (endommagement nul), 1 si endommagé, 2 si rompu (endommagement égal à 1)) V3 = rigidité résiduelle, V4 à V9 = déformation mécanique à la fin du pas de temps (utilisée en cas de reprise avec adaptation de maillage)
- Exemple : voir tests SSNL125,SSNP168,SSNV234,SSNA119

4.4.7.3 'ENDO_SCALAIRE'

Relation de comportement élastique fragile. Il s'agit d'une modélisation non locale à endommagement scalaire et à écrouissage négatif qui distingue le comportement en traction et en compression pour ce qui concerne la surface de charge (voir [R5.03.25] pour plus de détails). Les caractéristiques du matériau sont définies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01] sous les mots clés ENDO_SCALAIRE, NON_LOCAL et ELAS.

Modélisation locale non supportée.

Modélisation non locale supportée : GRAD_VARI
- Nombre de variables internes : 3
- Signification : $V1$: valeur de l'endommagement, $V2$: indicateur d'endommagement (0 pour régime élastique (endommagement nul), 1 si endommagé, 2 si rompu (endommagement égal à 1)) $V3$: rigidité résiduelle
- Exemple : voir tests SSNL125,SSNP146,SSNV223,SSNA119

4.4.7.4 'ENDO_CARRE'

Relation de comportement élastique fragile. Il s'agit d'une modélisation non locale à endommagement régularisé quadratique et à écrouissage isotrope négatif, qui distingue le comportement en compression de celui en traction (voir [R5.03.26] pour plus de détails). Les caractéristiques du matériau sont définies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01] sous les mots clés ECRO_LINE, NON_LOCAL et ELAS.

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

Modélisation locale non supportée.

Modélisation non locale supportée : GVNO
- Nombre de variables internes : 2
- Signification : $V1$: valeur de l'endommagement, $V2$: indicateur d'endommagement (0 pour régime élastique (endommagement nul), 1 si endommagé

Exemple : voir tests SSNP307,SSNA119, SSNV220

4.4.7.5 'ENDO_ORTH_BETON'

Relation de comportement anisotrope du béton avec endommagement [R7.01.09]. Il s'agit d'une modélisation locale d'endommagement prenant en compte la refermeture des fissures. Les caractéristiques des matériaux sont définies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU sous les mots-clés ELAS et ENDO_ORTH_BETON.

Modélisations locales supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST), INCO, CONT_1D (par DE BORST)
- Nombre de variables internes : 7
- Signification : $V1$ à $V6$: tenseur d'endommagement de traction
- $V7$: endommagement de compression
- Exemple : voir test SSNV176

4.4.7.6 'MAZARS'

Relation de comportement élastique fragile. Elle permet de rendre compte de l'adoucissement du béton et distingue l'endommagement en traction et en compression. Une seule variable d'endommagement scalaire est utilisée (cf. [R7.01.08] pour plus de détails). Les caractéristiques du matériau sont définies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01] sous les mots clés MAZARS et ELAS(_FO). En cas de chargement thermique, les coefficients matériaux dépendent de la température maximale atteinte au point de Gauss considéré. De plus, la dilatation thermique supposée linéaire ne contribue pas à l'évolution de l'endommagement (idem pour le retrait de dessiccation et le retrait endogène).
Modélisations locales supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN, INCO, CONT_1D (par DE BORST)
- Nombre de variables internes : 4
- Signification : $V1$: valeur de l'endommagement, $V2$: indicateur d'endommagement (0 si non endommagé, 1 si endommagé), $V3$: température maximale atteinte au point de Gauss considéré, $V4$: déformation équivalente au sens de Mazars.
- Exemple : voir test SSNP113

4.4.7.7 'MAZARS_GC'

Relation de comportement élastique fragile. Elle permet de rendre compte de l'adoucissement du béton et distingue l'endommagement en traction et en compression. Deux variables d'endommagement scalaire sont utilisées (confer [R5.03.09] pour plus de détails). Les caractéristiques du matériau sont définies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01] sous les mots clés MAZARS et ELAS.

Modélisations supportées : 1D, C_PLAN, variables internes : 8 (confer [R5.03.09] pour plus de détails).
- $V1$: Critère en contrainte,
- $V2$: Critère en déformation,
- $V3$: Endommagement,
- $V4$: Déformation équivalente de traction,
- $V5$: Déformation équivalente de compression,
- $V6$: Rapport de tri-axialié.
- $V7$: Température maximale atteinte dans le matériau,
- $V8$: dissipation non récupérable.

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

4.4.7.8 'ENDO_PORO_BETON'

ENDO_PORO_BETON est le modèle d'endommagement du béton développé au sein du LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité Des Constructions) en collaboration avec le Centre d'Ingénierie Hydraulique d'EDF. Ce module d'endommagement prend en compte la dissymétrie du comportement du béton (traction-compression), les déformations résiduelles et la refermeture de fissure. En traction, l'endommagement est décrit par un tenseur orthotrope et en compression, l'endommagement est décrit par un tenseur isotrope. Ce module peut également être couplé avec le module FLUA_PORO_BETON à travers l'utilisation FLUA_ENDO_PORO pour prendre en compte les phénomènes de fluage et également avec le modèle RGI_BETON. Précisons que RGI_BETON est un ensemble de trois modules permettant de prendre en compte les déformations différées du béton avec FLUA_PORO_BETON, l'endommagement du béton avec ENDO_PORO_BETON et les réactions de gonflement interne (alcali-réaction et sulfatique interne) avec RGI_BETON. Pour l'utiliser, il est nécessaire de renseigner les paramètres matériaux dans DEFI_MATERIAU : ENDO_PORO_BETON. [U4.43.01]

- Modélisations supportées : 3D, 2D
- Nombre de variables internes : 108
- Signification : voir [R7.01.30]
- Exemple : voir test SSNV238 et SSNV239

4.4.7.9 'BETON_DOUBLE_DP'

Relation de comportement tridimensionnelle utilisée pour la description du comportement non linéaire du béton. Il comporte un critère de Drücker Prager en traction et un critère de Drücker Prager en compression, découplés. Les deux critères peuvent avoir un écrouissage adoucissant. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés BETON_DOUBLE_DP et ELAS(_FO) (confer [R7.01.03] pour plus de détails). Pour faciliter l'intégration de ce modèle, on peut utiliser le redécoupage automatique local du pas de temps (voir mot clé ITER_INTE_PAS).

- Modélisations supportées : 3D, D_PLAN et AXIS
- Nombre de variables internes : 4
- Signification : $V1$: déformation plastique cumulée en compression, $V2$: déformation plastique cumulée en traction, $V3$: température maximale atteinte au point de Gauss considéré, $V4$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1).
- Exemple : voir test SSNV143.

4.4.7.10 'GRILLE_ISOT_LINE'

Relation de comportement isotherme d'élasto-plasticité de Von Mises uniaxiale à écrouissage isotrope linéaire utilisée pour la modélisation des armatures du béton armé. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés ELAS et ECRO_LINE (confer pour plus détail le document [R5.03.09]).

- Modélisations supportées : GRILLE
- Nombre de variables internes : 4
- Signification : $V1$: déformation plastique cumulée dans le sens longitudinal, $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1).
- Exemple : voir test SSNS100

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

4.4.7.11 'GRILLE_CINE_LINE'

Relation de comportement isotherme d'élasto-plasticité de Von Mises uniaxiale à écrouissage cinématique linéaire utilisée pour la modélisation des armatures du béton armé. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés ELAS et ECRO_LINE (Cf. pour plus détail le document [R5.03.09]).

- Modélisations supportées : GRILLE
- Nombre de variables internes : 4
- Signification : $V1$: écrouissage cinématique dans le sens longitudinal, $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1), $V3$: inutilisé.
- Exemple : voir test SSNS100

4.4.7.12 'GRILLE_PINTO_MEN'

Relation de comportement isotherme uniaxiale élasto-plastique de Pinto-Menegotto pour la modélisation des armatures du béton armé sous chargement cyclique. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé PINTO_MENEGOTTO (confer pour plus détail le document [R5.03.09]).

- Modélisations supportées : GRILLE
- Nombre de variables internes : 16
- Signification : cf. le document [R5.03.09]
- Exemple : voir test SSNS100

4.4.7.13 'PINTO_MENEGOTTO'

Relation de comportement isotherme uniaxiale élasto-plastique modélisant la réponse des armatures en acier dans le béton armé sous chargement cyclique. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé PINTO_MENEGOTTO (Cf. pour plus détail le document [R5.03.09]).

- Modélisations supportées : CONT_1D
- Nombre de variables internes : 8
- Signification : cf. le document [R5.03.09]
- Exemple : voir test SSNS10

4.4.7.14 'GLRC_DAMAGE'

Cette loi de comportement remplace une ancienne version, GLRC. Il s'agit d'un modèle global de plaque en béton armé capable de représenter son comportement jusqu'à la ruine. Contrairement aux modélisations locales où chaque constituant du matériau est modélisé à part, dans les modèles globaux, la loi de comportement s'écrit directement en termes de contraintes et de déformations généralisées. Les phénomènes pris en compte sont l'élasto-plasticité couplée entre les effets de membrane et de flexion (contre une élasto-plasticité en flexion seulement dans GLRC) et l'endommagement en flexion. L'endommagement couplé membrane/flexion est traité par GLRC_DM, lequel, par contre, néglige complètement l'élasto-plasticité. Les caractéristiques du matériau sont définies dans DEFI_MATERIAU (U4.43.01) sous le mot clé GLRC_DAMAGE. Pour les précisions sur la formulation du modèle voir [R7.01.31].

- Modélisations supportées : DKTG, Q4GG
- Nombre de variables internes. 19
- Signification : $V1$ à $V3$: extension membranaire plastique, $V4$ à $V6$: courbures plastiques, V7 : dissipation plastique, $V8$ à $V9$: variables d'endommagement pour la flexion positive et négative respectivement, $V10$: dissipation d'endommagement, $V11$ à $V13$: angles d'orthotropie, $V14$ à $V19$: composantes du tenseur d'écrouissage cinématique (3 pour les efforts de membrane, 3 pour les moments fléchissants).
- Exemple : voir tests SSNS104, SDNS108

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

4.4.7.15 'GLRC_DM'

Ce modèle global permet de représenter l'endommagement d'une plaque en béton armé pour des sollicitations modérées. Contrairement aux modélisations locales où chaque constituant du matériau est modélisé à part, dans les modèles globaux, la loi de comportement s'écrit directement en terme de contraintes et de déformations généralisées. La modélisation jusqu'à la rupture n'est pas recommandée, puisque les phénomènes de plastification ne sont pas pris en compte, mais le sont dans GLRC_DAMAGE. En revanche, la modélisation du couplage de l'endommagement entre les effets de membrane et de flexion dans GLRC_DM est prise en compte, ce qui n'est pas le cas dans GLRC_DAMAGE. Les caractéristiques du matériau sont définies dans DEFI_MATERIAU [U4.43.01] sous les mots clé GLRC_DM. Pour les précisions sur la formulation du modèle voir [R7.01.32].

Modélisation supportée : DKTG.

- Nombre de variables internes : 18
  - $V1$ (ENDOFL+) à $V2$ (ENDOFL-): variables d'endommagement pour la flexion positive et négative respectivement
  - $V3$: INDIEND1 : indicateur d'endommagement correspondant à $V1$ (0 pour régime élastique et 1 si la vitesse de l'endommagement non nulle)
  - $V4$: INDIEND2 : indicateur d'endommagement correspondant à $V2$ (0 pour régime élastique et 1 si la vitesse de l'endommagement non nulle)
  - $V5$: ADOUTRAC :affaiblissement relatif de raideur en membrane en traction
  - $V6$: ADOUCOMP :affaiblissement relatif de raideur en membrane en compression
  - $V7$: ADOUFLEX :affaiblissement relatif de raideur en flexion
  - $V8$: ACIXELS : rapport entre la déformation de l'acier dans la direction X (maximum entre la nappe inférieure et supérieure) et la déformation EPSI_ELS
  - $V9$: ACIXELU : rapport entre la déformation de l'acier dans la direction X (maximum entre la nappe inférieure et supérieure) et la déformation EPSI_ELU
  - $V10$: ACIYELS : rapport entre la déformation de l'acier dans la direction Y (maximum entre la nappe inférieure et supérieure) et la déformation EPSI_ELS
  - $V11$: ACIYELU : rapport entre la déformation de l'acier dans la direction Y (maximum entre la nappe inférieure et supérieure) et la déformation EPSI_ELU
  - $V12$: BETSUP : rapport entre la déformation principale la plus faible (en compression) du béton en face supérieure et la déformation limite du béton en compression EPSI_C.
  - $V13$: BETINF : rapport entre la déformation principale la plus faible (en compression) du béton en face inférieure et la déformation limite du béton en compression EPSI_C.
  - $V14$: TRAMAX : déformation maximale temporelle en traction
  - $V15$: COMMAX : déformation maximale temporelle en compression
  - $V16$: FLEMAX : déformation maximale temporelle en flexion
  - $V17$: ERRCOM : erreur exprimée en pourcentage entre les aires de la courbe en compression théorique (définie par EPSI_C et FCJ) et la courbe approximée (NYC, GAMMA_C) entre 0 et COMMAX
  - $V18$: ERRFLE : Erreur exprimée en pourcentage entre les aires de la courbe en flexion théorique (calcul de section de béton armé) et la courbe approximée (MFY, GAMMA_F) entre 0 et FLEM AX

Exemple : voir test SSNS106.

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

4.4.7.16 'DHRC'

Ce modèle global, formulé en déformations et efforts généralisés, permet de représenter l'endommagement d'une plaque en béton armé ainsi que le glissement acier/béton consécutif à l'endommagement, pour des sollicitations cycliques modérées. Contrairement aux modélisations locales où chaque constituant du matériau est modélisé à part, dans les modèles globaux, la loi de comportement s'écrit directement en termes de contraintes et de déformations généralisées. La modélisation jusqu'à la rupture n'est pas recommandée, puisque les phénomènes de plastification ne sont pas pris en compte, mais le sont dans GLRC_DAMAGE. En revanche, la modélisation du couplage de l'endommagement entre les effets de membrane et de flexion dans DHRC est pris en compte, ce qui n'est pas le cas dans GLRC_DAMAGE. Par rapport au modèle GLRC_DM, le modèle DHRC permet de représenter en plus : le glissement acier/béton et la dissipation d'énergie associée, le couplage élastique anisotrope en flexion-membrane provenant d'une dissymétrie quelconque entre les nappes inférieure et supérieure d'acier. Les caractéristiques du matériau sont à fournir dans DEFI_MATERIAU [U4.43.01] sous les mots-clés DHRC, à partir de calculs d'homogénéisation préalables. Pour les précisions sur la formulation du modèle voir [R7.01.36].

Modélisation supportée : DKTG.
- Nombre de variables internes : 9
- $V1$ à $V2$: variables d'endommagement pour la flexion positive et négative respectivement,
- $V3$ à $V6$: variables de glissement acier/béton : directions x et y (en repère local) des aciers de la nappe supérieure puis idem pour les aciers de la nappe inférieure,
- $V7$ à $V9$: dissipation d'énergie interne due à l'endommagement, dissipation d'énergie interne due aux glissements, et dissipation totale (somme des deux précédentes).

Exemple : voir test SSNS106.

4.4.7.17 'CORR_ACIER'

Modèle élasto-plastique endommageable pour lequel la déformation plastique à rupture dépend du taux de corrosion (cf. [R7.01.20]). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés ELAS et CORR_ACIER.

- Modélisations :: 3D, 2D, CONT_1D, CONT_1D(PMF)
- 3 variables internes :
  - $V1$: déformation plastique cumulée
  - $V2$: coefficient d'endommagement
  - $V3$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1)
- Exemple : voir test SSNL127.

4.4.7.18 'BETON_REGLE_PR'

Relation de comportement de béton élastique non linéaire (développée par la société NECS) dite 'parabole rectangle'. Les caractéristiques du matériau sont définies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01] sous le mot clé BETON_REGLE_PR et ELAS.

La loi BETON_REGLE_PR est une loi de béton se rapprochant des lois réglementaires de béton (d'où son nom) qui a les caractéristiques sommaires suivantes :
- c'est une loi 2D et plus exactement 2 fois 1D : dans le repère propre de déformation, on écrit une loi 1D contrainte-déformation ;
- la loi 1D sur chaque direction de déformation propre est la suivante :
  - en traction, linéaire jusqu'à un pic, adoucissement linéaire jusqu'à 0 ;
  - en compression, une loi puissance jusqu'à un plateau (d'où PR : parabole-rectangle).
- Modélisations : C_PLAN, D_PLAN

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

- Exemple : voir test SSNP129 ou SSNS114

Les équations du modèle sont décrites dans [R7.01.27].

4.4.7.19 'JOINT_BA'

Relation de comportement locale en 2D décrivant le phénomène de la liaison acier - béton pour les structures en béton armé. Elle permet de rendre compte de l'influence de la liaison dans la redistribution des contraintes dans le corps du béton ainsi que la prédiction des fissures et leur espacement. Disponible pour des chargements en monotone et en cyclique, elle prend en compte les effets du frottement des fissures, et du confinement. Une seule variable d'endommagement scalaire est utilisée (cf. [R7.01.21] pour plus de détails). Les caractéristiques du matériau sont définies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01] sous les mots clés JOINT_BA et ELAS.

- Modélisations supportées : PLAN_JOINT et AXIS_JOINT.
- Nombre de variables internes : 6
- Signification : $V1$: valeur de l'endommagement dans la direction normale, $V2$: valeur de l'endommagement dans la direction tangentielle, $V3$: variable scalaire de l'écrouissage isotrope pour l'endommagement en mode 1, $V4$: variable scalaire de l'écrouissage isotrope pour l'endommagement en mode 2, $V5$: déformation de glissement cumulée par frottement des fissures, $V6$: valeur de l'écrouissage cinématique par frottement des fissures.
- Exemple : voir test SSNP126

4.4.7.20 'BETON_GRANGER'

Relation de comportement pour la modélisation du fluage du béton. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé BETON_GRANGER (voir [R7.01.01] pour plus de détails).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST), CONT_1D (par DE BORST), CONT_1D(PMF)
- Nombre de variables internes : 55
- Signification : voir [R7.01.01]
- Exemple : voir test SSNP116

4.4.7.21 ' BETON_GRANGER_V'

Relation de comportement pour la modélisation du fluage du béton avec prise en compte du phénomène de vieillissement. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé V_BETON_GRANGER (confer [R7.01.01] pour plus de détails).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST), CONT_1D (par DE BORST)
- Nombre de variables internes : 55
- Signification : voir [R7.01.01]
- Exemple : voir test YYYY1 17

4.4.7.22 'BETON_UMLV'

Relation de comportement pour la modélisation du fluage du béton avec prise en compte de la distinction entre fluage volumique et fluage déviatorique afin de rendre compte des phénomènes dans les cas de fluages multiaxiaux. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé BETON_UMLV (confer [R7.01.06] pour plus de détails).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST),
- Nombre de variables internes : 21
- Signification : voir [R7.01.06]

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

- Exemple : voir test SSNV163

4.4.7.23 'BETON_RAG'

Relation de comportement pour la modélisation des structures affectées par la réaction alcali-granulat. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé BETON_RAG (confer [R7.01.26] pour plus de détails).

- Modélisations supportées : 3D, 2D AXI, 2D D_PLAN
- Nombre de variables internes : 33
- Signification : voir [R7.01.26]

4.4.7.24 'BETON_BURGER'

Relation de comportement pour la modélisation du fluage du béton avec prise en compte de la distinction entre fluage volumique et fluage déviatorique afin de rendre compte des phénomènes dans les cas de fluages multiaxiaux. Prise en compte de la thermo-activation des déformations de fluage via une loi de type Arrhénius. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé BETON_BURGER (confer [R7.01.35] pour plus de détails).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST),
- Nombre de variables internes : 33
- Signification : voir [R7.01.35]
- Exemple : voir test s SSNV163, SSNV174, SSNV180, SSNV181 et SSNV235

4.4.7.25 ' FLUA_PORO_BETON '

FLUA_PORO_BETON est le modèle de fluage du béton développé au sein du LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité Des Constructions) en collaboration avec le Centre d'Ingénierie Hydraulique d'EDF. Ce module de fluage prend en compte toutes les déformations différées (retrait, fluage de dessiccation et fluage propre) à l'aide d'une modélisation poromécanique et d'un schéma de BURGER. Ce module appartient au modèle RGI_BETON . Précisons que BETON_RGI est un ensemble de trois modules permettant de prendre en compte les déformations différées du béton avec FLUA_PORO_BETON , l'endommagement du béton avec ENDO_PORO_BETON et les réactions de gonflement interne (alcali-réaction et sulfatique interne) avec RGI_BETON . Pour l'utiliser, il est nécessaire de renseigner les paramètres matériaux dans DEFI_MATERIAU : FLUA_P ORO_BETON . [U4.43.01]

- Modélisations supportées : 3D, 2D
- Nombre de variables internes : 108
- Signification : voir [R7.01.30]
  Exemple : voir test SSNV235 et SSNV236

4.4.7.26 'RGI_BETON'

RGI_BETON est le modèle de réaction de gonflement du béton (alcali-réaction et sulfatique interne) développé au sein du LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité Des Constructions) en collaboration avec le Centre d'Ingénierie Hydraulique d'EDF. Ce module appartient au modèle RGI_BETON . Précisons que RGI_BETON est un ensemble de trois modules permettant de prendre en compte les déformations différées du béton avec FLUA_PORO_BETON , l'endommagement du béton avec ENDO_PORO_BETON et les réactions de gonflements interne avec RGI_BETON . Pour l'utiliser, il est nécessaire de renseigner les paramètres matériaux dans DEFI_MATERIAU : RGI_B ETON . [U4.43.01]

- Modélisations supportées : 3D, 2D
- Nombre de variables internes : 108
- Signification : voir [R7.01.30]

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

4.4.8 Comportements mécaniques pour les géo-matériaux

Les modèles mécaniques pour les géo-matériaux (sols, roches) peuvent pour la plupart être utilisés dans les modélisations mécaniques seules ou dans les modélisations THM, via les mot-clés KIT_HM, KIT_HHM, KIT_THM, KIT_THHM.

4.4.8.1 'GONF_ELAS'

Relation de comportement servant à décrire le comportement des matériaux de type "argile gonflante" (bentonite). Il s'agit d'un modèle élastique non linéaire reliant la contrainte nette ($contrainte - Pgaz$) à la pression de gonflement qui elle même dépend de la succion (ou pression capillaire). Ce modèle est développé pour les modélisations non saturées de type *HH*.

- Modélisations supportées : HHM, THHM.
- Nombre de variables internes : 0
- Exemple : voir les tests reproduisant le gonflement d'une cellule d'argile que l'on sature progressivement : plan (wtnp119a,b,c,d), axi (wtna110a,b,c,d) et 3D (wtnv136a,b,c,d)

4.4.8.2 'MOHR_COULOMB'

Relation de comportement élasto-plastique pour des calculs en mécanique des sols. Il s'agit du modèle le plus simple utilisé pour représenter en première approximation le comportement à la rupture d'un sol sous chargement monotone. Ce modèle est un modèle multi-critère caractérisé par l'intersection de 6 plans dans l'espace des déviateurs des contraintes principales (voir [R7.01.28] pour plus de détails). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés MOHR_COULOMB et ELAS.

- Modélisations supportées : 3D, 2D, THM.
- Nombre de variables internes : 3
- Signification : $V1$: déformation plastique volumique, $V2$: norme des déformations déviatoriques, $V3$: indicateur d'activation de la plasticité (1) ou non (0).
- Exemple : voir tests SSNV232, SSNV233, SSNP104, WTNV142

4.4.8.3 'CJS'

Relation de comportement élasto-plastique pour des calculs en mécanique des sols. Ce modèle est un modèle multi-critère qui comporte un mécanisme élastique non linéaire, un mécanisme plastique isotrope et un mécanisme plastique déviatoire (voir [R7.01.13] pour plus de détails). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés CJS et ELAS. Pour faciliter l'intégration de ce modèle, on peut utiliser le redécoupage automatique local du pas de temps (voir mot clé ITER_INTE_PAS).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST), CONT_1D (par DE BORST), THM.
- Nombre de variables internes : 16 en 3D et 14 en 2D
- Signification : $V1$: seuil isotrope, $V2$: angle du seuil déviatoire, $V3$ à $V8$ (V3 à V6 en 2D) : 6 (4 en 2D) composantes du tenseur d'écrouissage cinématique, $V9$ ($V7$ en 2D) : distance normalisée au seuil déviatoire, $V10$ ($V8$ en 2D) : rapport entre le seuil déviatoire et le seuil déviatorique critique, $V11$ ($V9$ en 2D) : distance normalisée au seuil isotrope, $V12$ ($V10$ en 2D) : nombre d'itérations internes, $V13$ ($V11$ en 2D) : valeur du test local d'arrêt du processus itératif, $V14$ ($V12$ en 2D) : nombre de redécoupages locaux du pas de temps, $V15$ ($V13$ en 2D) : signe du produit contracté de la contrainte déviatorique par la déformation plastique déviatorique, $V16$ ($V14$ en 2D) : indicateur (0 si élastique, 1 si élastoplastique avec mécanisme

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

plastique isotrope, 2 si élastoplastique avec mécanisme plastique déviatoire, 3 si élastoplastique avec mécanismes plastiques isotrope et déviatoire).
- Exemple : voir tests SSNV135, SSNV136, SSNV154, WTNV100

4.4.8.4 'LAIGLE'

Relation de comportement pour la modélisation des roches suivant le modèle de Laigle. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé LAIGLE (Cf. le document [R7.01.15] pour plus de détails). Pour faciliter l'intégration de ce modèle, on peut utiliser le redécoupage automatique local du pas de temps (mot clé ITER_INTE_PAS).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, THM
- Nombre de variables internes : 4
- Signification : $V1$: déformation déviatoire plastique cumulée, $V2$: déformation volumique plastique cumulée, $V3$ domaines de comportement de la roche, $V4$: indicateur d'état.
- Exemple : voir test SSNV158, WTNV101

4.4.8.5 'LETK'

Relation de comportement pour la modélisation élastoviscoplastique des roches suivant le modèle de Laigle et Kleine. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé LETK (Cf. le document [R7.01.24] pour plus de détails). L'opérateur tangent n'étant pas validé, il est possible d'utiliser la matrice de perturbation sous le mot clé TYPE_MATR_TANG. L'opérateur relatif à la prédiction élastique est celui de l'élasticité non linéaire spécifique à la loi.

- Modélisations supportées : 3D, 2D, THM
- Nombre de variables internes : 7
- Signification : $V1$: variable d'écrouissage élastoplastique, $V2$: déformation déviatorique plastique , $V3$: variable d'écrouissage viscoplastique, $V4$: déformation déviatoire viscoplastique, $V5$: indicateur de contractance (0) ou de dilatance (1), $V6$:indicateur de viscplasticité, $V7$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1)
- Exemple : voir les tests SSNV206A,WTNV135A

4.4.8.6 'HOEK_BROWN'

Relation de comportement de Hoek et Brown modifiée pour la modélisation du comportement des roches [R7.01.18] pour la mécanique pure. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé HOEK_BROWN Pour faciliter l'intégration de ce modèle, on peut utiliser le redécoupage automatique local du pas de temps (voir mot clé ITER_INTE_PAS).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, C_PLAN
- Nombre de variables internes : 3
- Signification : voir [R7.01.18]
- Exemple : voir test SSNV184

4.4.8.7 'HOEK_BROWN_EFF'

Relation de comportement de Hoek et Brown modifiée pour la modélisation du comportement des roches [R7.01.18] en THM. Le couplage est formulé en contraintes effectives. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le

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

mot clé HOEK_BROWN Pour faciliter l'intégration de ce modèle, on peut utiliser le redécoupage automatique local du pas de temps (voir mot clé ITER_INTE_PAS).

- Modélisations supportées : THM
- Nombre de variables internes : 3
- Signification : voir [R7.01.18]
- Exemple : voir test WTNV128

4.4.8.8 'HOEK_BROWN_TOT'

Relation de comportement de Hoek et Brown modifiée pour la modélisation du comportement des roches [R7.01.18] en THM. Le couplage est formulé en contraintes totales. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé HOEK_BROWN Pour faciliter l'intégration de ce modèle, on peut utiliser le redécoupage automatique local du pas de temps (voir mot clé ITER_INTE_PAS).

- Modélisations supportées : THM
- Nombre de variables internes : 3
- Signification : voir [R7.01.18]
- Exemple : voir test WTNV129

4.4.8.9 'CAM_CLAY'

Relation de comportement élasto-plastique pour des calculs en mécanique des sols normalement consolidés (Cf. [R7.01.14] pour plus de détails). La partie élastique est non-linéaire. La partie plastique peut être durcissante ou adoucissante. Les données nécessaires au champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés CAM_CLAY et ELAS.
Si le modèle CAM_CLAY est utilisé avec la modélisation THM, le mot clé PORO renseigné sous CAM_CLAY et sous THM_INIT doit être le même.

- Modélisation supportées : 3D, 2D et THM
- Nombre de variables internes : 2
- Signification : $V1$: déformation plastique volumique, $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1).
- Exemple : voir tests SSNV160, WTNV122

4.4.8.10 'BARCELONE'

Relation décrivant le comportement mécanique 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). Ce modèle doit être utilisé dans des relations KIT_HHM ou KIT_THHM. Les données nécessaires au champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés BARCELONE, CAM_CLAY et ELAS.

- Modélisation supportées : THM
- Nombre de variables internes : 5
- Signification : $V1$: p critique (1/2 pression de consolidation), $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) mécanique, $V3$: seuil hydrique, $V4$: indicateur d'irréversibilité hydrique, $V5$: Ps (cohésion).
- Exemple : voir test WTNV123

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

4.4.8.11 'DRUCK_PRAGER'

Relation de comportement de type Drucker-Prager associée pour la mécanique des sols (cf. [R7.01.16] pour plus de détails). Les caractéristiques du matériau sont définies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01] sous les mots clés DRUCK_PRAGER et ELAS(_FO). On suppose toutefois que le coefficient de dilatation thermique est constant. L'écrouissage peut être linéaire ou parabolique.

- Modélisation supportées : THM, 3D, 2D
- Nombre de variables internes : 3
- $V1$: déformation déviatoire plastique cumulée, $V2$: déformation volumique plastique cumulée, V3 indicateur d'état.
- Exemple : voir tests SSNV168, WTNA101

4.4.8.12 'DRUCK_PRAG_N_A'

Relation de comportement de type Drucker-Prager non associée pour la mécanique des sols (cf. [R7.01.16] pour plus de détails). Les caractéristiques du matériau sont définies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01] sous les mots clés DRUCK_PRAGER et ELAS(_FO). On suppose toutefois que le coefficient de dilatation thermique est constant. L'écrouissage peut être linéaire ou parabolique.

- Modélisation supportées : THM, 3D, 2D
- Nombre de variables internes : 3
- $V1$: déformation déviatoire plastique cumulée, $V2$: déformation volumique plastique cumulée, $V3$ indicateur d'état.
- Exemple : voir test SSND104.

4.4.8.13 'VISC_DRUC_PRAG

Relation de comportement pour la modélisation élasto visco plastique des roches. L'élastoplasticité est de type Drucker Prager et le fluage est une loi puissance de type Perzyna. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé VISC_DRUC_PRAG (Cf. le document [R7.01.22] pour plus de détails).

- Modélisation supportées : 3D et THM
- Modélisations supportées : 3D, 2D, THM
- Nombre de variables internes : 4
- Signification : $V1$: variable d'écrouissage viscoplastique, $V2$: indicateur de plasticité (cf. Remarque 1) , $V3$: niveau d'écrouissage, $V4$: nombre d'itérations locales
- Exemple : voir tests SSNV211A,WTNV137A , WTNV138A

4.4.8.14 'HUJEUX'

Relation de comportement élasto-plastique cyclique pour la mécanique des sols (géomatériaux granulaires : argiles sableuses, normalement consolidées ou sur-consolidées, graves…). Ce modèle est un modèle multi-critères qui comporte un mécanisme élastique non linéaire, trois mécanismes plastiques déviatoires et un mécanisme plastique isotrope (Cf. [R7.01.23] pour plus de détails). Les données nécessaires au champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés HUJEUX et ELAS. Pour faciliter l'intégration de ce modèle, on peut utiliser le redécoupage automatique local du pas de temps (mot clé ITER_INTE_PAS).

- Modélisation supportées : 3D et THM
- Schémas d'intégration ouverts : 'NEWTON', 'NEWTON_PERT', 'NEWTON_RELI', 'SEMI_EXPLICITE', 'BASCULE_EXPLICIT', 'SPECIFIQUE'

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

- Nombre de variables internes : 50
- Signification : $V1$ à $V3$: facteurs d'écrouissage des mécanismes déviatoires monotones, $V4$: facteur d'écrouissage du mécanisme isotrope monotone, $V5$ à $V7$: facteurs d'écrouissage des mécanismes déviatoires cycliques, $V8$: facteur d'écrouissage du mécanisme isotrope cyclique, $V9$ à $V22$: variables d'histoire liées aux mécanismes cycliques, $V23$: déformation volumique plastique cumulée, $V24$ à $V31$: indicateurs d'état des mécanismes monotones et cycliques, $V32$: critère de Hill.
'INDETAC3','HIS34','HIS35','XHYZ1','XHYZ2','THYZ1','THYZ2','RHYZ','XHXZ1','XHXZ2','THXZ1','THXZ2','RHXZ','XHXY1','XHXY2','THXY1','THXY2','RHYZ'
- Exemple : voir tests SSNV197, SSNV204, SSNV205, WTNV132, WTNV133, WTNV134.

4.4.8.15 'JOINT_BANDIS'

Relation de comportement élastique non linéaire pour les joints hydrauliques en mécanique des roches. Dans la direction normale au joint, on a une relation hyperbolique entre la contrainte effective et l'ouverture du joint. Dans la direction tangentielle, on a un comportement élastique linéaire. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé JOINT_BANDIS (confer le document [R7.02.15] pour plus de détails).

- Modélisation supportées : PLAN_JHMS, AXIS_JHMS
- Nombre de variables internes : 1
- Signification : $V1$: perméabilité longitudinale de la fissure
- Exemple : voir tests WTNP125, WTNP126.

4.4.8.16 'LKR'

Relation de comportement pour la modélisation thermo-élasto(visco)plastique des roches. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé LKR (cf. le document [R7.01.40] pour plus de détails). L'opérateur tangent n'étant pas complet, il est possible d'utiliser la matrice de perturbation sous le mot clé TYPE_MATR_TANG. L'opérateur relatif à la prédiction élastique est celui de l'élasticité non linéaire spécifique à la loi.

- Modélisations supportées : 3D, 2D, THM
- Nombre de variables internes : 12
- Signification : $V1$: variable d'écrouissage du mécanisme plastique, $V2$: déformation plastique équivalente, $V3$: variable d'écrouissage du mécanisme viscoplastique, $V4$: déformation viscoplastique équivalente, $V5$: indicateur de contractance (0) ou de dilatance (1), $V6$:indicateur de viscplasticité, $V7$: indicateur de plasticité, $V8$: déformation élastique mécanique volumique, $V9$: déformation élastique thermique volumique, $V10$: déformation plastique volumique, $V11$: déformation viscoplastique volumique, $V12$: domaine
- Exemple : voir les tests SSNV206 , WTNV135 .

4.4.8.17 'Iwan'

Loi de comportement élasto-plastique multicritère en mécanique des sols adaptée pour le comportement déviatorique cyclique, écrite sous MFront. La loi de comportement d'Iwan [R7.01.38] permet de reproduire les courbes de dégradation du module de cisaillement.. Les données nécessaires au champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés Iwan.

- Modélisation supportées : 3D
- Schémas d'intégration ouverts : 'NEWTON', 'NEWTON_PERT',
- Nombre de variables internes : 103

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

- Signification : $V1$ à $V6$: termes du tenseur de déformations élastiques, $V7$ à $V18$: multiplicateurs plastiques scalaires des surfaces de charge, $V19$ à $V91$: termes des tenseurs d'écrouissage cinématique, $V92$ à $V103$: valeurs de la surface de charge
- Exemple : voir tests MFRON02, COMP012, SSNV205, SSNV207.

4.4.9 Comportements intégrés par un logiciel externe

4.4.9.1 'UMAT'

♦ **NB_VARI = nbvar**

UMAT est un format de routine Fortran familier des utilisateurs du code Abaqus, servant à intégrer leurs propres lois de comportement. Attention : l'utilisation de ces lois de comportement « à façon » implique une validation spécifique pour l'étude envisagée, car on se place hors du domaine qualifié de *Code_Aster*.

La bibliothèque dynamique contenant la routine UMAT doit être préparée avant l'exécution du calcul. Pour cela, l'utilisateur dispose d'un moyen simple de compiler cette bibliothèque en utilisant l'utilitaire « as_run --make_shared » (cf. [U1.04.00]).
Le couplage Umat – *Code_Aster* se traduit dans le fichier de commandes de la façon suivante :
- au niveau de COMPORTEMENT, le mot-clé RELATION='UMAT',
- toujours sous COMPORTEMENT, le mot_clé NB_VARI permettant de préciser le nombre de variables internes du comportement, et bien sûr les mots-clés habituels : GROUP_MA, DEFORMATION,
- On indique le chemin vers la bibliothèque sous le mot-clé LIBRAIRIE et le nom du symbole (nom de la routine contenue dans la bibliothèque) sous le mot-clé NOM_ROUTINE ;
- l'hypothèse des contraintes planes est prise en compte par la méthode de De Borst [R5.03.03] ;
- Les mots-clés relatifs à l'intégration locale : RESI_INTE_RELA, ITER_INTE_MAXI, ALGO_INTE, PARM_THETA ne sont pas utilisés.

Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé UMAT/UMAT_FO.
Les limitations actuelles de l'interface Aster-Umat sont :
- sortie des énergies : pour le moment, elles ne sont pas récupérées par Code_Aster,
- de même pas de couplage thermo-mécanique pour le moment.

Pour plus de détails sur l'utilisation d'UMAT dans Code_Aster, *cf.* [U2.10.01].

- Modélisations supportées : 3D, AXIS, D_PLAN
- Exemple : voir les tests UMAT001, UMAT002

4.4.9.2 'MFRONT'

MFRONT est un générateur de code permettant d'écrire et d'intégrer facilement des lois de comportement, il est développé par le CEA Cadarache dans le cadre de la plateforme PLEIADES (*cf.* http://tfel.sourceforge.net/).
L'utilisation de MFront dans le cadre présent, avec une loi « à façon » implique une validation spécifique pour l'étude envisagée, car on se place hors du domaine qualifié de **code_aster**.

La bibliothèque dynamique contenant la routine MFRONT doit être préparée avant l'exécution du calcul. Pour cela, l'utilisateur fera appel à la commande CREA_LIB_MFRONT (*cf.* [U7.03.04]).

Le couplage MFront – **code_aster** se traduit dans le fichier de commandes de la façon suivante :

- au niveau de COMPORTEMENT, le mot-clé RELATION='MFRONT',
- toujours sous COMPORTEMENT, les mots-clés habituels GROUP_MA, DEFORMATION (on peut utiliser en particulier des grandes déformations 'GDEF_LOG') ;

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

- on indique le chemin la bibliothèque sous le mot-clé UNITE_LIBRAIRIE (si l'on a utilisé CREA_LIB_MFRONT) ou LIBRAIRIE (si l'on a compilé la bibliothèque à la main) et le nom du symbole (nom de la routine contenue dans la bibliothèque) sous le mot-clé NOM_ROUTINE ;
- l'hypothèse des contraintes planes est prise en compte par la méthode de De Borst [R5.03.03] ;
- les mots-clés RESI_INTE_MAXI, ITER_INTE_MAXI sont transmis à loi MFront (*cf.* §4.10) ;
- les mots-clés ALGO_INTE, PARM_THETA ne sont pas utilisés.

Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé MFRONT/MFRONT_FO.
Si le fichier MFront le permet, des vérifications peuvent être faites sur les valeurs des paramètres matériaux. Le comportement en cas de dépassement des bornes est piloté par le mot-clé VERI_BORNE qui vaut 'ARRET' par défaut. Les autres choix possibles (pour un comportement en mode prototype) sont 'MESSAGE' (impression du message sans interruption du calcul) et 'SANS' (l'erreur est passée sous silence).

- Modélisations supportées : 3D AXIS D_PLAN
- Exemple : voir les tests MFRON01, MFRON02, MFRON03, MFRON04, MFRON05.

Plus d'informations sur l'utilisation de MFront dans code_aster dans la notice dédiée (*cf.* [U2.10.02]).

4.4.10 Comportement pour les poutres multifibres

4.4.10.1 'MULTIFIBRE'

Lorsque la modélisation comporte des éléments de poutres multifibres, il est nécessaire d'indiquer les mailles et groupes de mailles concernées par cette modélisation, de façon pointer sur le bon comportement : mot clef RELATION='MULTIFIBRE' sous COMPORTEMENT.
La définition du matériau se fait à l'aide des commandes : DEFI_COMPOR et AFFE_MATERIAU .

```
COMPF =DEFI_COMPOR(
   GEOM_FIBRE=GF, MATER_SECT=BETON,
   MULTIFIBRE= (
      _F(GROUP_FIBRE='SACI', MATER=ACIER, RELATION='VMIS_CINE_GC'),
      _F(GROUP_FIBRE='SBET', MATER=BETON, RELATION='MAZARS'),
   ),
)

CHMAT =AFFE_MATERIAU(
   MAILLAGE=MA,
   AFFE=_F( GROUP_MA = 'POUTRE', MATER = (ACIER,BETON,),),
   AFFE_COMPOR=_F(GROUP_MA = 'POUTRE', COMPOR=COMPF)
)
```

4.5 Opérande RELATION_KIT sous COMPORTEMENT

Pour les comportements spécifiques au béton et aux milieux poreux, RELATION_KIT permet de coupler plusieurs comportements. Pour les comportements mécaniques avec effets des transformations métallurgiques, RELATION_KIT permet de choisir le type de matériau traité (ACIER ou ZIRCALOY). Enfin pour modéliser des câbles frottants dans leur gaine (éléments CABLE_GAINE), RELATION_KIT permet de définir la loi de comportement du câble et la loi de frottement du câble dans sa gaine.

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

4.5.1 KIT associé au comportement métallurgique

/ 'ACIER'
/ 'ZIRC'

Permet de choisir pour toutes les lois de comportement métallurgiques (META_xxx) pour traiter un matériau de type acier ou de type Zircaloy. Le matériau type ACIER comporte au plus 5 phases métallurgiques différentes, le matériau ZIRC comporte au plus 3 phases métallurgiques différentes.
Exemples :

```
COMPORTEMENT =  (  RELATION     =  'META_P_INL'
                RELATION_KIT =  'ZIRC' )

COMPORTEMENT =  (  RELATION     =  'META_V_CL_PT_RE'
                RELATION_KIT =  'ACIER'   )
```

4.5.2 KIT associé au comportement du béton : 'KIT_DDI'

Permet d'additionner deux termes de déformations anélastiques définis par certaines lois de comportement déjà existantes dans COMPORTEMENT (Cf. [R5.03.60] pour plus de détails). On peut assembler un modèle de fluage du béton avec un comportement élastoplastique ou endommageant. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés ELAS(_FO) (**les deux lois doivent avoir le même module d'YOUNG**) et ceux correspondants aux deux modèles choisis.

Sous l'hypothèse que le fluage est un phénomène qui évolue plus lentement que la plasticité, on assimile la matrice tangente du modèle complet à celle de la plasticité. Ce choix nécessitera donc d'adapter les incréments du calcul aux temps caractéristiques des phénomènes modélisés afin de ne pas handicaper le calcul en terme de nombre d'itérations. Dans ce cas, les paramètres de convergence locaux (RESI_INTE_RELA et ITER_INTE_MAXI sous le mot clé CONVERGENCE) sont les mêmes pour l'intégration des deux modèles.

Avec les modèles de fluage :
- 'BETON_GRANGER'
- 'BETON_GRANGER_V'

peuvent être associés les modèles de comportement suivants :
- 'BETON_DOUBLE_DP'
- 'VMIS_ISOT_TRAC'
- 'VMIS_ISOT_PUIS'
- 'VMIS_ISOT_LINE'
- 'ROUSS_PR'
- 'BETON_DOUBLE_DP'

Avec le modèle de fluage
- 'BETON_UMLV'

peuvent être associés les modèles de comportement suivants :
- 'ENDO_ISOT_BETON',
- 'MAZARS'

Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DE BORST ou ANALYTIQUE suivant chaque modèle.

- Les variables internes de chaque loi sont cumulées dans le tableau des variables internes, et restituées loi par loi.

Exemple :

```
COMPORTEMENT = _F(   RELATION     = 'KIT_DDI'
                     RELATION_KIT = ('BETON_UMLV_FP', 'MAZARS'))
```

- Voir aussi test SSNV169

Avec le modèle de fluage
- 'FLUA_PORO_BETON'

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

peuvent être associés les modèles de comportement suivants :
- 'ENDO_PORO_BETON',

Modélisations supportées : 3D
Les variables internes de chaque loi sont cumulées dans le tableau des variables internes, et restituées loi par loi.
- Exemple :
  - COMPORTEMENT = _F(RELATION = 'KIT_DDI'
    - RELATION_KIT = ('FLUA_PORO_BETON', 'ENDO_PORO_BETON'))
    -

Voir aussi tes t SSNV237

Le formalisme KIT_DDI permet également associer le modèle global de plaque, GLRC_DM, qui met en œuvre l'endommagement couplé membrane-flexion, avec des modèles de plasticité de Von Mises, pour prendre en compte l'élasto-plasticité (en membrane seulement) :
- 'GLRC_DM'

peut être associés les modèles de comportement suivants :
- 'VMIS_ISOT_TRAC',
- 'VMIS_ISOT_LINE',
- 'VMIS_CINE_LINE',

Modélisation supportée : DKTG. Exemple : tests SSNS106F, SSNS106G

4.5.3 KIT associé au comportement des milieux poreux (modélisations thermo-hydro-mécanique)

Pour plus de détails sur les modélisations thermo-hydro-mécaniques et les modèles de comportement, on pourra consulter les documents [R7.01.10] et [R7.01.11], ainsi que la notice d'utilisation [U2.04.05].

4.5.3.1 Mot-clé RELATION

Les relations KIT_XXXX permettent de résoudre simultanément de deux à quatre équations d'équilibre. Les équations considérées dépendent du suffixe XXXX avec la règle suivante :

- M désigne l'équation d'équilibre mécanique,
- T désigne l'équation d'équilibre thermique,
- H désigne une équation d'équilibre hydraulique.
- V désigne la présence d'une phase sous forme vapeur (en plus du liquide)

Les problèmes thermo-hydro-mécaniques associés sont traités de façon totalement couplée.

Une seule lettre H signifie que le milieu poreux est saturé (une seule variable de pression p), par exemple soit de gaz, soit de liquide, soit d'un mélange liquide/gaz (dont la pression du gaz est constante).

Deux lettres H signifient que le milieu poreux est non saturé (deux variables de pression p), par exemple un mélange liquide/vapeur/gaz.

La présence des deux lettres HV signifie que le milieu poreux est saturé par un composant (en pratique de l'eau), mais que ce composant peut être sous forme liquide ou vapeur. Il n'y a alors qu'une équation de conservation de ce composant, donc un seul degré de liberté pression, mais il y a un flux liquide et un flux vapeur.

Le tableau ci-dessous résume à quel kit correspond chaque modélisation :

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

KIT_HM	D_PLAN_HM, D_PLAN_HMS, D_PLAN_HMD, AXIS_HM, AXIS_HMS, AXIS_HMD, 3D_HM, 3D_HMS, 3D_HMD
KIT_THM	D_PLAN_THM, D_PLAN_THMS, D_PLAN_THMD, AXIS_THM, AXIS_THMS, AXIS_THMD, 3D_THM, 3D_THMS, 3D_THMD
KIT_HHM	D_PLAN_HHM, D_PLAN_HHMS, D_PLAN_HHMD, AXIS_HHM, AXIS_HHMS, AXIS_HHMD, 3D_HHM, 3D_HHMS, 3D_HHMD
KIT_THH	D_PLAN_THHD, D_PLAN_THHS, AXIS_THHD, AXIS_THHS, 3D_THHD, 3D_THHS,
KIT_HH	D_PLAN_HHS, D_PLAN_HHD, AXIS_HHS, AXIS_HHD, 3D_HHS, 3D_HHD,
KIT_THV	D_PLAN_THVD , AXIS_THVD, 3D_THVD
KIT_THHM	D_PLAN_THHMS, D_PLAN_THHMD, AXIS_THHMS, AXIS_THHMD, 3D_THHM, 3D_THHMS, 3D_THHMD
KIT_HH2	3D_HH2S 3D_HH2D 3D_HH2SUDA AXIS_HH2D AXIS_HH2S D_PLAN_HH2D D_PLAN_HH2S D_PLAN_HH2SUDA
KIT_THH2	D_PLAN_THH2D, AXIS_THH2D, 3D_THH2D, D_PLAN_THH2S, AXIS_THH2S, 3D_THH2S
KIT_HH2M	D_PLAN_HH2M, D_PLAN_HH2MS, D_PLAN_HH2MD, AXIS_HH2M, AXIS_HH2MS, AXIS_HH2MD, 3D_HH2M, 3D_HH2MS, 3D_HH2MD
KIT_THH2M	D_PLAN_THH2MD, AXIS_THH2MD, 3D_THH2MD D_PLAN_THH2MS, AXIS_THH2MS, 3D_THH2MS, D_PLAN_HH2M_SI

4.5.3.2 Mot-clé RELATION_KIT

Pour chaque phénomène modélisé, on doit préciser dans RELATION_KIT :

- le modèle de comportement mécanique du squelette,
- le comportement des liquides/gaz,
- la loi hydraulique.
  - HYDR_UTIL (si le comportement mécanique est sans endommagement) : Signifie qu'aucune donnée matériau n'est rentrée « en dur ». Concrètement dans le cas saturé, il faudra définir les 6 courbes point par point (par DEFI_FONCTION) suivantes :
    - la saturation en fonction de la pression capillaire,
    - la dérivée de cette courbe,
    - la perméabilité relative au liquide en fonction de la saturation,
    - sa dérivée.
    - la perméabilité relative au gaz en fonction de la saturation,
    - sa dérivée.
  - HYDR_VGM (si le comportement mécanique est sans endommagement). Ici et uniquement pour les lois de couplage liquide/gaz 'LIQU_GAZ', 'LIQU_AD_GAZ' , 'LIQU_AD_GAZ' et 'LIQU_VAPE_GAZ_VAPE', les courbes de saturation, de perméabilités relatives à l'eau et au gaz et leur dérivées sont définies par le modèle de Mualem Van-Genuchten. L'utilisateur doit alors renseigner les paramètres de cette loi (n, Pr, Sr). Le modèle Mualem Van-Genuchten est le suivant :

$$k_r^w = \sqrt{S_{we}}\left(1-\left(1-S_{we}^{1/m}\right)^m\right)^2,\ k_r^{gz} = \sqrt{1-S_{we}}\left(1-S_{we}^{1/m}\right)^{2m}$$

et

$$S_{we} = \frac{1}{\left(1+\left(\frac{P_c}{P_r}\right)^n\right)^m} \text{ où } S_{we} = \frac{S_w - S_{wr}}{1-S_{wr}-S_{gr}} \text{ et } m = 1-\frac{1}{n}$$

  - HYDR_VGC (si le comportement mécanique est sans endommagement). Exactement la même chose que HYDR_VGM sauf pour la loi de perméabilité relative au gaz qui est une loi cubique :

$$k_r^{gz} = \left(1-S_w\right)^3$$

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

- HYDR_ENDO (si on utilise 'MAZARS' ou 'ENDO_ISOT_BETON') sous RELATION_KIT (ce mot clé permet de renseigner la courbe de saturation et sa dérivée en fonction de la pression capillaire ainsi que la perméabilité relative et sa dérivée en fonction de la saturation.

4.5.3.3 Comportements mécaniques du squelette (s'il y a modélisation mécanique M)

- 'ELAS'
- 'GONF_ELAS'
- 'MOHR_COULOMB'
- 'CJS'
- 'CAM_CLAY'
- 'BARCELONE'
- 'LAIGLE'
- 'DRUCK_PRAGER'
- 'DRUCK_PRAG_N_A'
- 'HOEK_BROWN_EFF'
- 'HOEK_BROWN_TOT'
- 'MAZARS'
- 'ENDO_ISO_BETON'
- 'HUJEUX'
- 'JOINT_BANDIS'

4.5.3.4 Comportements des liquides / gaz

'LIQU_SATU'
Loi de comportement pour un milieux poreux saturé par un seul liquide (confer [R7.01.11] pour plus de détails). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé THM_LIQ.

'LIQU_GAZ'
Loi de comportement pour un milieu poreux non saturé liquide/gaz sans changement de phase (confer [R7.01.11] pour plus de détails). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés THM_LIQ et THM_GAZ.

'GAZ'
Loi de comportement d'un gaz parfait c'est-à-dire vérifiant la relation $P/\rho = RT / Mv$ où P est la pression, ρ la masse volumique, Mv la masse molaire, R la constante de Boltzman et T la température (confer [R7.01.11] pour plus de détails). Pour milieu saturé uniquement. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé THM_GAZ.

'LIQU_GAZ_ATM'
Loi de comportement pour un milieu poreux non saturé avec un liquide et du gaz à pression atmosphérique (confer [R7.01.11] pour plus de détails). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés THM_LIQU.

'LIQU_VAPE_GAZ'
Loi de comportement pour un milieu poreux non saturé eau/vapeur/air sec avec changement de phase (confer [R7.01.11] pour plus de détails). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés THM_LIQ, THM_VAPE et THM_GAZ.

'LIQU_AD_GAZ_VAPE'
Loi de comportement pour un milieu poreux non saturé eau/vapeur/air sec/air dissous avec changement de phase (confer [R7.01.11] pour plus de détails).

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

Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés THM_LIQ, THM_VAPE, THM_GAZ et THM_AIR_DISS.

'LIQU_AD_GAZE'

Loi de comportement pour un milieu poreux non saturé eau/air sec/air dissous avec changement de phase (confer [R7.01.11] pour plus de détails). Il s'agit donc d'une version sans vapeu de la loi complète ci-dessous

Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés THM_LIQ, THM_GAZ et THM_AIR_DISS.

'LIQU_VAPE'

Loi de comportement pour un milieux poreux saturé par un composant présent sous forme liquide ou vapeur. avec changement de phase (confer [R7.01.11] pour plus de détails). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés THM_LIQ et THM_VAPE

4.5.3.5 La loi hydraulique

'HYDR_UTIL' (si le comportement mécanique est sans endommagement) : Signifie qu'aucune donnée matériau n'est rentrée « en dur ». Concrètement dans le cas saturé, il faudra définir les 6 courbes point par point (par DEFI_FONCTION) suivantes :

- la saturation en fonction de la pression capillaire,
- la dérivée de cette courbe,
- la perméabilité relative au liquide en fonction de la saturation,
- sa dérivée.
- la perméabilité relative au gaz en fonction de la saturation,
- sa dérivée.

'HYDR_VGM' (si le comportement mécanique est sans endommagement). Ici et uniquement pour les lois de couplage liquide/gaz 'LIQU_GAZ', 'LIQU_AD_GAZ_VAPE', 'LIQU_AD_GAZ' et 'LIQU_VAPE_GAZ', les courbes de saturation, de perméabilités relatives à l'eau et au gaz et leur dérivées sont définies par le modèle de Mualem Van-Genuchten. L'utilisateur doit alors renseigner les paramètres de cette loi (n, Pr, Sr). Le modèle Mualem Van-Genuchten est le suivant :

$$k_r^{gz}=\sqrt{1-S_{we}}\left(1-S_{we}^{1/m}\right)^{2\mathrm{m}} \text{ et } S_{we}=\frac{1}{\left(1+\left(\frac{P_c}{P_r}\right)^n\right)^m}$$

où

$$S_{we}=\frac{S_w-S_{wr}}{1-S_{wr}-S_{gr}} \text{ et } m=1-\frac{1}{n}.$$

'HYDR_VGC' (si le comportement mécanique est sans endommagement). Ici et uniquement pour les lois de couplage liquide/gaz 'LIQU_GAZ', 'LIQU_AD_GAZ_VAPE', 'LIQU_AD_GAZ' et 'LIQU_VAPE_GAZ', les courbes de saturation, de perméabilités relatives à l'eau et leur dérivées sont définies par le modèle de Mualem Van-Genuchten (voir ci-dessus). La perméabilité relative au gaz est définie par une loi cubique :

$k_r^{gz}=\left(1-S_w\right)^3$

L'utilisateur doit alors renseigner les paramètres de cette loi (n, Pr, Sr).

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

'HYDR_ENDO' (si on utilise 'MAZARS' ou 'ENDO_ISOT_BETON') sous RELATION_KIT (ce mot clé permet de renseigner la courbe de saturation et sa dérivée en fonction de la pression capillaire ainsi que la perméabilité relative et sa dérivée en fonction de la saturation.

4.5.3.6 Les combinaisons possibles

Selon la valeur du mot-clé RELATION='KIT_XXXX' choisie, tous les comportements ne sont pas licites dans RELATION_KIT (par exemple si on choisi un milieux poreux non saturé, on ne peut pas affecter un comportement de type gaz parfait). On résume ici toutes les combinaisons possibles.

Pour relation KIT_HM et KIT_THM :

```
('ELAS'              'GAZ'              'HYDR_UTIL')
('MOHR_COULOMB'      'GAZ'              'HYDR_UTIL')
('CJS'               'GAZ'              'HYDR_UTIL')
('HUJEUX'            'GAZ'              'HYDR_UTIL')
('LAIGLE'            'GAZ'              'HYDR_UTIL')
('CAM_CLAY'          'GAZ'              'HYDR_UTIL')
('JOINT_BANDIS'      'GAZ'              'HYDR_UTIL')
('MAZARS'            'GAZ'              'HYDR_ENDO')
('ENDO_ISOT_BETON'   'GAZ'              'HYDR_ENDO')

('ELAS'              'LIQU_SATU'        'HYDR_UTIL')
('MOHR_COULOMB'      'LIQU_SATU'        'HYDR_UTIL')
('CJS'               'LIQU_SATU'        'HYDR_UTIL')
('HUJEUX'            'LIQU_SATU'        'HYDR_UTIL')
('LAIGLE'            'LIQU_SATU'        'HYDR_UTIL')
('CAM_CLAY'          'LIQU_SATU'        'HYDR_UTIL')
('JOINT_BANDIS'      'LIQU_SATU'        'HYDR_UTIL')
('MAZARS'            'LIQU_SATU'        'HYDR_ENDO')
('ENDO_ISOT_BETON'   'LIQU_SATU'        'HYDR_ENDO')

('ELAS'              'LIQU_GAZ_ATM'     'HYDR_UTIL')
('MOHR_COULOMB'      'LIQU_GAZ_ATM'     'HYDR_UTIL')
('CJS'               'LIQU_GAZ_ATM'     'HYDR_UTIL')
('HUJEUX'            'LIQU_GAZ_ATM'     'HYDR_UTIL')
('LAIGLE'            'LIQU_GAZ_ATM'     'HYDR_UTIL')
('CAM_CLAY'          'LIQU_GAZ_ATM'     'HYDR_UTIL')
('MAZARS'            'LIQU_GAZ_ATM'     'HYDR_ENDO')
('ENDO_ISOT_BETON'   'LIQU_GAZ_ATM'     'HYDR_ENDO')
```

Pour relation KIT_HHM et KIT_THHM :

```
('ELAS'              'LIQU_GAZ'                 'HYDR_UTIL')
('GONF_ELAS'         'LIQU_GAZ'                 'HYDR_UTIL')
('MOHR_COULOMB'      'LIQU_GAZ'                 'HYDR_UTIL')
('CJS'               'LIQU_GAZ'                 'HYDR_UTIL')
('HUJEUX'            'LIQU_GAZ'                 'HYDR_UTIL')
('LAIGLE'            'LIQU_GAZ'                 'HYDR_UTIL')
('CAM_CLAY'          'LIQU_GAZ'                 'HYDR_UTIL')
('BARCELONE'         'LIQU_GAZ'                 'HYDR_UTIL')
('ELAS'              'LIQU_GAZ'                 'HYDR_VGM')
('GONF_ELAS'         'LIQU_GAZ'                 'HYDR_VGM')
('CJS'               'LIQU_GAZ'                 'HYDR_VGM')
('LAIGLE'            'LIQU_GAZ'                 'HYDR_VGM')
('CAM_CLAY'          'LIQU_GAZ'                 'HYDR_VGM'')
('BARCELONE'         'LIQU_GAZ'                 'HYDR_VGM')
```


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

```
('MAZARS'           'LIQU_GAZ'                'HYDR_ENDO')
('ENDO_ISOT_BETON'  'LIQU_GAZ'                'HYDR_ENDO')

('ELAS'             'LIQU_VAPE_GAZ'           'HYDR_UTIL')
('GONF_ELAS'        'LIQU_VAPE_GAZ'           'HYDR_UTIL')
('MOHR_COULOMB'     'LIQU_VAPE_GAZ'           'HYDR_UTIL')
('CJS'              'LIQU_VAPE_GAZ'           'HYDR_UTIL')
('HUJEUX'           'LIQU_VAPE_GAZ'           'HYDR_UTIL')
('LAIGLE'           'LIQU_VAPE_GAZ'           'HYDR_UTIL')
('CAM_CLAY'         'LIQU_VAPE_GAZ'           'HYDR_UTIL')
('BARCELONE'        'LIQU_VAPE_GAZ'           'HYDR_UTIL')
('ELAS'             'LIQU_VAPE_GAZ'           'HYDR_VGM')
('GONF_ELAS'        'LIQU_VAPE_GAZ'           'HYDR_VGM')
('CJS'              'LIQU_VAPE_GAZ'           'HYDR_VGM')
('LAIGLE'           'LIQU_VAPE_GAZ'           'HYDR_VGM')
('CAM_CLAY'         'LIQU_VAPE_GAZ'           'HYDR_VGM')
('BARCELONE'        'LIQU_VAPE_GAZ'           'HYDR_VGM')
('MAZARS'           'LIQU_VAPE_GAZ'           'HYDR_ENDO')
('ENDO_ISOT_BETON'  'LIQU_VAPE_GAZ'           'HYDR_ENDO')

('ELAS'             'LIQU_AD_GAZ_VAPE'        'HYDR_UTIL')
('GONF_ELAS'        'LIQU_AD_GAZ_VAPE'        'HYDR_UTIL')
('MOHR_COULOMB'     'LIQU_AD_GAZ_VAPE'        'HYDR_UTIL')
('CJS'              'LIQU_AD_GAZ_VAPE'        'HYDR_UTIL')
('HUJEUX'           'LIQU_AD_GAZ_VAPE'        'HYDR_UTIL')
('LAIGLE'           'LIQU_AD_GAZ_VAPE'        'HYDR_UTIL')
('CAM_CLAY'         'LIQU_AD_GAZ_VAPE'        'HYDR_UTIL')
('BARCELONE'        'LIQU_AD_GAZ_VAPE'        'HYDR_UTIL')
('ELAS'             'LIQU_AD_GAZ_VAPE'        'HYDR_VGM')
('GONF_ELAS'        'LIQU_AD_GAZ_VAPE'        'HYDR_VGM')
('CJS'              'LIQU_AD_GAZ_VAPE'        'HYDR_VGM')
('LAIGLE'           'LIQU_AD_GAZ_VAPE'        'HYDR_VGM')
('CAM_CLAY'         'LIQU_AD_GAZ_VAPE'        'HYDR_VGM')
('BARCELONE'        'LIQU_AD_GAZ_VAPE'        'HYDR_VGM')
('MAZARS'           'LIQU_AD_GAZ_VAPE'        'HYDR_ENDO')
('ENDO_ISOT_BETON'  'LIQU_AD_GAZ_VAPE'        'HYDR_ENDO')



('ELAS'             'LIQU_AD_GAZ'         'HYDR_UTIL')
('GONF_ELAS'        'LIQU_AD_GAZ'         'HYDR_UTIL')
('MOHR_COULOMB'     'LIQU_AD_GAZ'         'HYDR_UTIL')
('CJS'              'LIQU_AD_GAZ'         'HYDR_UTIL')
('HUJEUX'           'LIQU_AD_GAZ'         'HYDR_UTIL')
('LAIGLE'           'LIQU_AD_GAZ'         'HYDR_UTIL')
('CAM_CLAY'         'LIQU_AD_GAZ'         'HYDR_UTIL')
('BARCELONE'        'LIQU_AD_GAZ'         'HYDR_UTIL')
('ELAS'             'LIQU_AD_GAZ'         'HYDR_VGM')
('GONF_ELAS'        'LIQU_AD_GAZ'         'HYDR_VGM')
('CJS'              'LIQU_AD_GAZ'         'HYDR_VGM')
('LAIGLE'           'LIQU_AD_GAZ'         'HYDR_VGM')
('CAM_CLAY'         'LIQU_AD_GAZ'         'HYDR_VGM')
('BARCELONE'        'LIQU_AD_GAZ'         'HYDR_VGM')
('MAZARS'           'LIQU_AD_GAZ'         'HYDR_ENDO')
('ENDO_ISOT_BETON'  'LIQU_AD_GAZ'         'HYDR_ENDO')
```

Pour relation KIT_THH et le KIT_HH:

```
('LIQU_GAZ'         'HYDR_UTIL')
('LIQU_VAPE_GAZ'    'HYDR_UTIL')
('LIQU_AD_GAZ_VAPE' 'HYDR_UTIL')
```


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

```
('LIQU_AD_GAZ'      'HYDR_UTIL')
('LIQU_GAZ'         'HYDR_VGM')
('LIQU_VAPE_GAZ'    'HYDR_VGM')
('LIQU_AD_GAZ_VAPE' 'HYDR_VGM')
```

Pour relation KIT_THV :

```
('LIQU_VAPE'        'HYDR_UTIL')
```

Remarque :

En cas de problème de convergence il peut être très utile d'activer la recherche linéaire comme indiqué dans l'exemple donné en tête de cette section. La recherche linéaire n'améliore cependant pas systématiquement la convergence, elle est donc à manier avec précaution.

Exemple :

```
COMPORTEMENT =_F(
    RELATION     = 'KIT_THM',
    RELATION_KIT = ( 'LIQU_SATU', 'CJS', 'HYDR_UTIL'))
```

Dans cet exemple, on traite de manière couplée un problème thermo-hydro-mécanique pour un milieu poreux saturé, LIQU_SATU comme comportement du liquide, CJS comme comportement mécanique.

D'autres exemples sont disponibles, soit dans le document [U2.04.05], soit dans l'ensemble des tests WTNAxxx, WTNLxxx, WTNPxxx, WTNVxxx.

4.5.4 KIT associé à la modélisation des câbles frottants : KIT_CG

Pour modéliser des câbles frottants ou glissants, il est nécessaire de pouvoir renseigner à la fois le comportement à affecter au câble et la loi de comportement de frottement du câble dans sa gaine. On donne pour cela au mot-clé RELATION la valeur 'KIT_CG'. Dans le mot-clé RELATION_KIT, il faut renseigner la loi de comportement du câble (toutes celles acceptées par la modélisation BARRE) puis la loi de comportement de frottement qui est toujours CABLE_GAINE_FROT.
Pour plus de détails sur la loi de frottement, on pourra consulter la documentation de référence des éléments CABLE_GAINE [R3.08.10].

Exemple :

```
COMPORTEMENT = _F(  RELATION     = 'KIT_CG',
                    RELATION_KIT = ('ELAS', 'CABLE_GAINE_FROT'))
```

4.6 Opérande DEFORMATION

◊ **DEFORMATION**

Ce mot-clé permet de définir les hypothèses de utilisées pour le calcul des déformations : par défaut, on considère de petits déplacements et petites déformations.

4.6.1 DEFORMATION='PETIT'

Les déformations utilisées dans la relation de comportement sont les déformations linéarisées :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$$

Cela signifie que l'on reste en Hypothèse des Petites Perturbations : petits déplacements, petites rotations, petites déformations (inférieures à environ 5%)

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

4.6.2 DEFORMATION='GROT_GDEP'

Permet de traiter les grandes rotations et les grands déplacements, mais en restant en petites déformations, d'une manière spécifique suivant les modélisations :

- pour toutes les lois de comportement sous COMPORTEMENT munies des modélisations 3D, D_PLAN, AXIS et C_PLAN, les déformations utilisées dans la relation de comportement sont les déformations de GREEN-LAGRANGE : $E_{ij}=\frac{1}{2}(u_{i,j}+u_{j,i}+u_{k,i}.u_{k,j})$ [R5.03.22]
- pour traiter les grandes rotations et les petites déformations pour toutes les lois de comportement incrémentales sous COMPORTEMENT munies des modélisations COQUE_3D (anciennement GREEN_GR). C'est une formulation lagrangienne totale, permettant de calculer la configuration exacte pour de grandes rotations [R3,07,05].

Attention :

Il est fortement déconseillé d'utiliser la recherche linéaire pour les COQUE_3D avec l'option GROT_GDEP (parfois la convergence est impossible et si on converge, le calcul a besoin de plus d'itérations de Newton).

- pour traiter les grands déplacements et grandes rotations et les petites déformations pour les éléments de plaques et coques : modélisations DKT (uniquement en élasticité linéaire), DKTG (uniquement avec les comportements GLRC_*) et SHB.
- pour traiter les grands déplacements et grandes rotations et les petites déformations pour les modélisations POU_D_TGM et POU_D_EM (poutres multifibres) (anciennement REAC_GEOM). On fait l'hypothèse d'une réactualisation de la géométrie a chaque itération et l'on ajoute la rigidité géométrique a la rigidité matérielle pour former la rigidité tangente. En ce qui concerne les grandes rotations, au lieu de passer par une approche "exacte" complexe comme pour les POU_D_T_GD et COQUE_3D, on autorise des rotations modérées (du second ordre). Ce type de calcul des déformations permet de traiter avec efficacité des problèmes de poutres multifibres à comportement non linéaire, en rotations modérées [R3.08.09].

Remarques :

- pour les comportements hyperélastiques (tel ELAS_HYPER), cette option permet également le calcul en grandes déformations.

4.6.3 DEFORMATION='PETIT_REAC'

Les incréments de déformations utilisées pour la relation de comportement incrémental sont les déformations linéarisées de l'incrément de déplacement dans la géométrie réactualisée. C'est-à-dire si $X, u, \Delta u$ désignent respectivement la position, le déplacement et l'incrément de déplacement calculés à une itération donnée d'un point matériel [R5.03.24].

$$\Delta \epsilon_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial \Delta u_i}{\partial (X+u)_j}+\frac{\partial \Delta u_j}{\partial (X+u)_i}\right)$$

L'équilibre est donc résolu sur la géométrie actuelle mais le comportement reste écrit sous l'hypothèse des petites déformations. En conséquence, l'emploi de PETIT_REAC n'est donc pas approprié aux grandes rotations mais il l'est aux grandes déformations, sous certaines conditions [10] :

- très petits incréments,
- très petites rotations (ce qui implique un chargement quasi-radial)
- déformation élastiques petites devant les déformations plastiques,
- comportement isotrope.

En dehors de ces hypothèses, cette approximation peut donner de très mauvais résultats. Il convient donc de vérifier la convergence des résultats par rapport à la discrétisation.

Attention :

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

Il est déconseillé d'utiliser cette option avec les éléments de structure COQUE , COQUE_1D et POU (un message d'alarme apparaît dans le fichier .mess).

4.6.4 DEFORMATION='SIMO_MIEHE'

C'est une formulation incrémentalement objective en grandes déformations des lois de comportements s'appuyant sur un critère de Von Mises à écrouissage isotrope. La relation contraintes-déformations élastique est hyperélastique. Toute l'information sur le gradient de la transformation F est prise en compte, aussi bien la rotation que les déformations :

$$F_{ij} = \delta_{ij} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

Cela permet de réaliser des calculs en grandes déformations plastiques, avec les relations de comportement 'VMIS_ISOT_LINE', 'VMIS_ISOT_TRAC', 'ROUSSELIER' et tous les comportements, à écrouissage isotrope uniquement, associés à un matériau subissant des changements de phases métallurgiques (relations META_X_IL_XXX_XXX et META_X_INL_XXX_XXX,).

Cette formulation ajoute automatiquement au comportement choisi 6 variables internes, stockant à la fin les 6 composantes du tenseur $\frac{1}{2}\left(\boldsymbol{I}_d - \boldsymbol{b}^e \right)$ (cf. [R5.03.21]).

Attention :

Cette option n'est valable que pour les modélisations 3D , 2D , INCO_UPG (pas de contrainte plane avec la méthode DE BORST). Pour de plus amples informations sur la formulation des grandes déformations plastiques selon SIMO et MIEHE, on pourra se reporter à [R5.03.21].

En grandes déformations de type 'SIMO_MIEHE', les matrices tangentes ne sont pas symétriques à l'exception du cas (hyper)-élastique. Jusqu'à la version 7.4, on procédait à une symétrisation systématique de la matrice. Dorénavant, c'est la matrice non symétrique qui est fournie. S'il le souhaite, l'utilisateur peut néanmoins demander de la symétriser sous le mot-clé SOLVEUR = _F(SYME = 'OUI') . Attention : SYME = 'OUI' n'est pas le défaut. Les résolutions prendront donc a priori plus de temps avec cette nouvelle version si l'ont ne fait rien en ce qui concerne le fichier de commande. Par contre la matrice tangente non symétrique permettra une meilleure convergence.

4.6.5 DEFORMATION='GDEF_LOG'

C'est une formulation en grandes déformations utilisant une mesure de déformation logarithmique, issue d'une approche due à Miehe, Apel, Lambrecht. Elle permet d'utiliser des lois de comportement élastoplastiques ou visco-plastiques incrémentales suivantes (cf. [R5.03.24]) :

VMIS_ISOT_LINE, VMIS_ISOT_TRAC, VMIS_JOHN_COOK, VMIS_CINE_LINE, VMIS_ECMI_*, VMIS_CIN*_CHAB, VMIS_CIN2_MEMO, VISC_CIN*_CHAB, VISC_CIN2_MEMO, LEMAITRE.

Cette formulation n'est valable que pour les modélisations 3D , 2D. Elle permet une intégration incrémentalement objective des lois de comportement comme les modèles SIMO_MIEHE et GEDF_HYPO_ELAS. Toutefois, comme toutes les lois hypoélastiques, ces lois de comportement sont en toute rigueur limitées aux faibles déformations élastiques . Pour économiser du temps de calcul, un tenseur spécifique est stocké dans 6 variables internes supplémentaires. Le tenseur en question, $\boldsymbol{T}$ est le tenseur des contraintes exprimé dans l'espace logarithmique. Du fait qu'il soit stocké dans les variables internes, cela implique à l'utilisateur désirant utiliser le formalisme GDEF_LOG avec un champ de contrainte initial (ETAT_INIT) de se rapporter aux docs U4.51.03 et V6.03.159 (cas test ssnp159b).

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

4.6.6 Modèles de déformation pour MFront

Tous les modèles de grandes déformations existants dans code_aster sont utilisables avec des comportements MFront (RELATION='MFRONT'), en particulier 'PETIT_REAC', 'GROT_GDEP', 'SIMO_MIEHE' et 'GDEF_LOG'.

Les modèles PETIT_REAC et GDEF_LOG de code_aster s'appuient nécessairement sur une loi écrite en petites déformations.

Pour SIMO_MIEHE et GROT_GDEP , la loi MFront utilisée doit avoir explicitement été programmée pour supporter ces modèles (*cf.* [U2.10.02]).

4.7 Opérandes TOUT/GROUP_MA/MAILLE

```
/ TOUT      =  'OUI'
/ |  GROUP_MA  =  lgrma
  |  MAILLE    =  lma
```

Spécifient les mailles sur lesquelles la relation de comportement incrémentale est utilisée.

Remarque :

si vous ne précisez pas le comportement explicitement sur certains éléments du modèle, code_aster choisira RELATION='ELAS' et DEFORMATION='PETIT' par défaut sur ces éléments. Un message d'information est imprimé dans le fichier de message. Vous aurez une alarme explicite si vous n'affectez aucun élément du modèle dans une occurrence de COMPORTEMENT.

4.8 Opérandes RESI_CPLAN_RELA, RESI_CPLAN_MAXI, ITER_CPLAN_MAXI

La méthode de DE BORST permet d'ajouter la condition de contrainte plane à tous les modèles de COMPORTEMENT (pour plus de détail voir la documentation [R5.03.03]). L'hypothèse des contraintes planes est vérifiée à convergence. On préconise de réactualiser la matrice tangente assez souvent dans la méthode de Newton (MATRICE = 'TANGENTE' REAC_ITER = 1 à 3).

```
◊ / RESI_CPLAN_RELA =  /  1.E-6, [DEFAUT]
          /    ε_rela
 / RESI_CPLAN_MAXI =   /    ε_abso
```

Dans certains cas, la convergence est atteinte pour l'algorithme de Newton, mais pas pour la vérification de l'état de contraintes planes, ce qui conduit à des itérations supplémentaires, voire un re-découpage excessif du pas de temps. Ces mots clés permettent de dissocier la précision relative à l'intégration de la loi de comportement de celle utilisée pour vérifier l'hypothèse des contraintes planes. Pour cette vérification, deux critères sont possibles :

- soit un critère relatif : $|\sigma_{zz}| < ||\sigma|| \times \varepsilon_{rela}$
- soit un critère absolu : $|\sigma_{zz}| < \varepsilon_{abso}$

```
◊  ITER_CPLAN_MAXI =  / 1    [DEFAUT]
       / iter_cplan_maxi
```

Ce mot-clé permet d'améliorer la précision de l'algorithme de DE BORST : Il active une boucle supplémentaire au niveau du comportement de chaque point d'intégration, afin de mieux satisfaire les contraintes planes en cours des itérations globales de Newton.
La valeur par défaut ITER_CPLAN_MAXI=1 correspond exactement à la version initiale de la méthode. Sur certains tests (SSNV102B, SSNS106F, SSNS108A),ITER_CPLAN_MAXI > 1 permet de diminuer systématiquement le nombre d'itérations requis pour le processus global de Newton. Dans les études réalisée, avec endommagement, la robustesse du calcul a été nettement améliorée.

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

La méthode de DE BORST décrite ci-dessus a été généralisée au cas des comportements 1D (utilisés par les modélisations BARRE, GRILLE, GRILLE_MEMBRANE, POU_D_EM, POU_D_TGM). Ceci permet d'ajouter la condition de contrainte uniaxiale à tous les modèles de COMPORTEMENT (pour plus de détail voir la documentation [R5.03.09]). L'hypothèse des contraintes uniaxiales est vérifiée à convergence. On préconise d'utiliser et de réactualiser la matrice tangente assez souvent dans la méthode de Newton (MATRICE = 'TANGENTE' REAC_ITER = 1 à 3).

4.9 Opérande PARM_THETA

```
◊ PARM_THETA   =  /  1.              [DEFAUT]
                  /  theta           [R]
```

Pour les lois de comportement LEMAITRE, ROUSS_VISC, l'argument theta sert à l'intégration de la loi de comportement. Il peut prendre les valeurs 0.5 (semi-implicite) ou 1 (implicite).

4.10 Opérandes RESI_INTE_RELA/RESI_INTE_MAXI, ITER_INTE_MAXI

```
◊ RESI_INTE_RELA = /  1.E-6      [DEFAUT]
                   /  resint

 ◊ RESI _INTE_MAXI =   /   1.E-8,        [DEFAUT]
                     / resintmax,
◊ ITER_INTE_MAXI = /  20         [DEFAUT]
                   /  iteint
```

Dans certaines relations de comportement, une équation non linéaire ou un système non linéaire doivent être résolus localement (en chaque point de GAUSS). Ces opérandes (résidu et nombre maximum d'itérations dites internes) sont utilisés pour tester la convergence de cet algorithme itératif de résolution. Ils sont inutiles dans le cas où ALGO_INTE='ANALYTIQUE', 'SPECIFIQUE' ou 'SANS_OBJET'. Pour plus de détails, se reporter à la documentation de référence de chaque comportement.
Le mot-clé RESI_INTE_MAXI est utilisé uniquement par le couplage MFront – Code_Aster (*cf.* §4.4.9.2). Dans MFront, les intégrateurs implicite et explicite utilisent des variables qui sont des déformations (ou de même ordre de grandeur que les déformations). La valeur de RESI_INTE_MAXI est transmise au paramètre de convergence utilisé par MFront (@Epsilon), c'est donc un paramètre « absolu », sa valeur par défaut est la même que celle utilisée par MFront, soit 10^{-8}.

4.11 Opérande RESI_RADI_RELA

◊ RESI_RADI_RELA = tolrad

Mesure de l'erreur η due à la discrétisation en temps, directement reliée à la rotation de la normale à la surface de charge. On calcule l'angle entre $\boldsymbol{n}^-$, la normale au critère de plasticité au début du pas de temps (instant t-), et $\boldsymbol{n}^+$, la normale au critère de plasticité calculée à la fin du pas de temps de la façon suivante : $\eta = \frac{1}{2}\|\Delta \boldsymbol{n}\| = \frac{1}{2}\|\boldsymbol{n}^+ - \boldsymbol{n}^-\| = \left|\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right|$. Cela fournit une mesure de l'erreur (également utilisée pour le calcul de la composante ERR_RADI de l'option DERA_ELGA de CALC_CHAMP). Le pas de temps est découpé (via DEFI_LIST_INST) si $\eta > \mathrm{tolrad}$. Ce critère est opérationnel pour les comportements élastoplastiqus de Von Mises à écrouissage isotrope, cinématique linéaire et mixte : VMIS_ISOT_LINE, VMIS_ISOT_TRAC, VMIS_ISOT_PUIS, VMIS_CINE_LINE, VMIS_ECMI_LINE, VMIS_ECMI_TRAC, et pour les comportements élasto-visco-plastiques de Chaboche : VMIS_CIN1_CHAB, VMIS_CIN2_CHAB, VMIS_CIN2_MEMO, VISC_CIN1_CHAB, VISC_CIN2_CHAB, VISC_CIN2_MEMO.

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

4.12 Opérande ITER_INTE_PAS

```
◊  ITER_INTE_PAS = /  0          [DEFAUT]
                   /  itepas
```

Permet de redécouper localement le pas de temps pour faciliter l'intégration de la relation de comportement locale (en chaque point d'intégration). Si itepas vaut 0, 1 ou -1 il n'y a pas de redécoupage. Si itepas est positif, on redécoupe systématiquement le pas de temps localement en itepas petits pas de temps avant d'effectuer l'intégration de la relation de comportement. Si itepas est négatif, le redécoupage en |itepas| petits pas de temps n'est effectué qu'en cas de non convergence locale.

Attention : ce mot-clef n'est possible qu'avec DEFORMATION='PETIT', DEFORMATION='PETIT_REAC' et DEFORMATION='GROT_GDEP'. Il n'est pas utilisable en grandes déformations.

4.13 Opérande ALGO_INTE

```
◊  ALGO_INTE =  /'ANALYTIQUE'
      # methodes de resolution d'équations scalaires
          /' SECANTE '
          /' DEKKER '
          /' NEWTON_1D '
          /' BRENT '
      # methodes de resolution de systèmes d'équations
          /' NEWTON '
          /' NEWTON_RELI '
          /' NEWTON_PERT '
          /' RUNGE_KUTTA '
      # methodes de resolution spécifiques (pas de paramètre)
          /' SPECIFIQUE '
          /' SANS_OBJET '
```

Permet de préciser le type de schéma d'intégration pour résoudre l'équation ou le système d'équations non linéaires formé par les équations constitutives des modèles de comportement à variables internes : Une méthode de résolution par défaut est prévue pour chaque comportement. Toutefois, il est possible de modifier la méthode de résolution par défaut pour un certain nombre de comportements. Par exemple :

- le modèle VISC_ENDO_LEMA peut être intégré soit avec SECANTE, soit avec BRENT,
- le modèle VENDOCHAB peut être intégré soit avec NEWTON, soit avec RUNGE_KUTTA.
- le modèle MONOCRISTAL peut être intégré soit avec NEWTON, soit avec NEWTON_RELI, soit avec NEWTON_PERT, soit avec RUNGE_KUTTA.

4.14 Opérande TYPE_MATR_TANG

```
◊  TYPE_MATR_TANG=  /'PERTURBATION',
                    /'VERIFICATION',
                          ◊  VALE_PERT_RELA = / 1.E-5,  [DEFAUT]
                                              / perturb,[R]
```

Ce mot-clé permet la vérification de la matrice tangente pour un comportement donné. Il s'adresse principalement aux développeurs de lois de comportement, et son usage doit être réservé à des modèles comportant très peu d'éléments. En l'absence de ce mot-clé, la matrice tangente est calculée de façon classique.(Ces mots-clés s'utilisent conjointement à REAC_ITER=1).

- TYPE_MATR_TANG="PERTURBATION" permet d'utiliser la matrice tangente calculée par perturbation en lieu et place de la matrice tangente calculée par le comportement. La valeur de

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

la perturbation est donnée par perturb. Pour que cela puisse fonctionner indépendamment des unités, la perturbation est calculée de façon relative à la norme max de l'accroissement de déplacement sur l'élément : $\delta U = perturb \times max|U_i|$. Ceci n'est possible que pour les modélisations de milieux continus 2D et 3D, en mécanique pure, comportant seulement des degrés de liberté de déplacement.

- TYPE_MATR_TANG="VERIFICATION" concerne les développeurs qui veulent vérifier une matrice tangente élémentaire (sur un petit problème : un élément suffit : seules les dernières matrices sont conservées). La matrice par perturbation est stockée, ainsi que la matrice tangente cohérente, ce qui permet de les comparer. De plus le module python veri_matr_tang permet cette comparaison de façon aisée, ainsi que le test de symétrie de la matrice. Voir les tests COMP001 , COMP002 .

4.15 Opérande POST_ITER

◊ POST_ITER = /'CRIT_RUPT',

Définition d'une action à effectuer en post-traitement des itérations de Newton, à chaque pas de temps.

Dans le cas CRIT_RUPT, il s'agit d'un critère de rupture en contrainte critique. Si la plus grande contrainte principale moyenne dans un élément dépasse un seuil donné sigc, le module d'Young est divisé au pas de temps suivant par le coefficient coef. Ces deux coefficients sont définis sous le mot-clé CRIT_RUPT de l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01].

Ce critère est disponible pour les lois de comportement VISCOCHAB, VMIS_ISOT_TRAC(_LINE), VISC_ISOT_TRAC (_LINE) , et validé par les tests SSNV226A,B,C.

4.16 Opérande POST_INCR

◊ POST_INCR = /'REST_ECRO',

Définition d'une action à effectuer en post-traitement de chaque pas de temps d'un calcul thermomécanique.

Dans le cas REST_ECRO , le post-traitement consiste à modifier les variables internes afin de prendre en compte le phénomène de restauration d'écrouissage. La déformation plastique cumulée et/ou les composantes du tenseur décrivant le centre de la surface de charge sont multipliés par la fonction fonc_mult , à valeurs réelles dans [0,1] , et qui dépend de la température et éventuellement du temps. Cette fonction est renseignée sous le mot clé REST_ECRO de l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01].

Ce critère est disponible pour les lois de comportement VMIS_ISOT_TRAC(_LINE), VMIS_CINE_LINE et VMIS_ECMI_LINE, et pour les modélisations 3D, AXIS, D_PLAN et C_PLAN.
La validation de ce critère est réalisée dans les tests HSNV140A,B,C,D,E et ZZZZ367A.

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