

Manuel d'Utilisation
Fascicule U4.5- : Méthode de résolution
Document : U4.51.11

Comportements non linéaires

1 But

Ce document décrit les comportements non linéaires de *Code_Aster*, introduits dans les opérateurs `STAT_NON_LINE`, `SIMU_POINT_MAT`, `DYNA_NON_LINE`, ou `DYNA_TRAN_EXPLI`, par l'intermédiaire des mots-clés `COMP_INCR` ou `COMP_ELAS`.

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.

Table des matières

1 But 1	
2 Syntaxe	6
3 Nomenclature des modélisations.....	7
4 Mot clé COMP_INCR	8
4.1 Modélisation des contraintes planes en comportement incrémental.....	8
4.2 Modélisation locale et non locale.....	8
4.3 Opérande RELATION.....	9
4.3.1 Modèles élastiques et élasto-plastiques.....	9
4.3.1.1 'ELAS'.....	9
4.3.1.2 'ELAS-HYPER'	9
4.3.1.3 'VMIS_ISOT_TRAC'	9
4.3.1.4 'VMIS_ISOT_PUIS'	10
4.3.1.5 'VMIS_ISOT_LINE'	10
4.3.1.6 'VMIS_CINE_LINE'.....	10
4.3.1.7 'VMIS_ECMI_TRAC'	11
4.3.1.8 'VMIS_ECMI_LINE'	11
4.3.1.9 'VMIS_CIN1_CHAB'	11
4.3.1.10 'VMIS_CIN2_CHAB'	11
4.3.1.11 'DIS_CHOC'	12
4.3.1.12 'VMIS_POU_LINE'	12
4.3.1.13 'VMIS_POU_FLEJOU'	12
4.3.1.14 'ARME'.....	13
4.3.1.15 'ASSE_CORN'.....	13
4.3.1.16 'DIS_GOUJ2E_PLAS'	13
4.3.1.17 'DIS_GOUJ2E_ELAS'	13
4.3.1.18 'VMIS_ASYM_LINE'	13
4.3.2 Modèles élasto-viscoplastiques.....	14
4.3.2.1 'VISC_ISOT_LINE'	14
4.3.2.2 'VISC_ISOT_TRAC'	14
4.3.2.3 'LEMAITRE'	14
4.3.2.4 'VISC_CIN1_CHAB'	15
4.3.2.5 'VISC_CIN2_CHAB'	15
4.3.2.6 'NORTON_HOFF'	15
4.3.2.7 'VISC_TAHERI'	16
4.3.2.8 'MONOCRISTAL'	16
4.3.2.9 'POLYCRISTAL'	16
4.3.3 Comportements spécifiques aux crayons combustibles et métaux sous irradiation.....	16
4.3.3.1 'ZIRC_CYRA2'.....	16

4.3.3.2 'ZIRC_EPRI'	17
4.3.3.3 'VISC_IRRA_LOG'	17
4.3.3.4 'GRAN_IRRA_LOG'	17
4.3.3.5 GATT_MONERIE	17
4.3.3.6 'LEMAITRE_IRRA'	18
4.3.3.7 'LMARC'	18
4.3.3.8 'LMARC_IRRA'	18
4.3.3.9 'LEMA_SEUIL'	18
4.3.3.10 'IRRAD3M'	19
4.3.3.11 'DIS_GRICRA'	19
4.3.3.12 'DIS_CONTACT'	19
4.3.4 Modèles mécaniques avec effets des transformations métallurgiques	20
4.3.5 Modèles locaux et non locaux d'endommagement	22
4.3.5.1 'ENDO_FRAGILE'	22
4.3.5.2 'ROUSSELIER', 'ROUSS_PR', 'ROUSS_VISC'	22
4.3.5.3 'VENDOCHAB'	24
4.3.5.4 'CZM_EXP_REG'	24
4.3.5.5 'CZM_EXP'	24
4.3.5.6 'RUPT_FRAG'	24
4.3.6 Comportements spécifiques à la modélisation du béton et du béton armé	25
4.3.6.1 'ENDO_ISOT_BETON'	25
4.3.6.2 'ENDO_ORTH_BETON'	25
4.3.6.3 'MAZARS'	25
4.3.6.4 'BETON_DOUBLE_DP'	26
4.3.6.5 'LABORD_1D'	26
4.3.6.6 'GRILLE_ISOT_LINE'	27
4.3.6.7 'GRILLE_CINE_LINE'	27
4.3.6.8 'GRILLE_PINTO_MEN'	27
4.3.6.9 'PINTO_MENEGOTTO'	27
4.3.6.10 GLRC_DAMAGE	27
4.3.6.11 GLRC_DM	28
4.3.6.12 'CORR_ACIER'	28
4.3.6.13 'BETON_REGLE_PR'	28
4.3.6.14 'JOINT_BA'	29
4.3.6.15 'GRANGER_FP'	29
4.3.6.16 'GRANGER_FP_V'	29
4.3.6.17 'GRANGER_FP_INDT'	29
4.3.6.18 'BETON_UMLV_FP'	30
4.3.6.19 'BAZANT_FD'	30
4.3.7 Comportements mécaniques pour les géo-matériaux	30
4.3.7.1 'CJS'	30

4.3.7.2 'LAIGLE'	31
4.3.7.3 'HOEK_BROWN'	31
4.3.7.4 'HOEK_BROWN_EFF'	31
4.3.7.5 'HOEK_BROWN_TOT'	31
4.3.7.6 'CAM_CLAY'	31
4.3.7.7 'BARCELONE'	32
4.3.7.8 'DRUCKER_PRAGER'	32
4.3.8 Comportements intégrés par un logiciel externe	32
4.3.8.1 'ZMAT'	32
4.4 Opérande RELATION_KIT sous COMP_INCR	33
4.4.1 KIT associé au comportement métallurgique	33
4.4.2 KIT associé au comportement du béton : 'KIT_DDI'	33
4.4.3 KIT associé au comportement des milieux poreux (modélisations thermo-hydro- mécanique)	34
4.4.3.1 Mot-clé RELATION	34
4.4.3.2 Mot-clé RELATION_KIT	35
4.4.3.3 Comportements mécaniques du squelette (s'il y a modélisation mécanique M)	35
4.4.3.4 Comportements des liquides / gaz	35
4.4.3.5 Les combinaisons possibles	37
4.5 Opérande DEFORMATION sous COMP_INCR	39
4.5.1 DEFORMATION : 'PETIT'	39
4.5.2 DEFORMATION : 'PETIT_REAC'	39
4.5.3 DEFORMATION : 'SIMO_MIEHE'	39
4.5.4 DEFORMATION : COROTATIONNEL	40
4.5.5 DEFORMATION : 'GREEN'	40
4.5.6 DEFORMATION : 'GREEN_GR'	41
4.6 Opérandes TOUT / GROUP_MA / MAILLE sous COMP_INCR	41
4.7 Opérandes ALGO_C_PLAN, ALGO_1D	41
4.8 Opérande PARM_THETA sous COMP_INCR	41
4.9 Opérandes RESI_INTE_RELA / ITER_INTE_MAXI sous COMP_INCR	42
4.10 Opérande ITER_INTE_PAS, RESO_INTE sous COMP_INCR	42
5 Mot clé COMP_ELAS	42
5.1 Opérande RELATION sous COMP_ELAS	42
5.1.1 'ELAS'	42
5.1.2 'ELAS_HYPER'	43
5.1.3 'ELAS_VMIS_LINE'	43
5.1.4 'ELAS_VMIS_TRAC'	43
5.1.5 'ELAS_POUTRE_GR'	43
5.1.6 'CABLE'	43
5.2 Opérande DEFORMATION sous COMP_ELAS	43
5.2.1 DEFORMATION : 'PETIT'	44

5.2.2 DEFORMATION : 'GREEN'	44
5.2.3 DEFORMATION : 'GREEN_GR'	44
5.3 Opérandes TOUT / GROUP_MA / MAILLE sous COMP_ELAS	44
5.4 Opérandes RESI_INTE_RELA / ITER_INTE_MAXI sous COMP_ELAS	44

2 Syntaxe

```
♦ | COMP_INCR = _F (
  ♦ RELATION = / relations incrémentales décrites dans ce document
                / ...
  ◇ RELATION_KIT= / relations kit décrites dans ce document
                / ...
  ◇ DEFORMATION = / 'PETIT', [DEFAULT]
                  / 'PETIT_REAC',
                  / 'SIMO_MIEHE',
                  / 'GREEN',
                  / 'COROTATIONNEL',
                  / 'GREEN_GR',
                  / 'REAC_GEOM',
  ◇ / TOUT = 'OUI', [DEFAULT]
    / | GROUP_MA= lgrma, [l_gr_maille]
      | MAILLE = lma, [l_maille]
  ◇ ALGO_C_PLAN = / 'ANALYTIQUE' [DEFAULT]
                  / 'DEBORST'
  ◇ ALGO_1D = / 'ANALYTIQUE' [DEFAULT]
              / 'DEBORST'
  ◇ PARM_THETA = / 1. , [DEFAULT]
                 / theta, [R]
  ◇ RESI_INTE_RELA = / 1.E-6, [DEFAULT]
                    / resint, [R]
  ◇ ITER_INTE_MAXI = / 10, [DEFAULT]
                    / iteint, [I]
  ◇ ITER_INTE_PAS = / 0, [DEFAULT]
                   / itepas, [I]
  ◇ RESO_INTE = / 'IMPLICITE', [DEFAULT]
                / 'RUNGE_KUTTA_2',
                / 'RUNGE_KUTTA_4'
),

| COMP_ELAS = _F (
  ♦ RELATION = / 'ELAS', [DEFAULT]
                / relations élastiques décrites dans ce document
                / ...
  ◇ DEFORMATION = / 'PETIT', [DEFAULT]
                  / 'GREEN',
                  / 'GREEN_GR',
  ◇ / TOUT = 'OUI' [DEFAULT]
    / | GROUP_MA= lgrma [l_gr_maille]
      | MAILLE = lma [l_maille]
  ◇ RESI_INTE_RELA = / 1.E-6, [DEFAULT]
                    / resint, [R]
  ◇ ITER_INTE_MAXI = / 10, [DEFAULT]
                    / iteint, [I]
),
```

3 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** = les modélisations 3D_INCO, AXIS_INCO et D_PLAN_INCO
- 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, COQUE_C_PLAN, COQUE_D_PLAN
- 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 PMF et GRILLE
- Modélisation **THM** = les modélisations thermo_hydro_mécaniques
- Modélisation **GRAD_EPSI** = les modélisations 3D_GRAD_EPSI, D_PAN_GRAD_EPSI et C_PLAN_GRAD_EPSI
- Modélisation **GRAD_VARI** = les modélisations 3D_GRAD_VARI, D_PAN_GRAD_VARI, C_PLAN_GRAD_VARI et AXIS_GRAD_VARI
- Modélisation **FISSURE** = PLAN_FISSURE, AXIS_FISSURE

Remarque :

Si une loi de comportement est utilisée avec l'une des modélisations INCO (pour incompressible), il est nécessaire d'utiliser uniquement la matrice tangente (mot clé facteur PREDICTION='TANGENTE', MATRICE='TANGENTE' et REAC_ITER=1 sous NEWTON de STAT_NON_LINE [U4.51.03] et DYNA_NON_LINE [U4.53.01]). Dans le cas contraire, on s'arrête en erreur fatale.

4 Mot clé COMP_INCR

Ce mot clé facteur permet de définir les relations de comportement pour lesquelles l'histoire du matériau influe sur son comportement : la plupart des lois de comportement (en particulier en plasticité) s'écrivent alors de façon incrémentale. L'histoire vue par le matériau est stockée dans les variables internes. On peut avoir dans le même calcul certaines parties de la structure obéissant à divers comportements incrémentaux (COMP_INCR) et d'autres parties obéissant à divers comportements élastiques (COMP_ELAS).

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 en comportement incrémental

Certains modèles de comportements n'ont pas été développés en contraintes planes. Cependant, le mot clé ALGO_C_PLAN permet d'ajouter cette condition à tous les modèles : l'algorithme dénommé 'DEBORST' 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 – 'ANALYTIQUE' dans le langage Aster - 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 utilisations 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, il faut utiliser le mot clé ALGO_1D (METHODE = 'DEBORST'). Ceci est précisé pour chaque comportement. La méthode DEBORST n'est pas compatible avec les comportements métallurgiques ni avec DEFORMATION = 'SIMO_MIEHE'.

4.2 Modélisation locale et non locale

Dans le cas de comportements adoucissants, comme l'endommagement, 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. Le mot clé MODELISATION permet d'activer dans l'opérateur STAT_NON_LINE le mot clé LAGR_NON_LOCAL (et SOLV_NON_LOCAL), algorithme de résolution spécifique aux modèles non locaux. Tout modèle écrit en non local entraîne l'introduction d'une caractéristique du matériau supplémentaire, la longueur caractéristique qui est définie sous le mot clé facteur NON_LOCAL de l'opérateur DEFI_MATERIAU.

La réponse d'une modélisation non locale est indépendante du maillage. Il existe deux types de lois en non local :

- Le premier est activé dans AFFE_MODELE par le mot clé MODELISATION : '3D_GRAD_EPSI', 'D_PLAN_GRAD_EPSI' ou 'C_PLAN_GRAD_EPSI'. Il s'agit de lois non locales régularisées sur la déformation. On définit un champ de déformation régularisée, liée à la déformation locale classique par un opérateur régularisant qui a pour objectif de limiter les concentrations de déformations (Cf. [R5.04.02] pour plus de détail).
- Le second type est activé dans AFFE_MODELE par le mot clé MODELISATION : '3D_GRAD_VARI', 'D_PLAN_GRAD_VARI', 'C_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.

Les modèles non locaux étant plus sophistiqués que leur équivalent en local, le calcul est plus coûteux en temps de calcul. La première modélisation GRAD_EPSI est néanmoins plus rapide que la modélisation GRAD_VARI.

4.3 Opérande RELATION

4.3.1 Modèles élastiques et élasto-plastiques

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.

4.3.1.1 'ELAS'

Relation de comportement élastique incrémentale : elle permet de prendre en compte des déplacements et contraintes initiaux donnés sous le mot clé `ETAT_INIT`. 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.

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`, `POU`, `CONT_1D`, `SHB8`.
- Nombre de variables internes : 1
- Signification : `V1` : vide donc vaut toujours zéro
- avec les déformations de type `SIMO_MIEHE` uniquement, `V1` est égale à la trace du tenseur de déformations élastiques divisée par 3.

4.3.1.2 'ELAS-HYPER'

Relation de comportement hyper-élastique incrémentale : elle permet de prendre en compte des déplacements et contraintes initiaux donnés sous le mot clé `ETAT_INIT`. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous le mot clé `ELAS_HYPER`. Cette relation n'est supportée qu'en grandes déformations (`DEFORMATION='GREEN'`) cf.[R5.03.23].

- Modélisations supportées: 3D, `D_PLAN`, `C_PLAN`
- Nombre de variables internes : 1
- Signification : `V1` : vide donc vaut toujours zéro
- Exemple : voir test `SSNV187`.

4.3.1.3 '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`, `CONT_PLAN`, `CONT_1D`, `SHB8`.
- Nombre de variables internes : 2
 - `V1` : déformation plastique cumulée,
 - `V2` : indicateur de plasticité (0 pour élastique, 1 pour plastique).
- Avec les déformations de type `SIMO_MIEHE` uniquement, une variable interne supplémentaire `V3` : trace du tenseur de déformations élastiques divisée par 3 utilisée pour la formulation `SIMO_MIEHE`. Exemple : test `SSNV501`.

- Modélisation non locale supportée : `GRAD_VARI`.
- Nombre de variables internes : 6
 - V1 : déformation plastique cumulée,
 - V2 à V4 : 3 composantes du gradient de la déformation plastique cumulée,
 - V5 : variable nulle (non utilisée),
 - V6 : indicateur d'endommagement (0 si élastique, 1 si plastique et solution régulière, 2 si plastique et solution singulière).
- Exemple : : test SSNV156

4.3.1.4 '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` (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`.
- Nombre de variables internes : 2
- Signification : V1 : déformation plastique cumulée, V2 : indicateur de plasticité (0 pour élastique, 1 pour plastique).
- Exemple : voir test COMP002.

4.3.1.5 '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`, `INCO`.
- Nombre de variables internes : 2
- Signification (hormis modélisation `BARRE`) : V1 : déformation plastique cumulée, V2 : indicateur de plasticité (0 pour élastique, 1 pour plastique).
- Exemple : voir test SSNP156.

Avec les déformations de type `SIMO_MIEHE` uniquement, une variable interne supplémentaire V3 : trace du tenseur de déformations élastiques divisée par 3 utilisée pour la formulation `SIMO_MIEHE`. Exemple : voir test SSNA111.

- Modélisation non locale supportée : `GRAD_VARI`
- Nombre de variables internes : 6
- Signification : V1 : déformation plastique cumulée, V2 à V4 : 3 composantes du gradient de la déformation plastique cumulée, V5 : variable nulle (inutile), V6 : indicateur d'endommagement (0 si élastique, 1 si plastique et solution régulière, 2 si plastique et solution singulière).
- Exemple : voir test SSNV15.

4.3.1.6 '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)` (Cf. [R5.03.02] pour plus de détails).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, `INCO`, `CONT_PLAN` (méthode 'DEBORST'), `CONT_1D`
- Nombre de variables internes (hormis les modélisations `BARRE` et `PMF`) : 7
- Signification : V1 à V6 : 6 composantes du tenseur d'écrouissage cinématique **X**, V7 : indicateur de plasticité (0 pour élastique, 1 pour plastique).
- Nombre de variables internes pour les modélisations `BARRE`, `PMF` : 2
- Exemple : voir test SSNP14.

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

4.3.1.8 'VMIS_ECMI_LINE'

Relation de comportement d'élasto-plasticité de VON MISES à écrouissage combiné, cinématique linéaire et isotrope linéaire (Cf. [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, CONT_PLAN, CONT_1D (par DEBORST).
- Nombre de variables internes : 8
- Signification : V1 : déformation plastique cumulée, V2 : indicateur de plasticité (0 pour élastique, 1 pour plastique), V3 à V8 : 6 composantes du tenseur d'écrouissage cinématique α .
- Exemple : voir test SSNP102

4.3.1.9 '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(_FO)`, `ELAS(_FO)` (Cf. [R5.03.04] pour plus de détails).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DEBORST), CONT_1D (par DEBORST).
- Nombre de variables internes : 8
- V1 : déformation plastique cumulée, V2 : indicateur de plasticité (0 pour élastique, 1 pour plastique), V3 à V8 : 6 composantes du tenseur d'écrouissage cinématique α .

4.3.1.10 '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(_FO)`, `ELAS(_FO)` (Cf. [R5.03.04] pour plus de détails).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DEBORST), CONT_1D (par DEBORST).
- Nombre de variables internes : 14

- Signification : V1 : déformation plastique cumulée, V2 : indicateur de plasticité (0 pour élastique, 1 pour plastique), V3 à V8 : 6 composantes du 1^{er} tenseur de la variable cinématique α_1 , V9 à V14 : 6 composantes du 2^{ème} tenseur de la variable cinématique α_2 .
- Exemple : voir test SSNV101A

4.3.1.11 '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 (donc de type élasto-plastique). 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 : 7
- 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.
- Signification : V1 et V2 : déplacements (différentiels entre les nœuds 1 et 2 si on a une maille SEG2) dans les directions locales y et z, respectivement, V3 et V4 : vitesse (différentielles entre les nœuds 1 et 2 si on a une maille SEG2) dans les directions locales y et z, respectivement, V5 et V6 : forces internes dans les directions locales y et z, respectivement, V7 : indicateur d'adhérence (0 si glissement, 1 si adhérence).
- Exemple : voir test SDND100.

4.3.1.12 'VMIS_POU_LINE'

Relation de comportement élasto-plastique isotherme des éléments de poutre avec critère global de plasticité. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous le mot clé `VMIS_POUTRE`, et `ECRO_LINE` pour l'écrouissage qui est linéaire (Cf. [R5.03.30] pour plus de détails). L'intégration de ce modèle peut se faire soit avec une méthode implicite soit avec la méthode `RUNGE_KUTTA_4` (voir le mot clé `RESO_INTE`).

- Modélisations supportées : `POU`
- Nombre de variables internes : 9
- Signification : V1 : déformation plastique suivant l'axe X, V2 à V4 : courbure plastique suivant les axes Y, Z et X respectivement, V6 et V7 : variables internes utilisées en post traitement pour le calcul des pylônes, V8 et V9 : courbure plastique cumulée suivant l'axe Y et Z respectivement.
- Exemple : voir test SSNL106

4.3.1.13 'VMIS_POU_FLEJOU'

Relation de comportement élasto-plastique isotherme des éléments de poutre avec critère global de plasticité. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous le mot clé `VMIS_POUTRE`, et `ECRO_FLEJOU` pour l'écrouissage qui est non linéaire (Cf. [R5.03.30] pour plus de détails). L'intégration de ce modèle peut se faire soit avec une méthode implicite soit avec la méthode `RUNGE_KUTTA_4` (voir le mot clé `RESO_INTE`).

- Modélisations supportées : `POU`
- Nombre de variables internes : 9
- Signification : V1 : déformation plastique suivant l'axe X, V2 à V4 : courbure plastique suivant les axes Y, Z et X respectivement, V6 et V7 : variables internes utilisées en post traitement pour le calcul des pylônes, V8 et V9 : courbure plastique cumulée suivant l'axe Y et Z respectivement.
- Exemple : voir test SSNL106

4.3.1.14 '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` [R5.03.31].

- Modélisations supportées : `3D_DIS`
- Nombre de variables internes : 1
- Signification : `V1` : valeur maximale atteinte de la quantité en valeur absolue ($u_y - u_{le}$) où u_y est le déplacement dans la direction locale y de la maille `SEG2` et le le déplacement limite du domaine élastique.
- Exemple : voir test `SSNL101`.

4.3.1.15 '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`.

4.3.1.16 '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 (Cf. [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 (0 si élastique, 1 si plastique).
- Exemple : voir test `ZZZZ120`

4.3.1.17 '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 (Cf. [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).

4.3.1.18 'VMIS_ASYM_LINE'

Relation de comportement isotherme uniaxiale d'élastoplasticité 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 en traction, `V3` : déformation plastique cumulée en compression, `V4` : indicateur de plasticité en compression.
- Exemple : voir test `SSNL112`.

4.3.2 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.

4.3.2.1 '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 (Cf. [R5.03.21]). Les paramètres visqueux sont à renseigner sous le mot-clé `VISC_SINH` dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU`.

- Modélisations supportées : 3D, 2D et INCO
- Intégration : implicite
- Nombre de variables internes : 3
- Signification : V1 : déformation plastique cumulée, V2 : indicateur de plasticité (0 pour élastique, 1 pour plastique), V3 : trace du tenseur de déformations élastiques divisée par 3 utilisée pour la formulation `SIMO_MIEHE`.
- Exemple : voir test SSNL129D

4.3.2.2 '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` (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`.

La loi de viscosité est une loi en sinus hyperbolique (Cf. [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.
- Intégration : implicite
- Nombre de variables internes : 3
- Signification : V1 : déformation plastique cumulée, V2 : indicateur de plasticité (0 pour élastique, 1 pour plastique), V3 : trace du tenseur de déformations élastiques divisée par 3 utilisée pour la formulation `SIMO_MIEHE`.
- Exemple : voir test SSNL129A

4.3.2.3 '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)` (Cf. [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 `DEBORST`), `INCO`, `CONT_1D` (par `DEBORST`)
- Nombre de variables internes : 2
- Signification : V1 : déformation plastique cumulée, V2 : vide donc vaut toujours 0.
- Exemple : voir test SSNA104

4.3.2.4 'VISC_CIN1_CHAB'

Relation de comportement de J.L.Chaboche (rend compte du comportement cyclique du matériau) en élasto-viscoplasticité avec un tenseur d'écroissage cinématique non linéaire, un écroissage isotrope non linéaire, un effet d'écroissage 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(_FO)`, `ELAS(_FO)` (Cf. [R5.03.04] pour plus de détails) et `LEMAITRE` pour la viscosité. L'intégration est totalement implicite.

- Modélisations supportées : 3D, 2D, `CONT_PLAN` (par `DEBORST`), `INCO`, `CONT_1D` (par `DEBORST`)
- Nombre de variables internes : 8
- Signification : V1 : déformation visco-plastique cumulée, V2 : indicateur de plasticité (0 pour élastique, 1 pour plastique), V3 à V8 : 6 composantes du tenseur d'écroissage cinématique α .
- Exemple : voir test HSNV124

4.3.2.5 'VISC_CIN2_CHAB'

Relation de comportement de J.L.Chaboche (rend compte du comportement cyclique du matériau) en élasto-viscoplasticité avec 2 tenseurs d'écroissage cinématique non linéaire, un écroissage isotrope non linéaire, un effet d'écroissage 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(_FO)`, `ELAS(_FO)` (Cf. [R5.03.04] pour plus de détails) et `LEMAITRE` pour la viscosité. L'intégration est totalement implicite.

- Modélisations supportées : 3D, 2D, `CONT_PLAN` (par `DEBORST`), `INCO`, `CONT_1D` (par `DEBORST`)
- Nombre de variables internes : 14
- Signification : V1 : déformation visco-plastique cumulée, V2 : indicateur de plasticité (0 pour élastique, 1 pour plastique), V3 à V8 : 6 composantes du 1^{er} tenseur de la variable cinématique α_1 , V9 à V14 : 6 composantes du 2^{ème} tenseur de la variable cinématique α_2 .
- Exemple : voir test HSNV124

4.3.2.6 '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` (Cf. [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`
- Nombre de variables internes : 1
- Signification : V1 : vide donc vaut 0.
- Exemple : voir test SSNV124

4.3.2.7 '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)` (Cf. [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 `DEBORST`), `INCO`, `CONT_1D` (par `DEBORST`).
- 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).

4.3.2.8 '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` ; pour plus de précisions consulter [R5.03.11].

- Modélisations supportées : 3D, 2D, `CONT_PLAN` (par `DEBORST`), `CONT_1D` (par `DEBORST`).
- Exemple : voir test `SSNV194`

4.3.2.9 '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 fonction des choix effectués dans `DEFI_COMPOR` ; pour plus de précisions consulter [R5.03.11].

- Modélisations supportées : 3D
- Exemple : voir test `SSNV171`

4.3.3 Comportements spécifiques aux crayons combustibles et métaux sous irradiation

4.3.3.1 'ZIRC_CYRA2'

Relation de comportement visco-plastique non linéaire pour la gaine en Zircaloy du crayon combustible (loi de `CYRANO2`). Cette relation décrit le fluage avec une formulation en écrouissage pour le temps (time-hardening). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous les mots clés `ZIRC_CYRA2` et `ELAS` (Cf. [R5.03.08] pour plus de détails). Pour l'intégration de cette loi, on conseille d'utiliser une intégration semi-implicite en utilisant `PARM_THETA = 0.5, RESO_INTE = 'IMPLICITE'`).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, `CONT_PLAN` (par `DEBORST`), `CONT_1D` (par `DEBORST`).
- Nombre de variables internes : 2
- Signification : V1 : déformation plastique cumulée, V2 : vide donc vaut toujours 0.
- Exemple : test `SSNV109`

4.3.3.2 'ZIRC_EPRI'

Relation de comportement visco-plastique non linéaire pour la gaine en Zircaloy du crayon combustible (utilisée dans le programme ESCORE de l'EPRI). Cette relation décrit le fluage avec une formulation en écrouissage pour le temps (time-hardening). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous les mots clés `ZIRC_EPRI` et `ELAS` (Cf. [R5.03.08] pour plus de détails). Pour l'intégration de cette loi, on conseille d'utiliser une intégration semi-implicite en utilisant `PARM_THETA = 0.5`, `RESO_INTE = 'IMPLICITE'`.

- Modélisations supportées : 3D, 2D, `CONT_PLAN` (par `DEBORST`), `CONT_1D` (par `DEBORST`).
- Nombre de variables internes : 2
- Signification : `V1` : déformation plastique cumulée, `V2` : vide donc vaut toujours 0.
- Exemple : test SSNV111

4.3.3.3 'VISC_IRRA_LOG'

Loi de fluage axial sous irradiation des assemblages combustibles. Elle permet de modéliser le fluage primaire et secondaire, paramétrés 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 `DEBORST`), `CONT_1D`.
- Nombre de variables internes : 1 `V1` : déformation visco-plastique équivalente cumulée,
- Exemple : voir test SSNV113

4.3.3.4 '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 `DEBORST`), `CONT_1D`.
- Nombre de variables internes : 1 `V1` : déformation visco-plastique équivalente cumulée,
- Exemple : voir test SSNL128

4.3.3.5 GATT_MONERIE

La loi de comportement thermomécanique du combustible "Gatt-Monerie" permet de simuler des essais d'indentation (cf. [R5.03.08]). Cette loi de comportement est une loi élasto-viscoplastique isotrope sans écrouissage dont les spécificités sont :

- le potentiel de dissipation est la somme de deux potentiels de type Norton (sans seuil),
- le combustible présentant une porosité résiduelle susceptible d'évoluer en compression (densification), ce potentiel dépend, en plus de la contrainte équivalente, de la contrainte hydrostatique.
- Modélisations supportées : 3D, 2D, `CONT_PLAN` (par `DEBORST`), `CONT_1D` (par `DEBORST`).
- Nombre de variables internes : 2
- Les deux variables internes de ce modèle sont la déformation plastique cumulée et la fraction volumique de porosité,
- Exemple : voir test SSNA114.

4.3.3.6 '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`. Pour les poutres, le fluage et le grandissement n'ont lieu que dans le sens axial de la poutre : dans les autres directions, le comportement est élastique. 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, RESO_INTE='IMPLICITE'`.

- Modélisations supportées : 3D, 2D, `CONT_PLAN` (par `DEBORST`), `CONT_1D` (par `DEBORST`).
- Nombre de variables internes : 2. V1 : déformation plastique cumulée, V2 : nulle
- Pour la modélisation `POU` : V1 : déformation plastique cumulée, V2 : valeur de l'irradiation au point de Gauss considéré.
- Exemple : voir test SSNL121.

4.3.3.7 'LMARC'

Modèle phénoménologique développé au LMA-RC de Besançon pour obtenir une description fine du comportement des tubes de gaine en Zircaloy du crayon combustible des centrales REP qui présentent un comportement mécanique anisotrope et fortement visqueux [R5.03.10]. Les propriétés matériau sont définies dans `DEFI_MATERIAU` sous les mots-clés `ELAS(_FO)` et `LMARC(_FO)`.

- Modélisations supportées : 3D, 2D, `CONT_PLAN` (par `DEBORST`), `CONT_1D` (par `DEBORST`).
- Variables internes : 20
- trois variables d'écrouissage cinématique. X, X1, X2 (18 variables internes)
 - déformation viscoplastique cumulée p
 - indicateur de plasticité
 - Exemple : voir test SSNV117

4.3.3.8 'LMARC_IRRA'

Relation de comportement de viscoplasticité du LMARC avec prise en compte de l'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 `LMARC_IRRA`. Pour les poutres, le fluage n'a lieu que dans le sens axial de la poutre : dans les autres directions, le comportement est élastique.

- Modélisations supportées : `POU` (uniquement `POU_D_T` et `POU_D_E`).
- Nombre de variables internes : 5
 - trois variables d'écrouissage cinématique. X, X1, X2
 - déformation viscoplastique cumulée p
 - valeur de l'irradiation au point de Gauss considéré.
- Exemple : voir test SSNL109

4.3.3.9 '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 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 `DEBORST`), `CONT_1D` (par `DEBORST`).
- Nombre de variables internes : 2
 - V1 : déformation plastique cumulée,
 - V2 : représente le seuil actuel
- Exemple : voir test SSNA104

4.3.3.10 '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 `AFPE_VARC` de la commande `AFPE_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 `DEBORST`), `CONT_1D` (par `DEBORST`).
- 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
- Exemple : voir test SSNA118

4.3.3.11 '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 `AFPE_CARA_ELEM`. La matrice de rigidité du discret doit donc être prise nulle dans `AFPE_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 `AFPE_CARA_ELEM` (Cf. [R5.03.17] pour plus de détails). La matrice tangente est symétrique.

- Modélisations supportées : `DIS_TR`
- Nombre de variables internes : 5
 - 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
- Exemple : voir test SSNL131

4.3.3.12 'DIS_CONTACT'

Modèle de contact avec frottement de COULOMB, relation de comportement isotherme de type élasto-plastique, s'appuyant sur un élément discret à 2 nœuds, pour modéliser les liaisons entre grilles et crayons des assemblages combustibles. Les paramètres caractérisant le contact et le frottement sont fournis dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous le mot clé `DIS_CONTACT`. Les valeurs des rigidités sont données par `AFPE_CARA_ELEM` [U4.42.01] (mot clé `DISCRET`). 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 `AFPE_CARA_ELEM` (Cf. [R5.03.17] pour plus de détails). Cependant, cette modélisation ne décrit pas bien le comportement en rotation de la liaison, particulièrement au niveau de la décharge. Il est donc préférable d'utiliser `DIS_GRICRA`.

- Modélisations supportées : 3D_DIS
- Nombre de variables internes : 6
- Signification : V1 : indicateur de contact/frottement (1 si glissement, 0 si non glissement, -1 si décollement), V2 : déplacement plastique cumulée autour de la direction Z locale, V3 : déplacement plastique cumulé autour de la direction X locale, V4 à V6 : vides donc égales à 0.
- Exemple : voir test SSNL108.

4.3.4 Modèles mécaniques avec effets des transformations métallurgiques

Les relations de comportement suivantes s'appliquent à un matériau qui subit des changements de phases métallurgiques (Cf. [R4.04.02] pour plus de détail).

On peut activer par le mot clé `RELATION_KIT` deux types de matériau, soit `ACIER` qui comporte au plus 5 phases métallurgiques différentes, soit `ZIRC` qui comporte au plus 3 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
INL	=	écrouissage isotrope non linéaire
CL	=	écrouissage cinématique linéaire
PT	=	plasticité de transformation
RE	=	restauration d'écrouissage d'origine métallurgique

Exemples :

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

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

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

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

Pour toutes les lois métallurgiques, les contraintes planes sont impossibles même avec la méthode DEBORST.

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]`).

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

(*) 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`, `GREEN` ou `SIMO_MIEHE`).

Les phases sont rangées dans l'ordre suivant :

Pour l'acier : 1 à 4 = phases froides, 5 = phase chaude
Pour le Zircaloy : 1 et 2 = phases froides, 3 = phase chaude

Déformation	Ecrouissage isotrope		Ecrouissage cinématique	
	ACIER	ZIRC	ACIER	ZIRC
PETIT, PETIT_REAC et GREEN	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 : indicateur de plasticité (0 si élastique, 1 si plastique)	V4 : indicateur de plasticité (0 si élastique, 1 si plastique)	V31 à V36 : écrouissage cinématique moyen X	V19 à V24 : écrouissage cinématique moyen X
	V7 : écrouissage isotrope moyen	V5 : écrouissage isotrope moyen	V37 : indicateur de plasticité (0 si élastique, 1 si plastique)	V25 : indicateur de plasticité (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

4.3.5 Modèles locaux et non locaux d'endommagement

4.3.5.1 'ENDO_FRAGILE'

Relation de comportement élastique fragile. Il s'agit d'une modélisation à endommagement scalaire et à écrouissage isotrope linéaire négatif (Cf. [R5.03.18] pour plus de détails). Les caractéristiques du matériau sont définies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01] sous les mots clés `ECRO_LINE(_FO)` (DSDE négative) et `ELAS(_FO)`.

Modélisations locales supportées : 3D, 2D, `CONT_PLAN`, `INCO`.

- Nombre de variables internes : 2
- Signification : V1 : valeur de l'endommagement, V2 : indicateur d'endommagement (0 si l'endommagement vaut 0, 1 si l'endommagement est supérieur à 0).
- Exemple : voir test SSNV147

Modélisation non locale supportée : `GRAD_VARI` et `GRAD_EPSI`

- Nombre de variables internes pour la modélisation `GRAD_EPSI` : 2.
- Signification : V1 : valeur de l'endommagement, V2 : indicateur d'endommagement (0 si l'endommagement vaut 0, 1 si l'endommagement est supérieur à 0).
- Nombre de variables internes pour la modélisation `GRAD_VARI` : 6
- Signification : V1 : valeur de l'endommagement, V2 à V4 : 3 composantes du gradient de l'endommagement, V5 : variable utile pour la formulation à gradient, V6 : indicateur d'endommagement (0 si élastique, 1 si l'endommagement est supérieur à 0, 2 si rompu (endommagement de 0.999)).
- Exemple : voir test SSNV157

4.3.5.2 '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 côté 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 SUBD_PAS). 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 DEBORST.

- Modélisations locales supportées : 3D, 2D, INCO.
 - Nombre de variables internes : 9
 - Signification : V1 : déformation plastique cumulée, V2 : valeur de la porosité, V3 à V8 : 6 composantes d'un tenseur eulérien en grandes déformations de déformations élastiques, V9 : indicateur de plasticité (0 si élastique, 1 si plastique avec solution régulière, 2 si plastique avec solution singulière).
 - Exemple : voir test SSNV147.
- Modélisation non locale supportée : GRAD_VARI
 - 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 (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 DEBORST), INCO.
 - Nombre de variables internes : 3
 - Signification : V1 : déformation plastique cumulée, V2 : valeur de la porosité, V3 : indicateur de plasticité (0 si élastique, 1 si plastique).
 - 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 DEBORST), INCO.
- Nombre de variables internes : 3
- Signification : V1 : déformation plastique cumulée, V2 : valeur de la porosité, V3 : indicateur de plasticité (0 si élastique, 1 si plastique).
- Exemple : test SSNP117.

4.3.5.3 '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)` et `ELAS (_FO)`.

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

4.3.5.4 'CZM_EXP_REG'

Relation de comportement cohésive (Cohesive Zone Model EXPonentielle REGularisée) de type Barenblatt (Cf. [R7.02.11] pour plus de détail) modélisant l'ouverture d'une fissure. Cette loi est utilisable avec l'élément fini de type joint (Cf. [R3.06.09] 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_JOINT`, `AXIS_JOINT`.
- Nombre de variables internes : 4
- Signification : V1 : seuil correspondant au plus grand saut de déplacement (en norme) jamais atteint, V2 : indicateur de fissuration (0 pour régime linéaire, 1 pour régime adoucissant), V3 : indicateur du pourcentage d'énergie dissipée, V4 : indicateur valant 2 si les lèvres sont en contact ou 1 si il y a décollement.
- Exemple : voir test SSNP118.

4.3.5.5 'CZM_EXP'

Relation de comportement cohésive (Cohesive Zone Model EXPonentielle) de type Barenblatt (Cf. [R7.02.12] pour plus de détail) modélisant l'ouverture d'une fissure. Cette loi est utilisable avec l'élément fini à discontinuité interne (Cf. [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.

4.3.5.6 '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.

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

4.3.6.1 '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 (Cf. [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`.

- Modélisations locales supportées : 3D, 2D, `CONT_PLAN` (par `DEBORST`), `INCO`, `CONT_1D` (par `DEBORST`)
 - 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.
- Modélisation non locale supportée : `GRAD_EPSI`
 - 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 SSNV157

4.3.6.2 '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 `DEBORST`), `INCO`, `CONT_1D` (par `DEBORST`)
 - Nombre de variables internes : 7
 - Signification : V1 à V6 : tenseur d'endommagement de traction
 - V7 : endommagement de compression
 - Exemple : voir test SSNV176
- Modélisation non locale supportée : `GRAD_EPSI`
 - Nombre de variables internes : 7
 - Signification : V1 à V6 : tenseur d'endommagement de traction
 - V7 : endommagement de compression
 - Exemple : voir test SSNV175

4.3.6.3 '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.

- Modélisations locales supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN, INCO, CONT_1D (par DEBORST)
 - Nombre de variables internes : 3
 - 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.
 - Exemple : voir test SSNP113
- Modélisation non locale supportée : GRAD_EPSI
 - Nombre de variables internes : 3
 - Signification : V1 : valeur de l'endommagement, V2 : indicateur d'endommagement (0 pour régime élastique (endommagement nul), 1 si endommagé), V3 : température maximale atteinte au point de Gauss considéré. V4 : norme de la déformation mécanique totale .
 - Exemple : voir test SSNV157

4.3.6.4 'BETON_DOUBLE_DP'

Relation de comportement tridimensionnelle utilisée pour la description du comportement non linéaire du béton. Il comporte un critère de Drucker Prager en traction et un critère de Drucker 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)` (Cf. [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, 2D, CONT_PLAN (par DEBORST), INCO, CONT_1D (par DEBORST)
 - 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.
 - Exemple : voir test SSNV143.

4.3.6.5 'LABORD_1D'

Relation de comportement unidimensionnelle d'endommagement unilatéral dédiée au béton, adaptée aux cas de chargements monotones (statique) et cycliques (statique et dynamique sans effet de vitesse). Elle permet de décrire le comportement généré par la création de micro-fissures (abaissement des raideurs) et le fonctionnement lié, au cours des cycles, à leur refermeture (unilatéralité). Deux variables d'endommagement sont utilisées (l'une en traction, l'autre en compression), les déformations anélastiques liées à l'endommagement sont prises en compte et l'ouverture et la refermeture des fissures sont gérées par une fonction de restauration progressive de la raideur à la refermeture (cf. [R7.01.07] pour plus de détails). Les caractéristiques du matériau sont définies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01] sous les mots clés `LABORD_1D` et `ELAS`.

- Modélisation supportée : PMF
 - Nombre de variables internes : 5
 - Signification : V1 : valeur de l'endommagement de traction, V2 : valeur de l'endommagement de compression, V3 : valeur du seuil de traction, V4 : valeur de l'endommagement de compression, V5 : déformation irréversible.
 - Exemple : voir test SSNL119.

4.3.6.6 '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` (Cf. 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.
 - Exemple : voir test SSNS100

4.3.6.7 '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, V3 : inutilisé.
 - Exemple : voir test SSNS100

4.3.6.8 '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` (Cf. 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

4.3.6.9 '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

4.3.6.10 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 terme 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 les mots clé GLRC_DAMAGE et GLRC_ACIER. Pour les précisions sur la formulation du modèle voir [R7.01.31].

- Modélisation supportée : DKTG
 - 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 test SSNS104

4.3.6.11 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 pris 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. 4
 - V1 à V2 : variables d'endommagement pour la flexion positive et négative respectivement, V3 : indicateur d'endommagement correspondant à V1 (0 pour régime élastique et 1 si la vitesse de l'endommagement non nulle), V4 : indicateur d'endommagement correspondant à V2 (0 pour régime élastique et 1 si la vitesse de l'endommagement non nulle)
 - Exemple : voir test SSNS106

4.3.6.12 '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 mot clés ELAS et CORR_ACIER.

- Modélisations : 3D, 2D, CONT_PLAN, CONT_1D
 - 3 variables internes
 - V1 : déformation plastique cumulée
 - V2 : coefficient d'endommagement
 - V3 : indicateur de plasticité
 - Exemple : voir test SSNL127

4.3.6.13 'BETON_REGLE_PR'

Relation de comportement de béton (développée par la société NECS) dite 'parabole rectangle' [R7.01.22]. 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'ou PR : parabole-rectangle).
- Modélisations : CONT_PLAN, D_PLAN

- 1 variable interne V1 : déformation plastique cumulée
- Exemple : voir test SSNP129

4.3.6.14 '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_FISSURE` et `AXIS_FISSURE`.
 - 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

4.3.6.15 'GRANGER_FP'

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

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

4.3.6.16 'GRANGER_FP_V'

Relation de comportement pour la modélisation du fluage propre 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_GRANGER_FP` (Cf. [R7.01.01] pour plus de détails).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, `CONT_PLAN` (par `DEBORST`), `CONT_1D` (par `DEBORST`)
 - Nombre de variables internes : 55
 - Signification : Cf. [R7.01.01]
 - Exemple : voir test YYYY117

4.3.6.17 'GRANGER_FP_INDT'

Identique à `GRANGER_FP_V` mais traitant uniquement un comportement isotherme.

- Modélisations supportées : 3D, 2D, `CONT_PLAN` (par `DEBORST`), `CONT_1D` (par `DEBORST`)
 - Nombre de variables internes : 55
 - Signification : Cf. [R7.01.01]
 - Exemple : voir test SSNV142

4.3.6.18 'BETON_UMLV_FP'

Relation de comportement pour la modélisation du fluage propre 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_FP` (Cf. [R7.01.06] pour plus de détails).

- Modélisations supportées : 3D, 2D, `CONT_PLAN` (par `DEBORST`), `CONT_1D` (par `DEBORST`)
 - Nombre de variables internes : 21
 - Signification : Cf. [R7.01.06]
 - Exemple : voir test `SSNV163`

4.3.6.19 'BAZANT_FD'

Relation de comportement pour la modélisation du fluage de dessiccation du béton. Ce phénomène se produit dans le béton à long terme sous l'effet simultané du séchage et d'un chargement mécanique. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous les mots clés `BAZANT_FD` et `ELAS_FO` (Cf. [R7.01.05] pour plus de détails). Sous `ELAS_FO`, il est impératif de renseigner le mot clé `FONC_DESORP`.

- Modélisations supportées : 3D, 2D, `CONT_PLAN` (par `DEBORST`), `CONT_1D` (par `DEBORST`)
 - Nombre de variables internes : 1
 - Signification : `V1` : valeur de l'hygrométrie
 - Exemple : voir test `SSNV162`

4.3.7 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`.

4.3.7.1 '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 (Cf. [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 `DEBORST`), `CONT_1D` (par `DEBORST`), `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 déviatoire 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 déviatoire par la déformation plastique déviatoire, `V16` (`V14` en 2D) : indicateur (0 si élastique, 1 si élastoplastique avec mécanisme 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`

4.3.7.2 '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, C_PLAN, 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

4.3.7.3 '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 re-découpage 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

4.3.7.4 '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 mot clé `HOEK_BROWN`. Pour faciliter l'intégration de ce modèle, on peut utiliser le re-découpage 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

4.3.7.5 '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 re-découpage 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

4.3.7.6 '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.
 - Exemple : voir tests SSNV160, WTNV122

4.3.7.7 '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 mécanique, V3 : seuil hydrique, V4 : indicateur d'irréversibilité hydrique, V5 : Ps (cohésion).
 - Exemple : voir test WTNV123

4.3.7.8 'DRUCKER_PRAGER'

Relation de comportement de type Drucker-Prager 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 DRUCKER_PRAGER et ELAS(_FO). On suppose toutefois que le coefficient de dilatation thermique est constant. L'écoulement 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

4.3.8 Comportements intégrés par un logiciel externe

4.3.8.1 'ZMAT'

- ♦ NB_VARI = nbvar
- ♦ UNITE = unit

ZMAT, est le module de définition des comportements du code Zebulon (Centre des Matériaux, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris) Le couplage Zmat – Code_Aster se traduit pour l'utilisateur de Code_Aster de la façon suivante :

- au niveau de COMP_INCR, le mot-clé RELATION='ZMAT', pour aller lire le fichier contenant les données ZMAT (qui permet à la fois le choix du comportement et la définition des coefficients matériau). Ce fichier peut faire appel à un comportement déjà disponible dans Zmat, ou bien défini par l'utilisateur dans un langage relativement simple (Zebfront).
- toujours sous COMP_INCR, un mot-clé UNITE permet de définir l'unité logique sur laquelle on vient lire le fichier zmat et un mot clé NB_VARI permettant de préciser le nombre de variables internes du comportement, et bien sûr les mots clés habituels : GROUP_MA, DEFORMATION (PETIT, PETIT_REAC, et COROTATIONNEL).
- Pour prendre en compte l'hypothèse des contraintes planes, on peut utiliser ALGO_C_PLAN='DEBORST'.
- Les mot-clés relatifs à l'intégration locale : RESI_INTE_REL, ITER_INTE_MAXI, ITER_INTE_PAS, RESO_INTE, PARM_THETA, ne sont pas utilisés, puisque renseignés dans le fichier zmat.

- Dans ASTK, par rapport à une étude classique, il suffit d'ajouter le fichier ZMAT correspondant à l'unité définie ci-dessus.

L'utilisation de Zmat pour *Code_Aster* est prévue à EDF, dans la cadre du partenariat Ecole des Mines - EDF, pour des calculs de R&D uniquement, ce qui exclut notamment les études IPS. Hors de ce cadre, la licence de Zmat peut être acquise auprès du Centre des Matériaux de l'ENSMP.

Pour plus de détails, voir le document [U2.10.01] (notice d'utilisation du couplage Zmat-Aster). La documentation d'utilisation de ZMAT est disponible sur la machine de développement Alphaserveur dans le répertoire /aster/public/Z8.3/HANDBOOK

4.4 Opérande **RELATION_KIT** sous **COMP_INCR**

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**).

4.4.1 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 :

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

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

4.4.2 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 **COMP_INCR** (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 :

- '**GRANGER_FP**'
- '**GRANGER_FP_V**'
- '**GRANGER_FP_INDT**'

peuvent être associés les modèles de comportement suivants :

- '**BETON_DOUBLE_DP**'
- '**VMIS_ISOT_TRAC**'
- '**VMIS_ISOT_PUIS**'
- '**VMIS_ISOT_LINE**'
- '**ROUSS_PR**'
- '**LMARC**'

Titre : Comportements non linéaires
Auteur(s) : J.M. PROIX

Date : 10/04/07
Clé : U4.51.11-B Page : 34/44

- 'BETON_DOUBLE_DP'
- ,ENDO_ISOT_BETON',
- 'MAZARS'

Avec le modèle de fluage

- 'BETON_UMLV_FP'

peuvent être associés les modèles de comportement suivants :

- 'ENDO_ISOT_BETON',
- 'MAZARS'

Modélisations supportées : 3D, 2D, CONT_PLAN (par DEBORST ou ANALYTIQUE suivant chaque modèle , CONT_1D (par DEBORST) .

- Les variables internes de chaque loi sont cumulées dans le tableau des variables internes, et restituées loi par loi.
- Exemple :
COMP_INCR = _F(
RELATION = 'KIT_DDI'
RELATION_KIT = ('BETON_UMLV_FP' , 'ENDO_ISOT_BETON'))
- Voir aussi test SSNV169

4.4.3 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].

4.4.3.1 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 :

Titre : Comportements non linéaires
Auteur(s) : J.M. PROIX

Date : 10/04/07
Clé : U4.51.11-B Page : 35/44

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, D_PLAN_HH2MD, D_PLAN_HH2MS, AXIS_HH2MD, AXIS_HH2MS, 3D_HH2MD, 3D_HH2MS
KIT_THH	D_PLAN_THH, D_PLAN_THHD, AXIS_THH, AXIS_THHD, 3D_THH, 3D_THHD, D_PLAN_THH2D, AXIS_THH2D, 3D_THH2D
KIT_THV	D_PLAN_THVD, AXIS_THVD, 3D_THVD
KIT_THHM	D_PLAN_THHM, D_PLAN_THHMS, D_PLAN_THHMD, AXIS_THHM, AXIS_THHMS, AXIS_THHMD, 3D_THHM, 3D_THHMS, 3D_THHMD, D_PLAN_THH2MD, AXIS_THH2MD, 3D_THH2MD, D_PLAN_THH2MS, AXIS_THH2MS, 3D_THH2MS

4.4.3.2 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). Il faut définir les 4 courbes point par point (par DEFI_FONCTION) suivantes :
 - la saturation en fonction de la pression capillaire,
 - la dérivée de cette courbe,
 - la perméabilité relative en fonction de la saturation,
 - sa dérivée.
 - 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)

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

- 'ELAS'
- 'ELAS_THER'
- 'CJS'
- 'CAM_CLAY'
- 'BARCELONE'
- 'LAIGLE'
- 'DRUCKER_PRAGER'
- 'HOEK_BROWN_EFF'
- 'HOEK_BROWN_TOT'
- 'MAZARS'
- 'ENDO_ISO_BETON'

Remarque : le mot-clé 'ELAS_THER' permet d'utiliser la relation de comportement élastique linéaire avec dépendance du modules d'Young par rapport à la température, utilisable pour un modèle élastique. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous le mot clé ELAS_FO.

4.4.3.4 Comportements des liquides / gaz

'LIQU_SATU'

Loi de comportement pour un milieu poreux saturé par un seul liquide (Cf. [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 (Cf. [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 $P / \rho = RT / M_v$ où P est la pression, ρ la masse volumique, M_v la masse molaire, R la constante de Boltzman et T la température (Cf. [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 (Cf. [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`.

'LIQU_VAPE_GAZ'

Loi de comportement pour un milieu poreux non saturé eau/vapeur/air sec avec changement de phase (Cf. [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 (Cf. [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`, `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 (Cf. [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`

4.4.3.5 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 choisit un milieu 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` :

('ELAS'	'GAZ'	'HYDR_UTIL'
('CJS'	'GAZ'	'HYDR_UTIL'
('LAIGLE'	'GAZ'	'HYDR_UTIL'
('CAM_CLAY'	'GAZ'	'HYDR_UTIL'
('MAZARS'	'GAZ'	'HYDR_ENDO'
('ENDO_ISOT_BETON'	'GAZ'	'HYDR_ENDO'

('ELAS'	'LIQU_SATU'	'HYDR_UTIL'
('CJS'	'LIQU_SATU'	'HYDR_UTIL'
('LAIGLE'	'LIQU_SATU'	'HYDR_UTIL'
('CAM_CLAY'	'LIQU_SATU'	'HYDR_UTIL'
('MAZARS'	'LIQU_SATU'	'HYDR_ENDO'
('ENDO_ISOT_BETON'	'LIQU_SATU'	'HYDR_ENDO'

('ELAS'	'LIQU_GAZ_ATM'	'HYDR_UTIL'
('CJS'	'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_THM` :

('ELAS'	'GAZ'	'HYDR_UTIL'
('CJS'	'GAZ'	'HYDR_UTIL'
('LAIGLE'	'GAZ'	'HYDR_UTIL'
('CAM_CLAY'	'GAZ'	'HYDR_UTIL'
('MAZARS'	'GAZ'	'HYDR_ENDO'
('ENDO_ISOT_BETON'	'GAZ'	'HYDR_ENDO'

('ELAS'	'LIQU_SATU'	'HYDR_UTIL'
('CJS'	'LIQU_SATU'	'HYDR_UTIL'
('LAIGLE'	'LIQU_SATU'	'HYDR_UTIL'
('CAM_CLAY'	'LIQU_SATU'	'HYDR_UTIL'
('MAZARS'	'LIQU_SATU'	'HYDR_ENDO'
('ENDO_ISOT_BETON'	'LIQU_SATU'	'HYDR_ENDO'

('ELAS'	'LIQU_GAZ_ATM'	'HYDR_UTIL'
('CJS'	'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'

('ELAS'	'GAZ'	'HYDR_UTIL'
('CJS'	'GAZ'	'HYDR_UTIL'
('LAIGLE'	'GAZ'	'HYDR_UTIL'
('CAM_CLAY'	'GAZ'	'HYDR_UTIL'
('MAZARS'	'GAZ'	'HYDR_ENDO'
('ENDO_ISOT_BETON'	'GAZ'	'HYDR_ENDO'

('ELAS'	'LIQU_SATU'	'HYDR_UTIL'
('CJS'	'LIQU_SATU'	'HYDR_UTIL'
('LAIGLE'	'LIQU_SATU'	'HYDR_UTIL'
('CAM_CLAY'	'LIQU_SATU'	'HYDR_UTIL'
('MAZARS'	'LIQU_SATU'	'HYDR_ENDO'
('ENDO_ISOT_BETON'	'LIQU_SATU'	'HYDR_ENDO'

Pour relation `KIT_HHM` :

Titre : Comportements non linéaires
Auteur(s) : J.M. PROIX

Date : 10/04/07
Clé : U4.51.11-B Page : 38/44

```
( ' ELAS '          ' LIQU_GAZ '          ' HYDR_UTIL ' )
( ' CJS '           ' LIQU_GAZ '          ' HYDR_UTIL ' )
( ' LAIGLE '        ' LIQU_GAZ '          ' HYDR_UTIL ' )
( ' CAM_CLAY '      ' LIQU_GAZ '          ' HYDR_UTIL ' )
( ' BARCELONE '     ' LIQU_GAZ '          ' HYDR_UTIL ' )
( ' MAZARS '        ' LIQU_GAZ '          ' HYDR_ENDO ' )
( ' ENDO_ISOT_BETON ' ' LIQU_GAZ '          ' HYDR_ENDO ' )

( ' ELAS '          ' LIQU_VAPE_GAZ '      ' HYDR_UTIL ' )
( ' CJS '           ' LIQU_VAPE_GAZ '      ' HYDR_UTIL ' )
( ' LAIGLE '        ' LIQU_VAPE_GAZ '      ' HYDR_UTIL ' )
( ' CAM_CLAY '      ' LIQU_VAPE_GAZ '      ' HYDR_UTIL ' )
( ' BARCELONE '     ' LIQU_VAPE_GAZ '      ' HYDR_UTIL ' )
( ' MAZARS '        ' LIQU_VAPE_GAZ '      ' HYDR_ENDO ' )
( ' ENDO_ISOT_BETON ' ' LIQU_VAPE_GAZ '      ' HYDR_ENDO ' )

( ' ELAS '          ' LIQU_AD_GAZ_VAPE '    ' HYDR_UTIL ' )
( ' CJS '           ' 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 ' )
( ' MAZARS '        ' LIQU_VAPE_GAZ '      ' HYDR_ENDO ' )
( ' ENDO_ISOT_BETON ' ' LIQU_VAPE_GAZ '      ' HYDR_ENDO ' )
```

Pour relation KIT_THH :

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

Pour relation KIT_THV :

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

Pour relation KIT_THHM :

```
( ' ELAS '          ' LIQU_GAZ '          _      ' HYDR_UTIL ' )
( ' CJS '           ' LIQU_GAZ '          _      ' HYDR_UTIL ' )
( ' LAIGLE '        ' LIQU_GAZ '          _      ' HYDR_UTIL ' )
( ' CAM_CLAY '      ' LIQU_GAZ '          _      ' HYDR_UTIL ' )
( ' BARCELONE '     ' LIQU_GAZ '          ' THER_HOMO ' ' HYDR_UTIL ' )
( ' MAZARS '        ' LIQU_GAZ '          _      ' HYDR_ENDO ' )
( ' ENDO_ISOT_BETON ' ' LIQU_GAZ '          _      ' HYDR_ENDO ' )

( ' ELAS '          ' LIQU_VAPE_GAZ '      _      ' HYDR_UTIL ' )
( ' CJS '           ' LIQU_VAPE_GAZ '      _      ' HYDR_UTIL ' )
( ' LAIGLE '        ' LIQU_VAPE_GAZ '      _      ' HYDR_UTIL ' )
( ' CAM_CLAY '      ' LIQU_VAPE_GAZ '      _      ' HYDR_UTIL ' )
( ' BARCELONE '     ' LIQU_VAPE_GAZ '      _      ' HYDR_UTIL ' )
( ' MAZARS '        ' LIQU_VAPE_GAZ '      _      ' HYDR_ENDO ' )
( ' ENDO_ISOT_BETON ' ' LIQU_VAPE_GAZ '      _      ' HYDR_ENDO ' )

( ' ELAS '          ' LIQU_GAZ '          _      ' HYDR_UTIL ' )
( ' CJS '           ' LIQU_GAZ '          _      ' HYDR_UTIL ' )
( ' LAIGLE '        ' LIQU_GAZ '          _      ' HYDR_UTIL ' )
( ' CAM_CLAY '      ' LIQU_GAZ '          _      ' HYDR_UTIL ' )
( ' BARCELONE '     ' LIQU_GAZ '          _      ' HYDR_UTIL ' )
( ' MAZARS '        ' LIQU_GAZ '          _      ' HYDR_ENDO ' )
( ' ENDO_ISOT_BETON ' ' LIQU_GAZ '          _      ' HYDR_ENDO ' )

( ' ELAS '          ' LIQU_VAPE_GAZ '      _      ' HYDR_UTIL ' )
( ' CJS '           ' LIQU_VAPE_GAZ '      _      ' HYDR_UTIL ' )
( ' LAIGLE '        ' LIQU_VAPE_GAZ '      _      ' HYDR_UTIL ' )
( ' CAM_CLAY '      ' LIQU_VAPE_GAZ '      _      ' HYDR_UTIL ' )
( ' BARCELONE '     ' LIQU_VAPE_GAZ '      _      ' HYDR_UTIL ' )
( ' MAZARS '        ' LIQU_VAPE_GAZ '      _      ' HYDR_ENDO ' )
( ' ENDO_ISOT_BETON ' ' LIQU_VAPE_GAZ '      _      ' HYDR_ENDO ' )

( ' ELAS '          ' LIQU_AD_GAZ_VAPE '    _      ' HYDR_UTIL ' )
( ' CJS '           ' LIQU_AD_GAZ_VAPE '    _      ' HYDR_UTIL ' )
( ' LAIGLE '        ' LIQU_AD_GAZ_VAPE '    _      ' HYDR_UTIL ' )
( ' CAM_CLAY '      ' LIQU_AD_GAZ_VAPE '    _      ' HYDR_UTIL ' )
```

Titre : Comportements non linéaires
Auteur(s) : J.M. PROIX

Date : 10/04/07
Clé : U4.51.11-B Page : 39/44

```
( 'BARCELONE'          'LIQU_AD_GAZ_VAPE'          'HYDR_UTIL' )
( 'MAZARS'             'LIQU_VAPE_GAZ'  'THER_POLY'  'HYDR_ENDO' )
( 'ENDO_ISOT_BETON'    'LIQU_VAPE_GAZ'  'THER_POLY'  'HYDR_ENDO' )
```

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 :

```
COMP_INCR      =_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 Opérande DEFORMATION sous COMP_INCR

◇ 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.

4.5.1 DEFORMATION : 'PETIT'

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

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

4.5.2 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 , Δu désignent respectivement la position, le déplacement et l'incrément de déplacement calculés à une itération donnée d'un point matériel :

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

L'équilibre est donc résolu sur la géométrie actuelle mais le comportement reste écrit sous l'hypothèse des petites déformations.

Attention :

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).

Remarque :

On peut utiliser cette option avec les modélisations THM du moment que les rotations sont petites.

4.5.3 DEFORMATION : 'SIMO_MIEHE'

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 'ELAS', '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,).

Attention :

Cette option n'est valable que pour les modélisations 3D, 2D, INCO (pas de contrainte plane avec la méthode DEBORST). 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.

4.5.4 DEFORMATION : COROTATIONNEL'

Cette formulation est utilisée dans le cadre du couplage Code_Aster-Zmat. En chaque point d'intégration, Code_Aster fournit à Zmat le gradient de la transformation à l'instant actuel et à l'instant initial. Zmat retourne les contraintes de Cauchy et les variables internes à l'instant actuel au point d'intégration considéré, ainsi que l'opérateur tangent.

Cela permet de réaliser des calculs en grandes déformations plastiques, avec les relations de comportement disponibles dans Zmat. Cette option n'est valable que pour les modélisations 3D, D_PLAN, AXIS, 3D_SI, AXIS_SI et PLAN_SI.

4.5.5 DEFORMATION : 'GREEN'

Permet de traiter les grandes rotations et les petites déformations pour toutes les lois de comportement sous COMP_INCR munies des modélisations 3D, D_PLAN, AXIS et C_PLAN. Les déformations utilisées dans la relation de comportement sont les déformations de GREEN-LAGRANGE :

$$E_{ij}(u) = 1/2 \left(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i} \cdot u_{k,j} \right)$$

4.5.6 DEFORMATION = 'GREEN_GR'

Permet de traiter les grandes rotations et les petites déformations pour toutes les lois de comportement sous COMP_INCR munies des modélisations COQUE_3D.

Les déformations utilisées dans la relation de comportement sont les déformations de GREEN-LAGRANGE :

$$E_{ij}(u) = 1/2 (u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i} \cdot u_{k,j})$$

Attention :

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

4.6 Opérandes TOUT / GROUP_MA / MAILLE sous COMP_INCR

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

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

4.7 Opérandes ALGO_C_PLAN, ALGO_1D

Attention : La méthode DEBORST n'est pas utilisable avec l'option de déformation SIMO_MIEHE.

```
◇ ALGO_C_PLAN = 'ANALYTIQUE' [DEFAULT]
                  'DEBORST'
```

La méthode de DEBORST permet d'ajouter la condition de contrainte plane à tous les modèles de COMP_INCR (pour plus de détail voir la doc. [R5.03.03]). L'hypothèse des contraintes planes est vérifiée à convergence. On préconise d'utiliser et de réactualiser la matrice tangente assez souvent (toutes les une à trois itérations) dans la méthode de Newton (MATRICE = 'TANGENTE' REAC_ITER = 1 à 3). Attention, dans AFFE_MODELE, toujours mettre PHENOMENE = 'C_PLAN'.

```
◇ ALGO_1D : 'ANALYTIQUE' [DEFAULT]
              'DEBORST'
```

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

4.8 Opérande PARM_THETA sous COMP_INCR

```
◇ PARM_THETA = / 1. [DEFAULT]
                  / theta
```

Pour les modélisations THM, l'argument theta est le paramètre de la thêta-méthode utilisée pour résoudre les équations évolutives de thermique et d'hydraulique (Cf. [R5.03.60] pour plus de détails). Sa valeur doit être comprise entre 0 (méthode explicite) et 1 (méthode totalement implicite).

Pour les lois de comportement LEMAITRE, ROUSS_VISC, ZIRC_CYRA2 et ZIRC_EPRI, l'argument theta sert à l'intégration de la loi de comportement. Il peut prendre les valeurs 0.5 (semi-implicite) ou 1 (implicite).

4.9 Opérandes RESI_INTE_REL / ITER_INTE_MAXI sous COMP_INCR

```
◇ RESI_INTE_REL = / 1.E-6 [DEFAULT]
                  / resint
◇ ITER_INTE_MAXI = / 10 [DEFAULT]
                  / iteint
```

Dans la plupart des 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. Pour plus de détails, se reporter à la documentation de référence, par exemple au document [R5.03.02].

4.10 Opérande ITER_INTE_PAS, RESO_INTE sous COMP_INCR

```
◇ ITER_INTE_PAS = 0 [DEFAULT]
                  itepas
```

Permet de re-découper 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.

```
◇ RESO_INTE = / 'IMPLICITE' [DEFAULT]
              / 'RUNGE_KUTTA_2'
              / 'RUNGE_KUTTA_4'
```

Permet de préciser le type de schéma d'intégration pour résoudre le système d'équations non linéaires formé par les équations constitutives des modèles de comportement à variables internes :

- le modèle `POLYCRISTAL` est traité uniquement par le schéma explicite `RUNGE_KUTTA_2`
- les deux modèles `VMIS_POU_LINE` et `VMIS_POU_FLEJOU` peuvent être traités par les deux schémas `IMPLICITE` et `RUNGE_KUTTA_4`,
- les deux modèles `MONOCRISTAL` et `VENDOCHAB` peuvent être traités par les deux schémas `IMPLICITE` et `RUNGE_KUTTA_2`,
- les autres modèles utilisent le schéma `IMPLICITE`.

5 Mot clé COMP_ELAS

Ce mot clé facteur regroupe les relations de comportement « élastiques linéaires et non linéaires », c'est à dire reliant les déformations (par rapport à la configuration de référence) et les contraintes (comportement élastique). On peut avoir dans le même calcul certaines parties de la structure obéissant à divers comportements incrémentaux (`COMP_INCR`) et d'autres parties obéissant à divers comportements élastiques (`COMP_ELAS`).

5.1 Opérande RELATION sous COMP_ELAS

5.1.1 'ELAS'

Relation de comportement élastique "linéaire", c'est-à-dire que la relation entre les déformations et les contraintes considérées est linéaire. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous les mots clés `ELAS` ou `ELAS_FO`, `ELAS_ORTH` ou `ELAS_ORTH_FO` et `ELAS_ISTR` ou `ELAS_ISTR_FO` (cf. [R4.01.02]). C'est la relation de comportement par défaut pour les comportements élastiques.

- Modélisations supportées : 3D, 2D, `CONT_PLAN`, `POU_D_T_GD`, `CABLE`, `CABLE_POULIE`, `COQUE_3D` (avec `DEFORMATION = 'GREEN_GR'`).
- Exemple : voir test `SSLS120`.

5.1.2 '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 grandes déformations (DEFORMATION= 'GREEN').

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

5.1.3 '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 (Cf. [R7.02.03] pour plus de détails).

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

5.1.4 '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 (Cf. [R7.02.03] pour plus de détails).

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

5.1.5 'ELAS_POUTRE_GR'

Relation de comportement élastique pour les poutres en grands déplacements et grandes rotations (DEFORMATION: 'GREEN_GR' 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

5.1.6 'CABLE'

Relation de comportement élastique adaptée aux câbles (DEFORMATION: 'GREEN' 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 (Cf. [R3.08.02] pour plus de détails).

- Modélisations supportées : CABLE
- Exemple : voir test HSNL100

5.2 Opérande DEFORMATION sous COMP_ELAS

◇ 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.

5.2.1 DEFORMATION = 'PETIT'

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

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

5.2.2 DEFORMATION = 'GREEN'

Permet de traiter les grandes rotations et les petites déformations pour toutes les lois de comportement sous COMP_INCR munies des modélisations 3D, D_PLAN, AXIS et C_PLAN. Les déformations utilisées dans la relation de comportement sont les déformations de GREEN-LAGRANGE :

$$E_{ij}(u) = 1/2 (u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i} \cdot u_{k,j})$$

5.2.3 DEFORMATION = 'GREEN_GR'

Permet de traiter les grandes rotations et les petites déformations pour toutes les lois de comportement sous COMP_INCR munies des modélisations COQUE_3D, POU_D_T_GD. Les déformations utilisées dans la relation de comportement sont les déformations de GREEN-LAGRANGE :

$$E_{ij}(u) = 1/2 (u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i} \cdot u_{k,j})$$

Attention :

Pour les coques (modélisation COQUE_3D), il est fortement déconseillé d'utiliser la recherche linéaire avec l'option GREEN_GR (la convergence peut être difficile).

5.3 Opérandes TOUT / GROUP_MA / MAILLE sous COMP_ELAS

```

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

```

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

5.4 Opérandes RESI_INTE_RELA / ITER_INTE_MAXI sous COMP_ELAS

```

◇ RESI_INTE_RELA = / 1.E-6 [DEFAULT]
                  / resint
◇ ITER_INTE_MAXI = / 10 [DEFAULT]
                  / iteint

```

Dans les relations de comportement élastiques non linéaires (ELAS_VMIS_LINE, ELAS_VMIS_TRAC en contraintes planes, et ELAS_HYPER), un algorithme itératif est utilisé. Ces opérandes (résidu et nombre maximum d'itérations dites internes) sont utilisés pour tester la convergence de cet algorithme itératif de résolution. Pour plus de détails, se reporter à la documentation de référence. Ces opérandes sont **inutiles** avec le comportement ELAS, et avec ELAS_VMIS_LINE, ELAS_VMIS_TRAC hors contraintes planes.