

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

Comportements non linéaires

1 But

On décrit ici les comportements non linéaires du *Code_Aster*, introduits dans les opérateurs `STAT_NON_LINE`, `DYNA_NON_LINE`, ou `DYNA_TRAN_EXPLI`, par l'intermédiaire des mots-clés `COMP_INCR` ou `COMP_ELAS`.

Table des matières

1 But	1
2 Syntaxe	3
3 Opérandes	4
3.1 Mot clé COMP_INCR	4
3.1.1 Opérande RELATION	4
3.1.1.1 Modèles classiques	8
3.1.1.2 Modèles locaux avec endommagement	13
3.1.1.3 Modèles non locaux	15
3.1.1.4 Modèles décrivant le phénomène de déformation progressive	17
3.1.1.5 Comportements de microstructures	17
3.1.1.6 Comportements spécifiques aux crayons combustibles	18
3.1.1.7 Comportements spécifiques aux éléments discrets et poutres	21
3.1.1.8 Modèles mécaniques avec effets des transformations métallurgiques	23
3.1.1.9 Comportement pour le béton	29
3.1.1.10 Comportement pour les milieux poreux (modélisation thermo-hydro-mécanique)	32
3.1.2 Opérande RELATION_KIT sous COMP_INCR	37
3.1.2.1 KIT associé au comportement métallurgique	37
3.1.2.2 KIT associé au comportement du béton	37
3.1.2.3 KIT associé au comportement des milieux poreux (relation KIT_XXXX)	37
3.1.3 Opérande DEFORMATION sous COMP_INCR	41
3.1.4 Opérandes TOUT / GROUP_MA / MAILLE / GROUP_NO / NOEUD sous COMP_INCR	42
3.1.5 Opérande ALGO_C_PLAN	42
3.1.6 Opérande ALGO_1D	43
3.2 Mot clé COMP_ELAS	43
3.2.1 Opérande RELATION sous COMP_ELAS	43
3.2.2 Opérande DEFORMATION sous COMP_ELAS	44
3.2.3 Opérandes TOUT / GROUP_MA / MAILLE / GROUP_NO / NOEUD sous COMP_ELAS	45
3.2.4 Opérandes RESI_INTE_RELA / ITER_INTE_MAXI	45
3.2.5 Opérande ITER_INTE_PAS	45
3.2.6 Opérande RESO_INTE	45

2 Syntaxe

```

♦ | COMP_INCR = _F (
  ♦ RELATION = / 'VMIS_ISOT_TRAC' , [DEFAULT]
                / ...
                / autres relations [§ 3.3.1],
                / ...

  ◇ RELATION_KIT= / 'ELAS' ,
                  / ...
                  / autres relations [§ 3.3.2],
                  / ...

  ◇ DEFORMATION = / 'PETIT' , [DEFAULT]
                  / 'PETIT_REAC' ,
                  / 'SIMO_MIEHE' ,
                  / 'GREEN' ,
                  / 'GREEN_GR' ,

  ◇ / TOUT = 'OUI' , [DEFAULT]
    / | GROUP_MA= lgrma, [l_gr_maille]
      | MAILLE = lma, [l_maille]

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

  ◇ ALGO_1D = / 'ANALYTIQUE' [DEFAULT]
              / 'DEBORST'
  ),

| COMP_ELAS = _F (
  ♦ RELATION = / 'ELAS' , [DEFAULT]
                / ...
                / autres relations [§ 3.4.1],
                / ...

  ◇ 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]

  ◇ ITER_INTE_PAS = / 0, [DEFAULT]
                    / itepas, [I]

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

```

3 Opérandes

3.1 Mot clé COMP_INCR

◆ | 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).

Certains modèles de comportements n'ont pas été développés en contrainte plane. Cependant, le mot clé ALGO_C_PLAN [§3.3.5] 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 aux éléments de structure DKT, COQUE_3D et TUYAU.

De même, pour les utilisations utilisant un état de contraintes monodimensionnel (POU_D_EM, POU_D_TGM, GRILLE_MEMBRANE, BARRE), pour pouvoir utiliser les comportements 3D, il faut utiliser le mot clé ALGO_1D (METHODE = 'DEBORST').

3.1.1 Opérande RELATION

◆ RELATION :

Modèles classiques

```
/ 'ELAS'
/ 'VMIS_ISOT_TRAC'           [DEFAULT]
/ 'VMIS_ISOT_LINE'
/ 'VISC_ISOT_TRAC'
/ 'VISC_ISOT_LINE'
/ 'VMIS_CINE_LINE'
/ 'VMIS_ECMI_TRAC'
/ 'VMIS_ECMI_LINE'
/ 'LEMAITRE'
/ 'CHABOCHE'
/ 'VISC_CIN1_CHAB'
/ 'VISC_CIN2_CHAB'
/ 'NORTON_HOFF'
/ 'CZM_EXP_REG'
/ 'CZM_EXP'
/ 'ZMAT'
```

Modèles locaux avec endommagement (voir également comportement pour le béton)

```
/ 'ENDO_FRAGILE'
/ 'ENDO_ISOT_BETON'
/ 'ENDO_ORTH_BETON'
/ 'ROUSSELIER'
/ 'ROUSS_PR'
/ 'ROUSS_VISC'
/ 'VENDOCHAB'
```

Modèles traités en formulation non local

```
/ 'ENDO_FRAGILE'
/ 'ENDO_ISOT_BETON'
/ 'ENDO_ORTH_BETON'
/ 'RUPT_FRAG'
/ 'VMIS_ISOT_TRAC'
/ 'VMIS_ISOT_LINE'
```

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

Date : 31/01/06
Clé : U4.51.11-B1 Page : 5/46

```
/ 'DRUCKER_PRAGER'  
/ 'MAZARS'  
/ 'ROUSSELIER'  
  
# Modèles décrivant la déformation progressive  
/ 'VISC_TAHERI'  
/ 'POLY_CFC'  
  
# Modèles décrivant le comportement de microstructures  
/ 'MONOCRISTAL'  
/ 'POLYCRISTAL'  
  
# Comportements spécifiques aux crayons ET ASSEMBLAGES combustibles  
/ 'LMARC'  
/ 'ZIRC_CYRA2'  
/ 'ZIRC_EPRI'  
/ 'LEMAITRE_IRRA'  
/ 'GRAN_IRRA_LOG'  
/ 'VISC_IRRA_LOG'  
/ 'GATT_MONNERIE'  
  
# Comportements spécifiques aux éléments de poutres et discrets  
/ 'DIS_CONTACT'  
/ 'DIS_GRICRA'  
/ 'DIS_CHOC'  
/ 'VMIS_POU_LINE'  
/ 'VMIS_POU_FLEJOU'  
/ 'ARME'  
/ 'ASSE_CORN'  
/ 'DIS_GOUJ2E_PLAS'  
/ 'DIS_GOUJ2E_ELAS'  
/ 'VMIS_ASYM_LINE'  
/ 'CORR_ACIER'  
/ 'LMARC_IRRA'  
  
# Modèles mécaniques avec effets des transformations métallurgiques  
/ 'META_P_IL'  
/ 'META_P_INL'  
/ 'META_P_IL_PT'  
/ 'META_P_INL_PT'  
/ 'META_P_IL_RE'  
/ 'META_P_INL_RE'  
/ 'META_P_IL_PT_RE'  
/ 'META_P_INL_PT_RE'  
/ 'META_P_CL'  
/ 'META_P_CL_PT'  
/ 'META_P_CL_RE'  
/ 'META_P_CL_PT_RE'  
/ 'META_V_IL'  
/ 'META_V_INL'  
/ 'META_V_IL_PT'  
/ 'META_V_INL_PT'  
/ 'META_V_IL_RE'  
/ 'META_V_INL_RE'  
/ 'META_V_IL_PT_RE'  
/ 'META_V_INL_PT_RE'  
/ 'META_V_CL'  
/ 'META_V_CL_PT'  
/ 'META_V_CL_RE'  
/ 'META_V_CL_PT_RE'  
  
# Comportements pour le béton  
/ 'BETON_DOUBLE_DP'  
/ 'MAZARS'  
/ 'LABORD_1D'  
/ 'JOINT_BA'  
/ 'GRILLE_ISOT_LINE'  
/ 'GRILLE_CINE_LINE'
```

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

Date : 31/01/06
Clé : U4.51.11-B1 Page : 6/46

```
/ 'GRILLE_PINTO_MEN'  
/ 'PINTO_MENEGOTTO'  
/ 'GLRC'  
/ 'GRANGER_FP'  
/ 'GRANGER_FP_INDT'  
/ 'GRANGER_FP_V'  
/ 'BAZANT_FD'  
/ 'BETON_UMLV_FP'  
/ 'KIT_DDI'  
/ 'CORR_ACIER'
```

Comportements pour les milieux poreux et les sols

```
/ 'KIT_HM'  
/ 'KIT_THM'  
/ 'KIT_HHM'  
/ 'KIT_THH'  
/ 'KIT_THHM'  
/ 'KIT_THV'  
/ 'CJS'  
/ 'DRUCKER_PRAGER'  
/ 'LAIGLE'  
/ 'HOEK_BROWN'  
/ 'ELAS_THM'  
/ 'CAM_CLAY'  
/ 'BARCELONE'
```

Petit dictionnaire des modélisations supportées par les lois de comportement non linéaire

Pour ne pas surcharger ce document, nous appellerons par la suite :

- Modélisation 3D = les modélisations 3D et 3D_SI
- Modélisation D_PLAN = les modélisations D_PLAN et D_PLAN_SI
- Modélisation AXIS = les modélisations AXIS et 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 et COQUE_D_PLAN
- Modélisation 3D_DIS = les modélisations DIS_T et DIS_TR
- Modélisation 2D_DIS = les modélisations 2D_DIS_T et 2D_DIS_TR
- Modélisation GRILLE = les modélisations GRILLE et GRILLE_MEMBRANE
- Modélisation INCO = les modélisations 3D_INCO, AXIS_INCO et D_PLAN_INCO
- Modélisation POU = les modélisations POU_D_E, POU_D_T, POU_D_TG,
- Modélisation PMF = POU_D_EM et POU_D_TGM
- Modélisation BARRE = la modélisation BARRE et 2D_BARRE
- Modélisation THM = les modélisations 3D_HHM, 3D_HM, 3D_JOINT_CT, 3D_THH, 3D_THHM, 3D_THM, 3D_HHMD, 3D_HMD, 3D_THHD, 3D_THHMD, 3D_THMD, 3D_THVD, AXIS_HHM, AXIS_HM, AXIS_THH, AXIS_THHM, AXIS_THM, AXIS_HHMD, AXIS_HH2MD, AXIS_HMD, AXIS_THHD, AXIS_THH2D, AXIS_THHMD, AXIS_THH2MD, AXIS_THMD, AXIS_THVD, D_PLAN_HHM, D_PLAN_HM, D_PLAN_THH, D_PLAN_THHM, D_PLAN_THM, D_PLAN_HHMD, D_PLAN_HH2MD, D_PLAN_HMD, D_PLAN_THHD, D_PLAN_THH2D, D_PLAN_THHMD, D_PLAN_THH2MD, D_PLAN_THMD et D_PLAN_THVD
- 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'* et *MATRICE='TANGENTE'* 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.

Remarque :

Par la suite, on donnera, pour chacune des lois de comportement, le nombre de variables internes stockées sous *VARI_ELGA* et leur signification (si ce nombre n'est pas trop grand).

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

3.1.1.1 Modèles classiques

Sauf indication contraire, tous les modèles peuvent inclure une dépendance par rapport à la température.

/ '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).

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, C_PLAN, COQUE, TUYAU, COQUE1D, 3D_DIS, 2D_DIS, INCO, POU, BARRE, PMF, GRILLE.

Nombre de variables internes : 1

Signification : V1 : vide donc vaut toujours zéro (avec les déformations de type SIMO_MIEHE uniquement cf. [§3.3.3], V1 est égale à la trace du tenseur de déformations élastiques divisée par 3 utilisée pour la formulation SIMO_MIEHE).

/ '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. C'est la relation de comportement par défaut pour les comportements incrémentaux.

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).

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, C_PLAN, COQUE, TUYAU, COQUE1D, BARRE, PMF et INCO.

Nombre de variables internes : 2

Signification : V1 : déformation plastique cumulée, V2 : indicateur de plasticité (0 pour élastique, 1 pour plastique). Avec les déformations de type SIMO_MIEHE uniquement (cf. [§3.3.3]), une variable interne supplémentaire V3 : trace du tenseur de déformations élastiques divisée par 3 utilisée pour la formulation SIMO_MIEHE.

Modélisation non locale supportée (voir [§ 3.3.1.3]) : GRAD_VARI

/ '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 supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, C_PLAN, COQUE, TUYAU, COQUE1D, INCO, PMF et BARRE.

Nombre de variables internes : 2

Signification (hormis modélisation BARRE) : V1 : déformation plastique cumulée, V2 : indicateur de plasticité (0 pour élastique, 1 pour plastique). Avec les déformations de type SIMO_MIEHE uniquement (cf. [§3.3.3]), une variable interne supplémentaire V3 : trace du tenseur de déformations élastiques divisée par 3 utilisée pour la formulation SIMO_MIEHE.

Modélisation non locale supportée (voir [§ 3.3.1.3]) : GRAD_VARI

/ '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, D_PLAN, AXIS et INCO.

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.

/ '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, D_PLAN, AXIS et INCO.

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.

/ '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, D_PLAN, AXIS, C_PLAN (par DEBORST, mot clé ALGO_C_PLAN [§3.3.5]), COQUE, TUYAU, COQUE1D, INCO, BARRE et PMF.

Nombre de variables internes (hormis les modélisations BARRE et PMF) : 7

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 pour la modélisation BARRE : 2

Signification : V1 : écrouissage cinématique \mathbf{X} .

V2 : indicateur de plasticité

/ 'VMIS_ECMI_TRAC'

Relation de comportement d'élasto-plasticité de VON MISES à écrouissage combiné, cinématique linéaire et isotrope non linéaire (Cf. [R5.03.02] 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).

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, C_PLAN, INCO, COQUE, TUYAU et COQUE1D (par DEBORST mot-clé ALGO_1D : modélisations BARRE, PMF, GRILLE).

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'écouissage cinématique \mathbf{X} .

/ 'VMIS_ECMI_LINE'

Relation de comportement d'élasto-plasticité de VON MISES à écouissage combiné, cinématique linéaire et isotrope linéaire (Cf. [R5.03.02] 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'écouissage cinématique), `ECRO_LINE(_FO)` (pour l'écouissage isotrope) et `ELAS(_FO)`.

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, C_PLAN, INCO, COQUE, TUYAU et COQUE1D (par `DEBORST` mot-clé `ALGO_1D` : modélisations `BARRE`, `PMF`, `GRILLE`).

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'écouissage cinématique \mathbf{X} .

/ '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 écouissage isotrope ('`VMIS_ISOT_LINE`' ou '`VMIS_ISOT_TRAC`'). L'intégration de ce modèle est réalisée par une méthode semi-implicite (codée en dur donc rien à préciser de particulier par l'utilisateur).

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, C_PLAN (par `DEBORST`, mot clé `ALGO_C_PLAN` [§3.3.5]), INCO, COQUE, TUYAU, COQUE1D et `DEBORST`, mot-clé `ALGO_1D` : `BARRE`, `PMF`, `GRILLE`.

Nombre de variables internes : 2

Signification : V1 : déformation plastique cumulée, V2 : vide donc vaut toujours 0.

/ 'CHABOCHE'

Relation de comportement de Chaboche en élasto-plasticité isotherme avec 2 tenseurs d'écouissage cinématique non linéaire (sans effet de l'écouissage sur le terme de rappel) plus un écouissage isotrope. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous les mots clés `CHABOCHE` et `ELAS` (Cf. [R5.03.04] pour plus de détails). Pour faciliter l'intégration de ce modèle, on peut utiliser le redécoupage automatique local du pas de temps (voir [§3.13.6], mot clé `ITER_INTE_PAS`).

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, C_PLAN, INCO, COQUE, TUYAU, COQUE1D (et par `DEBORST`, mot clé `ALGO_1D` : `PMF`, `BARRE`, `GRILLE`).

Nombre de variables internes : 14

Signification : V1 à V6 : 6 composantes du 1^{er} tenseur d'écouissage cinématique \mathbf{X}_1 , V7 à V12 : 6 composantes du 2^{ème} tenseur d'écouissage cinématique \mathbf{X}_2 , V13 : déformation plastique cumulée, V14 : vaut 1.

/ 'VISC_CIN1_CHAB'

Relation de comportement de Chaboche (rend compte du comportement cyclique du matériau) en élasto-(visco)-plasticité avec un tenseur d'écouissage cinématique non linéaire, un écouissage isotrope non linéaire, un effet d'écouissage sur la variable tensorielle de rappel et éventuellement la prise en compte de la viscosité. Toutes les constantes du matériau peuvent éventuellement dépendre de la température (contrairement à `CHABOCHE`). 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` si on tient compte de la viscosité (dans le cas où il n'y a pas de viscosité surtout ne pas renseigner `LEMAITRE`). L'intégration est totalement implicite.

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

Date : 31/01/06
Clé : U4.51.11-B1 Page : 11/46

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, C_PLAN (par DEBORST, mot clé ALGO_C_PLAN [§3.3.5]), INCO, COQUE, TUYAU, COQUE1D (et par DEBORST, mot clé ALGO_1D : PMF, BARRE, GRILLE).

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'écroissage cinématique \mathbf{X} .

/ 'VISC_CIN2_CHAB'

Relation de comportement de Chaboche (rend compte du comportement cyclique du matériau) en élasto-(visco)-plasticité avec 2 tenseurs d'écroissage cinématique non linéaire, un écroissage isotrope non linéaire, un effet d'écroissage sur la variable tensorielle de rappel et éventuellement la prise en compte de la viscosité. Toutes les constantes du matériau peuvent éventuellement dépendre de la température (contrairement à CHABOCHE). 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 si on tient compte de la viscosité (dans le cas où il n'y a pas de viscosité surtout ne pas renseigner LEMAITRE). L'intégration est totalement implicite.

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, C_PLAN (par DEBORST, mot clé ALGO_C_PLAN [§3.3.5]), INCO, COQUE, TUYAU, COQUE1D (et par ALGO_1D/DEBORST : PMF, BARRE, GRILLE).

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 .

/ 'NORTON_HOFF'

Relation de comportement de viscosité indépendante de la température, à utiliser notamment 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' [§3.11]). Il est fortement conseillé d'employer de la recherche linéaire (voir mot clé RECH_LINEAIRE [§3.9]). 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.

Nombre de variables internes : 2

Signification : V1 : seuil correspondant au plus grand saut de déplacement (en norme) jamais atteint, V2 : indicateur de fissuration (0 pour régime élastique, 1 pour régime adoucissant).

/ '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. [§3.11]).

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.

/ '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. [§3.11]).

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.

/ '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` ou `PETIT_REAC` pour le moment), 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, dans le cadre du partenariat Ecole des Mines - EDF, pour des calculs de R&D uniquement, ce qui exclut notamment dans la version 8.2 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`

3.1.1.2 Modèles locaux avec endommagement**Attention :**

La réponse d'un modèle de comportement local avec endommagement est dépendante du maillage.

/ 'ENDO_FRAGILE'

Relation de comportement élastique fragile. Il s'agit d'une modélisation locale 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 supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, C_PLAN, INCO, COQUE, TUYAU et COQUE1D.

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).

Modélisation non locale supportée (voir [§ 3.3.1.3]) : `GRAD_VARI` et `GRAD_EPSI`.

/ '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 supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, C_PLAN (par `DEBORST`, mot clé `ALGO_C_PLAN` [§3.3.5]), INCO, COQUE, TUYAU, COQUE1D.

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)).

Modélisation non locale supportée (voir [§ 3.3.1.3]) : `GRAD_EPSI`

/ '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 supportées : 3D, D_PLAN, AXIS (par `DEBORST` : C_PLAN ...)

Nombre de variables internes : 7

Signification : V1 à V6 : tenseur d'endommagement de traction
V7 : endommagement de compression

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' voir [§3.3.3]) et pour les deux autres d'une formulation type 'PETIT_REAC' (`DEFORMATION` : 'PETIT_REAC' voir [§3.3.3]). 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' (voir [§3.3.3]). 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 [§3.7.4], 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 supportées : 3D, D_PLAN, AXIS.

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).

/ **'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', voir [§3.3.3], (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 (voir [§3.13.6], mot clé ITER_INTE_PAS).

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, C_PLAN (par DEBORST, mot clé ALGO_C_PLAN [§3.3.5]), INCO, COQUE, TUYAU et COQUE1D.

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).

/ **'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', voir [§3.3.3], (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 (voir [§3.12.5], 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 :

PARAM_THETA : 0.5
CONVERGENCE : (RESO_INTE : 'IMPLICITE')

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, C_PLAN (par DEBORST, mot clé ALGO_C_PLAN [§3.3.5]), INCO, COQUE, TUYAU et COQUE1D.

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).

/ **'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, D_PLAN, AXIS, C_PLAN, INCO, COQUE, TUYAU et COQUE1D.

Nombre de variables internes : 9

Signification : V1 à V6 : déformation viscoplastique, V7 : déformation plastique cumulée, V8 : écrouissage isotrope, V9 : endommagement.

3.1.1.3 Modèles non locaux

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.

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.

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`.

Les différentes lois disponibles en non locale sont les suivantes :

/ **'ENDO_FRAGILE'**

Cf. [R5.04.02] pour plus de détail pour la version non locale.

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)).

/ **'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. 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.

/ **'VMIS_ISOT_LINE'**

Cf. [R5.04.02] pour plus de détail sur la version non locale.

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).

/ **'VMIS_ISOT_TRAC'**

Cf. [R5.04.02] pour plus de détail sur la version non locale.

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).

/ **'ENDO_ISOT_BETON'**

Cf. [R5.04.02] pour plus de détail sur la version non locale.

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)).

/ **'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**.

Modélisation supportée : **GRAD_EPSI**

Nombre de variables internes : 7

Signification : V1 à V6 : tenseur d'endommagement de traction
V7 : endommagement de compression

/ **'MAZARS'**

Cf. [R7.01.08] pour plus de détail sur la version non locale.

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.

/ 'ROUSSELIER'

Cf. [R5.04.02] pour plus de détail pour la version non locale.

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).

3.1.1.4 Modèles décrivant le phénomène de déformation progressive

/ 'VISC_TAHERI'

Relation de comportement (visco)-plastique modélisant la réponse de matériaux sous chargement plastique cyclique. 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 plastique.

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, C_PLAN (par `DEBORST`, mot clé `ALGO_C_PLAN` [§3.3.5]), INCO, COQUE, TUYAU et COQUE1D.

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).

/ 'POLY_CFC'

Relation de comportement élasto-visco-plastique basée sur l'approche polycristalline, développée au Centre des Matériaux de l'École des Mines de Paris. Elle permet de traiter les matériaux à structure Cubique à Face Centrée présentant une texture isotrope, sous chargements monotones ou cycliques. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous les mots clés `POLY_CFC(_FO)` et `ELAS(_FO)` (Cf. [R5.03.13] pour plus de détails). L'intégration de ce modèle ne peut se faire qu'avec la méthode `RUNGE KUTTA 2` (voir [§3.13.7], mot clé `RESO_INTE`).

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, C_PLAN, INCO, COQUE, TUYAU, BARRE et COQUE1D.

Nombre de variables internes : 1688

Signification : Cf. [R5.03.13]

3.1.1.5 Comportements de microstructures

Modèles décrivant le comportement de microstructures.

/ 'POLYCRISTAL'

/ 'MONOCRISTAL'

◆ `COMPOR = comp` [compor]

Ces modèles permettent de décrire le comportement d'un monocristal ou 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].

Modélisation : 3D

3.1.1.6 Comportements spécifiques aux crayons combustibles

/ '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 c'est-à-dire :

```
PARAM_THETA      : 0.5  
CONVERGENCE      : (RESO_INTE : 'IMPLICITE' )
```

Modélisations supportées : 3D, `D_PLAN`, `AXIS`, `C_PLAN` (par `DEBORST`, mot clé `ALGO_C_PLAN` [§3.3.5]), `INCO`, `COQUE`, `TUYAU`, `BARRE` et `COQUE1D`.

Nombre de variables internes : 2

Signification : `V1` : déformation plastique cumulée, `V2` : vide donc vaut toujours 0.

/ '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].

Le modèle est disponible en 3D, déformations planes (`D_PLAN`), et axisymétrie (`AXIS`) sous le nom de `LMARC`.

Variables internes : 20

- trois variables d'écrouissage cinématique. `X`, `X1`, `X2` (18 variables internes)
- déformation viscoplastique cumulée `p`
- indicateur de plasticité

Les propriétés matériau sont définies dans `DEFI_MATERIAU` sous les mots-clés `ELAS (_FO)` et `LMARC (_FO)`.

/ '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 c'est-à-dire :

```
PARAM_THETA      : 0.5  
CONVERGENCE      : (RESO_INTE : 'IMPLICITE' )
```

Modélisations supportées : 3D, `D_PLAN`, `AXIS`, `C_PLAN` (par `DEBORST`, mot clé `ALGO_C_PLAN` [§3.3.6]), `INCO`, `COQUE`, `TUYAU`, `BARRE` et `COQUE1D`.

Nombre de variables internes : 2

Signification : `V1` : déformation plastique cumulée, `V2` : vide donc vaut toujours 0.

/ 'VISC_IRRA_LOG'

Loi de fluage axial sous irradiation des tubes guide .Elle permet de modéliser le fluage primaire et secondaire (loi de type time hardening) Les paramètres sont fournis dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous les mots clés `VISC_IRRA_LOG`.

Modélisations supportées : 3D, `D_PLAN`, `AXIS`, `C_PLAN` (par `DEBORST`, mot clé `ALGO_C_PLAN` [§3.3.6]), (`COQUE`, `COQUE_1D`, `TUYAU`) et par `DEBORST`, mot clé `ALGO_1D` : `BARRE`, `PMF`, `GRILLE`.

Nombre de variables internes : 2

Signification : `V1` : déformation visco-plastique cumulée, `V2` : vide donc vaut toujours 0.

/ GATT_MONNERIE

La loi de comportement thermomécanique du combustible "Gatt-Monerie" permet de simuler des essais d'indentation. 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.

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

/ 'GRAN_IRRA_LOG'

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 `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`. Les caractéristiques de fluage (relation de comportement de type `LEMAITRE` modifiée pour l'intégration du modèle est réalisée par une méthode semi-implicite (codée en dur donc rien de particulier à préciser par l'utilisateur).

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, C_PLAN, (par `DEBORST`, mot-clé `ALGO_C_PLAN` [§3.3.5]), INCO, TUYAU, PMF

Nombre de variables internes : 1

V1 : déformation visco-plastique équivalente cumulée,

/ **'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. Pour les modélisations 1D (`POU`), on a le choix du schéma d'intégration (implicite ou semi-implicite), mais on conseille d'utiliser une intégration semi-implicite c'est-à-dire :

```
PARM_THETA      : 0.5  
CONVERGENCE     : (RESO_INTE : 'IMPLICITE' )
```

Pour toutes les autres modélisations, l'intégration du modèle est réalisée par une méthode semi-implicite (codée en dur donc rien de particulier à préciser par l'utilisateur).

Modélisations supportées : 3D, `D_PLAN`, `AXIS`, `C_PLAN`, (par `DEBORST`, mot-clé `ALGO_C_PLAN` [§3.3.5]), `INCO`, `TUYAU` et `POU` (uniquement `POU_D_T` et `POU_D_E`).

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.

/ **'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.

/ **'LEMA_SEUIL'**

Relation de comportement viscoplastique avec seuil 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 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 (codée en dur donc rien de particulier à préciser par l'utilisateur).

Modélisations supportées : 3D, `D_PLAN`, `AXIS`, `C_PLAN`, (par `DEBORST`, mot-clé `ALGO_C_PLAN` [§3.3.5]), `INCO`, `TUYAU`.

Nombre de variables internes : 2

V1 : déformation plastique cumulée,
V2 : représente le seuil actuel

3.1.1.7 Comportements spécifiques aux éléments discrets et poutres

/ 'DIS_GRICRA'

Le comportement `DIS_GRICRA` s'appuie sur des éléments discrets à 2 nœuds, avec 6 ddl par nœud (translation+rotation). A partir des degrés de liberté globaux, on résout 3 sous-systèmes : 2 bossettes + 1 ressort pour lesquels on fait le bilan des forces. On se ramène ensuite au système global en exprimant la force global et le moment. La loi de comportement sur chaque sous-système 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 caractérisant le contact et le frottement sont fournis dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous le mot clé `DIS_GRICRA`. Contrairement aux autres discrets, on ne prend pas en compte les caractéristiques de rigidité de `AFFE_CARA_ELEM`. La matrice de rigidité du discret doit donc être prise nulle dans `AFFE_CARA_ELEM`. La rigidité est seulement issue des paramètres dans `DEFI_MATERIAU`.

Le contact unilatéral a lieu dans la direction X donnée par la maille `SEG2` de l'élément discret, et le glissement a lieu dans la direction Y donnée par le mot clé `ORIENTATION` de `AFFE_CARA_ELEM` (Cf. [R5.03.17] pour plus de détails). La matrice tangente est non symétrique. Modélisations supportées : `DIS_TR`

Nombre de variables internes : 12

Signification :

/ '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. 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 `AFFE_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 `AFFE_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 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.

/ 'DIS_CHOC'

Modèle isotherme de choc avec frottement de Coulomb s'appuyant sur un élément discret à 1 ou 2 nœuds. Les paramètres caractérisant le choc et le frottement sont fournis dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous le mot clé `DIS_CONTACT`. En comparaison à `DIS_CONTACT`, ce modèle est à utiliser préférentiellement en dynamique (écriture du comportement en vitesse) [R5.03.17].

Modélisations supportées : `3D_DIS`

Nombre de variables internes : 7

Remarque :

*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).*

/ '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 [§3.13.7], 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.

/ '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 [§3.13.7], 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.

/ '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`.

Modélisations supportées : `3D_DIS`

Nombre de variables internes : 1

Signification : `V1` : valeur maximale atteinte de la quantité en valeur absolue ($u_y - u_e$) où u_y est le déplacement dans la direction locale y de la maille `SEG2` et le le déplacement limite du domaine élastique.

/ '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`.

Modélisations supportées : `3D_DIS`

Nombre de variables internes : 4

Signification : `V1` : déplacement réduit équivalent maximal atteint pour le premier mécanisme de déformation, `V2` : déplacement réduit équivalent maximal atteint pour le second mécanisme de déformation, `V3` : indicateur de plasticité, `V4` : vide donc vaut 0.

/ '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).

/ '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).

/ '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.

3.1.1.8 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).

Signification des lettres pour les comportements métallurgiques :

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

On peut activer par le mot clé `RELATION_KIT` [§3.3.2] de l'opérateur `STAT_NON_LINE` deux types de matériau, soit `ACIER` qui comporte au plus 5 phases métallurgiques différentes, soit `ZIRC` qui comporte au plus 3 phases métallurgiques différentes.

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

Date : 31/01/06
Clé : U4.51.11-B1 Page : 24/46

Exemple :

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

Dans ce cas, pour chaque phase métallurgique en présence dans le matériau (3 ou 2 ou 1), on renseigne une courbe de traction.

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

Remarque :

Pour toutes les lois métallurgiques, les contraintes planes sont impossibles même avec la méthode DEBORST (cf. [§3.3.5]).

/ 'META_P_IL'

Relation de comportement d'élasto-plasticité de VON MISES à écrouissage isotrope linéaire. Dans les effets dus aux transformations structurales, les phénomènes de plasticité de transformation et de restauration d'écrouissage métallurgique sont négligés. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés ELAS_META(_FO) et META_ECRO_LINE.

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

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

Date : 31/01/06
Clé : U4.51.11-B1 Page : 25/46

/ 'META_P_INL'

Relation de comportement d'élasto-plasticité de VON MISES à écrouissage isotrope non linéaire. Dans les effets dus aux transformations structurales, les phénomènes de plasticité de transformation et de restauration d'écrouissage métallurgique sont négligés. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous les mots clés `ELAS_META(_FO)` et `META_TRACTION`. **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.**

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

/ 'META_P_IL_PT'

Relation de comportement d'élasto-plasticité de VON MISES à écrouissage isotrope linéaire. Dans les effets dus aux transformations structurales, on tient compte du phénomène de plasticité de transformation mais on néglige celui de la restauration d'écrouissage métallurgique. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous les mots clés `ELAS_META(_FO)`, `META_ECRO_LINE` et `META_PT`.

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

/ 'META_P_INL_PT'

Relation de comportement d'élasto-plasticité de VON MISES à écrouissage isotrope non linéaire. Dans les effets dus aux transformations structurales, on tient compte du phénomène de plasticité de transformation mais on néglige celui de la restauration d'écrouissage métallurgique. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous les mots clés `ELAS_META(_FO)`, `META_TRACTION` et `META_PT`. **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.**

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

/ 'META_P_IL_RE'

Relation de comportement d'élasto-plasticité de VON MISES à écrouissage isotrope linéaire. Dans les effets dus aux transformations structurales, on tient compte du phénomène de restauration d'écrouissage métallurgique mais on néglige celui de la plasticité de transformation. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous les mots clés `ELAS_META(_FO)`, `META_ECRO_LINE` et `META_RE`.

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

/ 'META_P_INL_RE'

Relation de comportement d'élasto-plasticité de VON MISES à écrouissage isotrope non linéaire. Dans les effets dus aux transformations structurales, on tient compte du phénomène de restauration d'écrouissage métallurgique mais on néglige celui de la plasticité de transformation. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous les mots clés `ELAS_META(_FO)`, `META_TRACTION` et `META_RE`. **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.**

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

/ 'META_P_IL_PT_RE'

Relation de comportement d'élasto-plasticité de VON MISES à écrouissage isotrope linéaire. On tient compte du phénomène de plasticité de transformation et de la restauration d'écrouissage métallurgique. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous les mots clés `ELAS_META(_FO)`, `META_ECRO_LINE`, `META_PT` et `META_RE`.

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

/ 'META_P_INL_PT_RE'

Relation de comportement d'élasto-plasticité de VON MISES à écrouissage isotrope non linéaire. On tient compte du phénomène de plasticité de transformation et de la restauration d'écrouissage métallurgique. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés ELAS_META(_FO), META_TRACTION, META_PT et META_RE. **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.**

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

/ 'META_P_CL'

Relation de comportement d'élasto-plasticité de VON MISES à écrouissage cinématique linéaire. Dans les effets dus aux transformations structurales, les phénomènes de plasticité de transformation et de restauration d'écrouissage métallurgique sont négligés. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés ELAS_META(_FO) et META_ECRO_LINE.

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

/ 'META_P_CL_PT'

Relation de comportement d'élasto-plasticité de VON MISES à écrouissage cinématique linéaire. Dans les effets dus aux transformations structurales, on tient compte du phénomène de plasticité de transformation mais on néglige celui de la restauration d'écrouissage métallurgique. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés ELAS_META(_FO), META_ECRO_LINE et META_PT.

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

/ 'META_P_CL_RE'

Relation de comportement d'élasto-plasticité de VON MISES à écrouissage cinématique linéaire. Dans les effets dus aux transformations structurales, on tient compte du phénomène de restauration d'écrouissage métallurgique mais on néglige celui de la plasticité de transformation. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés ELAS_META(_FO), META_ECRO_LINE et META_RE.

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

/ 'META_P_CL_PT_RE'

Relation de comportement d'élasto-plasticité de VON MISES à écrouissage cinématique linéaire. On tient compte du phénomène de plasticité de transformation et de la restauration d'écrouissage métallurgique. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés ELAS_META(_FO), META_ECRO_LINE, META_PT et META_RE.

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

/ 'META_V_IL'

Relation de comportement élasto-visco-plastique. Le modèle est isotrope avec une fonction seuil de type VON MISES et un écrouissage isotrope linéaire avec restauration visqueuse de l'écrouissage. On ne tient pas compte des phénomènes de plasticité de transformation et de restauration d'écrouissage métallurgique. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés ELAS_META(_FO), META_ECRO_LINE et META_VISC_FO.

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

/ 'META_V_INL'

Relation de comportement élasto-visco-plastique. Le modèle est isotrope avec une fonction seuil de type VON MISES et un écrouissage isotrope non linéaire avec restauration visqueuse de l'écrouissage. On ne tient pas compte des phénomènes de plasticité de transformation et de restauration d'écrouissage métallurgique. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous les mots clés `ELAS_META(_FO)`, `META_TRACTION` et `META_VISC_FO`. **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.**

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

/ 'META_V_IL_PT'

Relation de comportement élasto-visco-plastique. Le modèle est isotrope avec une fonction seuil de type VON MISES et un écrouissage isotrope linéaire avec restauration visqueuse de l'écrouissage. Dans les effets dus aux transformations structurales, on tient compte du phénomène de plasticité de transformation mais on néglige celui de la restauration d'écrouissage métallurgique. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous les mots clés `ELAS_META(_FO)`, `META_ECRO_LINE`, `META_VISC_FO` et `META_PT`.

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

/ 'META_V_INL_PT'

Relation de comportement élasto-visco-plastique. Le modèle est isotrope avec une fonction seuil de type VON MISES et un écrouissage isotrope non linéaire avec restauration visqueuse de l'écrouissage. Dans les effets dus aux transformations structurales, on tient compte du phénomène de plasticité de transformation mais on néglige celui de la restauration d'écrouissage métallurgique. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous les mots clés `ELAS_META(_FO)`, `META_TRACTION`, `META_VISC_FO` et `META_PT`. **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.**

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

/ 'META_V_IL_RE'

Relation de comportement élasto-visco-plastique. Le modèle est isotrope avec une fonction seuil de type VON MISES et un écrouissage isotrope linéaire avec restauration visqueuse de l'écrouissage. Dans les effets dus aux transformations structurales, on tient compte du phénomène de restauration d'écrouissage métallurgique mais on néglige celui de la plasticité de transformation. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous les mots clés `ELAS_META(_FO)`, `META_ECRO_LINE`, `META_VISC_FO` et `META_RE`.

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

/ 'META_V_INL_RE'

Relation de comportement élasto-visco-plastique avec une fonction seuil de type VON MISES, un écrouissage isotrope non linéaire et restauration visqueuse de l'écrouissage. Dans les effets dus aux transformations structurales, on tient compte du phénomène de restauration d'écrouissage métallurgique mais on néglige celui de la plasticité de transformation. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous les mots clés `ELAS_META(_FO)`, `META_TRACTION`, `META_VISC_FO` et `META_RE`. **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.**

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

/ 'META_V_IL_PT_RE'

Relation de comportement élasto-visco-plastique. Le modèle est isotrope avec une fonction seuil de type VON MISES et un écrouissage isotrope linéaire avec restauration visqueuse de l'écrouissage. On tient compte du phénomène de plasticité de transformation et de la restauration d'écrouissage métallurgique. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés ELAS_META(_FO), META_ECRO_LINE, META_VISC_FO, META_PT et META_RE.

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

/ 'META_V_INL_PT_RE'

Relation de comportement élasto-visco-plastique. Le modèle est isotrope avec une fonction seuil de type VON MISES et un écrouissage isotrope non linéaire avec restauration visqueuse de l'écrouissage. On tient compte du phénomène de plasticité de transformation et de la restauration d'écrouissage métallurgique. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés ELAS_META(_FO), META_TRACTION, META_VISC_FO, META_PT et META_RE. **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.**

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

/ 'META_V_CL'

Relation de comportement élasto-visco-plastique. Le modèle est isotrope avec une fonction seuil de type VON MISES et un écrouissage cinématique linéaire avec restauration visqueuse de l'écrouissage. On ne tient pas compte des phénomènes de plasticité de transformation et de restauration d'écrouissage métallurgique. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés ELAS_META(_FO), META_ECRO_LINE et META_VISC_FO.

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

/ 'META_V_CL_PT'

Relation de comportement élasto-visco-plastique. Le modèle est isotrope avec une fonction seuil de type VON MISES et un écrouissage cinématique linéaire avec restauration visqueuse de l'écrouissage. Dans les effets dus aux transformations structurales, on tient compte du phénomène de plasticité de transformation mais on néglige celui de la restauration d'écrouissage métallurgique. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés ELAS_META(_FO), META_ECRO_LINE, META_VISC_FO et META_PT.

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

/ 'META_V_CL_RE'

Relation de comportement élasto-visco-plastique. Le modèle est isotrope avec une fonction seuil de type VON MISES et un écrouissage cinématique linéaire avec restauration visqueuse de l'écrouissage. Dans les effets dus aux transformations structurales, on tient compte du phénomène de restauration d'écrouissage métallurgique mais on néglige celui de la plasticité de transformation. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés ELAS_META(_FO), META_ECRO_LINE, META_VISC_FO et META_RE.

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

/ **'META_V_CL_PT_RE'**

Relation de comportement élasto-visco-plastique. Le modèle est isotrope avec une fonction seuil de type VON MISES et un écrouissage cinématique linéaire avec restauration visqueuse de l'écrouissage. On tient compte du phénomène de plasticité de transformation et de la restauration d'écrouissage métallurgique. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous les mots clés `ELAS_META(_FO)`, `META_ECRO_LINE`, `META_VISC_FO`, `META_PT` et `META_RE`.

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, INCO.

3.1.1.9 Comportement pour le béton/ **'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 [§3.13.6], mot clé `ITER_INTE_PAS`).

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, C_PLAN (par `DEBORST`, mot clé `ALGO_C_PLAN` [§3.3.5]), INCO, COQUE, TUYAU et COQUE1D.

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.

/ **'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 supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, C_PLAN, INCO, COQUE, TUYAU et COQUE1D.

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.

Modélisation non locale supportée (voir [§3.3.1.3]) : `GRAD_EPSI`.

/ **'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.

/ '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.

/ '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.

/ '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]

/ '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 : `BARRE`

Nombre de variables internes : 8

Signification : cf. le document [R5.03.09]

/ `GLRC`

Modèle élasto-plastique de plaque en béton armé exprimé en variables globales (efforts – déformations généralisées), avec influence éventuelle de l'effort membranaire sur les limites d'élasticité en flexion.

Modélisations supportées : `DKTG`

Nombre de variables internes : 7

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

Date : 31/01/06
Clé : U4.51.11-B1 Page : 31/46

/ 'CORR_ACIER'

Modèle élasto-plastique endommageable pour lequel la déformation plastique à rupture dépend du taux de corrosion.

Modélisations : 3D, D_PLAN, AXIS, BARRE, PMF

3 variables internes

V1 : déformation plastique cumulée
V2 : coefficient d'endommagement
V3 : indicateur de plasticité

/ '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.

/ '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, D_PLAN, AXIS, C_PLAN, INCO, COQUE, TUYAU et COQUE1D.

Nombre de variables internes : 55

Signification : Cf. [R7.01.01]

/ '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, D_PLAN, AXIS, C_PLAN, INCO, COQUE, TUYAU et COQUE1D.

Nombre de variables internes : 55

Signification : Cf. [R7.01.01]

/ 'GRANGER_FP_INDT'

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

/ '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, D_PLAN, AXIS, C_PLAN, INCO, COQUE, TUYAU, BARRE et COQUE1D.

/ '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, D_PLAN, AXIS, C_PLAN (par `DEBORST`, mot clé `ALGO_C_PLAN` [§3.3.6]), INCO, COQUE, TUYAU, BARRE et `COQUE1D`.

Nombre de variables internes : 1

Signification : V1 : valeur de l'hygrométrie

/ '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 `GRANGER_FP` ou `GRANGER_FP_V` avec soit `ELAS`, soit `BETON_DOUBLE_DP`, soit `VMIS_ISOT_TRAC`, soit `VMIS_ISOT_LINE`, soit `ROUSS_PR` ou soit `CHABOCHE`. Les deux modèles à associer sont à préciser dans `RELATION_KIT` [§3.3.2]. 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.

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

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, C_PLAN, INCO, COQUE, TUYAU, BARRE et `COQUE1D`.

Exemple :

```
STAT_NON_LINE = (  
  COMP_INCR = _F(  
    RELATION      = 'KIT_DDI'  
    RELATION_KIT = ('GRANGER_FP', 'BETON_DOUBLE_DP'))  
  )
```

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.

3.1.1.10 Comportement pour les milieux poreux (modélisation 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].

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.

Pour chaque phénomène modélisé (thermique et/ou mécanique et/ou hydraulique), on doit préciser dans `RELATION_KIT` [§3.3.2.3] :

- le modèle de comportement mécanique du squelette,
- le comportement des liquides/gaz,
- le comportement thermique.

De plus, dans tous les cas, on doit impérativement renseigner :

- `HYDR_UTIL` (si le comportement mécanique n'est pas endommageable, i.e. si l'on n'utilise pas `'MAZARS'` ou `'ENDO_ISOT_BETON'`) ou `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)
- `THM_INIT` dans `DEFI_MATERIAU`.

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.

Attention :

Selon le `KIT_XXXX` choisi, tous les comportements ne sont pas licites (par exemple si on choisit un milieu poreux non saturé, on ne peut pas affecter un comportement de type gaz parfait). Le [§3.3.2.3] résume toutes les combinaisons possibles.

/ 'KIT_HM'

Modélisation du couplage des phénomènes mécaniques et hydriques pour des milieux poreux saturés. Il faut préciser dans `RELATION_KIT` le comportement mécanique du squelette, le comportement du liquide ou gaz ou mélange liquide/gaz (pression du gaz constante) et `HYDR_UTIL`.

Modélisation supportée : `THM`

/ 'KIT_THM'

Modélisation du couplage des phénomènes mécaniques, thermiques et hydriques pour des milieux saturés. Il faut préciser dans `RELATION_KIT` le comportement mécanique du squelette, le comportement thermique, le comportement du liquide ou gaz ou mélange liquide/gaz (pression du gaz constante) et `HYDR_UTIL`.

Modélisation supportée : `D_PLAN_THM`, `D_PLAN_THMD`, `AXIS_THM`, `AXIS_THMD`, `3D_THM`, `3D_THMD`

/ 'KIT_HHM'

Modélisation du couplage des phénomènes mécaniques et hydriques pour des milieux poreux non saturés. Il faut préciser dans `RELATION_KIT` le comportement mécanique du squelette, le comportement du mélange liquide et/ou gaz et/ou vapeur et `HYDR_UTIL`.

Modélisations supportées : `D_PLAN_HHM`, `D_PLAN_HHMD`, `AXIS_HHM`, `AXIS_HHMD`, `3D_HHM`, `3D_HHMD`, `D_PLAN_HH2MD`, `AXIS_HH2MD`

/ **'KIT_THH'**

Modélisation du couplage des phénomènes thermiques et hydriques pour des milieux poreux non saturés. Il faut préciser dans `RELATION_KIT` le comportement thermique, le comportement du mélange liquide et/ou gaz et/ou vapeur et `HYDR_UTIL`.

Modélisations supportées : `D_PLAN_THH`, `D_PLAN_THHD`, `AXIS_THH`, `AXIS_THHD`, `3D_THH`, `3D_THHD`, `D_PLAN_THH2D`, `AXIS_THH2D`

/ **'KIT_THV'**

Modélisation du couplage des phénomènes thermiques et hydriques pour des milieux poreux saturés par un composant présent sous forme liquide ou vapeur. Il faut préciser dans `RELATION_KIT` le comportement thermique, le comportement du mélange liquide vapeur et `HYDR_UTIL`.

Modélisations supportées : `D_PLAN_THVD`, `AXIS_THVD`, `3D_THVD`

/ **'KIT_THHM'**

Modélisation du couplage des phénomènes mécaniques, thermiques et hydriques pour des milieux non saturés. Il faut préciser dans `RELATION_KIT` le comportement mécanique du squelette, le comportement thermique, le comportement du mélange liquide et/ou gaz et/ou vapeur et `HYDR_UTIL`.

Modélisations supportées : `D_PLAN_THHM`, `D_PLAN_THHMD`, `AXIS_THHM`, `AXIS_THHMD`, `3D_THHM`, `3D_THHMD`, `D_PLAN_THH2MD`, `AXIS_THH2MD`

/ **'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). Ce modèle peut être utilisé indépendamment des relations `KIT_XXXX`. 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 [§3.13.6], mot clé `ITER_INTE_PAS`).

Dans `CONVERGENCE` [§3.13], si `ITER_INTE_MAXI` est strictement positif, le calcul ne s'arrête pas si non convergence locale. Par ailleurs, si `ITER_INTE_PAS` est strictement négatif, le calcul s'arrête si la convergence locale n'est pas atteinte.

Modélisations supportées : `3D`, `D_PLAN`, `AXIS`, `C_PLAN` (par `DEBORST`, mot clé `ALGO_C_PLAN` [§3.3.5]), `INCO`, `COQUE`, `TUYAU`, `BARRE`, `COQUE1D` et `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).

/ 'LAIGLE'

Relation de comportement pour la modélisation des roches suivant le modèle de Laigle. Ce modèle peut être utilisé indépendamment des relations `KIT_XXXX`. 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 (voir [§3.13.6], mot clé `ITER_INTE_PAS`).

Modélisations supportées : 3D, `D_PLAN`, `AXIS`, `C_PLAN` et `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.

/ 'HOEK_BROWN'

Relation de comportement de Hoek et Brown modifiée pour la modélisation du comportement des roches [R7.01.18]. Ce modèle peut être utilisé indépendamment des relations `KIT_XXXX`. 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, `D_PLAN`, `AXIS`, `C_PLAN` et `THM`

Nombre de variables internes : 3

Signification :

`V1` : `V2` ;

`V3` : indicateur d'état.

/ 'ELAS_THM'

Relation de comportement élastique linéaire avec dépendance non linéaire des modules et coefficients de couplage par rapport à la température (Cf. [R7.01.11] pour plus de détails). Valable uniquement en milieu saturé. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous le mot clé `ELAS_THM`.

Modélisation supportée : `THM`

/ 'ELAS_THER'

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`.

Modélisation supportée : `THM`

/ 'CAM_CLAY'

Relation de comportement élasto-plastique pour des calculs en mécanique des sols normalement consolidés (Cf. [R7.01.14] pour plus de détail). La partie élastique est non-linéaire. La partie plastique peut être durcissante ou adoucissante. Ce modèle peut-être utilisé indépendamment des relations `KIT_XXX`. 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, `D_PLAN`, `AXIS` et `THM`

Nombre de variables internes : 2

Signification : `V1` : déformation plastique volumique, `V2` : indicateur de plasticité.

/ '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..

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).

/ '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 supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, C_PLAN, INCO, COQUE, TUYAU, BARRE, COQUE1D et THM.

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.

/ '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'écrouissage peut être linéaire ou parabolique.

Modélisation supportées : THM, 3D, D_PLAN, AXIS

Nombre de variables internes : 3

V1 : déformation déviatoire plastique cumulée, V2 : déformation volumique plastique cumulée, V3 indicateur d'état.

/ '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. En cas de chargement thermique, seule la déformation thermique est prise en compte, les coefficients matériaux étant supposés constants.

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, C_PLAN (par DEBORST, mot clé ALGO_C_PLAN [§3.3.5]), INCO, COQUE, TUYAU, BARRE, COQUE1D et THM.

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)).

3.1.2 Opérande RELATION_KIT sous COMP_INCR

◇ RELATION_KIT :

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).

3.1.2.1 KIT associé au comportement métallurgique

```
/ 'ACIER'  
/ 'ZIRC'
```

Permet de choisir pour toutes les lois de comportement de type META_XXX_XXX (Cf. [§3.3.1.7]) si on veut 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 (Cf. [§3.3.1.7] pour exemple).

3.1.2.2 KIT associé au comportement du béton

```
/ 'GRANGER_FP'  
/ 'GRANGER_FP_V'  
/ 'BETON_DOUBLE_DP'  
/ 'VMIS_ISOT_TRAC'  
/ 'VMIS_ISOT_LINE'  
/ 'ROUSS_PR'  
/ 'CHABOCHE'
```

Permet d'associer l'un des deux modèles de fluage GRANGER_FP ou GRANGER_FP_V avec un autre modèle parmi ceux cités ci-dessus. Sous le mot clé RELATION, on utilise le comportement KIT_DIDI (Cf. [§3.3.1.8] pour explication et exemple).

3.1.2.3 KIT associé au comportement des milieux poreux (relation KIT_XXXX)

Concerne, sous le mot clé RELATION, les comportements KIT_HM, KIT_THM, KIT_HHM, KIT_THH, KIT_THV et KIT_THHM (Cf. [§3.3.1.9] pour explication et exemple).

A - Comportements mécaniques disponibles sous KIT_XXXX

```
/ 'ELAS'  
/ 'CJS'  
/ 'LAIGLE'  
/ 'ELAS_THM'  
/ 'CAM_CLAY'  
/ 'BARCELONE'  
/ 'DRUCKER_PRAGER'  
/ 'MAZARS'  
/ 'ENDO_ISOT_BETON'
```

B - Comportement des gaz et liquides disponibles sous KIT_XXXX

```
/ 'GAZ'
```

Loi de comportement d'un gaz parfait c'est-à-dire vérifiant la relation $P / \rho = RT / Mv$ où P est la pression, ρ la masse volumique, Mv la masse molaire, R la constante de Boltzman et T la température (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_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_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 milieu 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`.

/ '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`.

C - Comportements thermiques disponibles sous `KIT_XXXX`

D - Comportements hydrauliques disponibles sous `KIT_XXXX`

/ 'HYDR_UTIL'

Permet de rentrer 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.

Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous le mot clé `THM_DIFFU`.

/ 'HYDR'

Ce comportement existe uniquement pour permettre au développeur de venir surcharger un profil afin de programmer en dur sa propre loi d'hydratation en fonction de la pression capillaire (et sa dérivée) et de la perméabilité en fonction de la saturation (et sa dérivée).

E - 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 :

('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 :

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' )
( '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' )
```

3.1.3 Opérande DEFORMATION sous COMP_INCR

◇ DEFORMATION :

/ 'PETIT'

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

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

/ '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.

/ '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), (Cf. [§3.3.1.7]).

Attention :

Cette option n'est valable que pour les modélisations 3D, D_PLAN, AXIS, 3D_INCO, AXIS_INCO et PLAN_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.

/ '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 :

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

/ '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 :

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

Attention :

Il est fortement déconseillé d'utiliser la recherche linéaire (cf. [§3.9]) avec l'option `GREEN_GR` (parfois la convergence est impossible et si on converge, le calcul a besoin de plus d'itérations de Newton).

3.1.4 Opérandes TOUT / GROUP_MA / MAILLE / GROUP_NO / NOEUD sous COMP_INCR

```

◇ / TOUT      : 'OUI'
  /  GROUP_MA : lgrma
    MAILLE    : lma
    
```

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

3.1.5 Opérande ALGO_C_PLAN

```

◇ 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'`.

Attention :

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

3.1.6 Opérande ALGO_1D

◇ 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).

Attention :

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

3.2 Mot clé COMP_ELAS

| COMP_ELAS :

Ce mot clé facteur regroupe les relations de comportement 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).

Petit dictionnaire des modélisations supportées par les lois de comportement

Pour ne pas surcharger ce document, nous appellerons par la suite :

- Modélisation 3D = les modélisations 3D et 3D_SI
- Modélisation D_PLAN = les modélisations D_PLAN et D_PLAN_SI
- Modélisation AXIS = les modélisations AXIS et AXIS_SI
- Modélisation C_PLAN = les modélisations C_PLAN et C_PLAN_SI

3.2.1 Opérande RELATION sous COMP_ELAS

◆ RELATION = / 'ELAS' [DEFAULT]
/ 'ELAS_VMIS_LINE'
/ 'ELAS_VMIS_TRAC'
/ 'ELAS_POUTRE_GR'
/ 'CABLE'

/ '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. C'est la relation de comportement par défaut pour les comportements élastiques.

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, C_PLAN, CABLE_POULIE et COQUE_3D (avec DEFORMATION : 'GREEN_GR').

/ '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, D_PLAN, AXIS et C_PLAN.

/ **'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, D_PLAN, AXIS et C_PLAN.

/ **'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`

/ **'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`

3.2.2 Opérande DEFORMATION sous COMP_ELAS◇ **DEFORMATION :**/ **'PETIT'** [DEFAULT]

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

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

/ **'GREEN'**

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

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

/ **'GREEN_GR'**

Permet de traiter les coques et les poutres en grands déplacements et grandes rotations (Cf. [R5.03.40] pour les poutres et [R3.07.05] pour les coques pour plus de détail). Pour les poutres, `GREEN_GR` n'est disponible que pour le comportement `'ELAS_POUTRE_GR'`, pour les coques uniquement avec `'ELAS'`.

Attention :

Pour les coques (modélisation `COQUE_3D`), il est fortement déconseillé d'utiliser la recherche linéaire (cf. [§3.9]) avec l'option `GREEN_GR` (parfois la convergence est impossible et si on converge, le calcul a besoin de plus d'itérations de Newton).

3.2.3 Opérandes TOUT / GROUP_MA / MAILLE / GROUP_NO / NOEUD sous COMP_ELAS

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

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

3.2.4 Opérandes RESI_INTE_RELA / ITER_INTE_MAXI

```
◇ RESI_INTE_RELA = / 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]. Ces opérandes sont **inutiles** avec les comportements ELAS, VMIS_CINE_LINE, VMIS_ECMI_LINE, VMIS_ECMI_TRAC, VMIS_ISOT_LINE, VMIS_ISOT_TRAC, VISC_ISOT_LINE, VISC_ISOT_TRAC, BARENBLATT, NORTON_HOFF, DIS_CONTACT, DIS_CHOC, ARME, ASSE_CORN, DIS_GOUJ2E_PLAS, DIS_GOUJ2E_ELAS, VMIS_ASYM_LINE, GRILLE_ISOT_LINE, GRILLE_CINE_LINE, GRILLE_PINTO_MEN, PINTO_MENEGOTTO, GRANGER_FP et GRANGER_FP_V (hors contrainte plane), BAZANT_FD et toutes les relations META_XXX.

3.2.5 Opérande ITER_INTE_PAS

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

Permet de redécouper localement le pas de temps pour faciliter l'intégration de la relation de comportement aux points de GAUSS (pour les relations de CHABOCHE, VISC_TAHERI, LMARC, LAIGLE, MONOCRISTAL, ROUSS_PR, ROUSS_VISC, CJS et BETON_DOUBLE_DP). 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.

3.2.6 Opérande RESO_INTE

```
◇ 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 :

- les modèles POLY_CFC et POLYCRISTAL sont traités uniquement par le schéma explicite de RUNGE-KUTTA d'ordre 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 VENDUCHAB peuvent être traités par les deux schémas IMPLICITE et RUNGE_KUTTA_2,
- les autres modèles utilisent le schéma IMPLICITE.

Page laissée intentionnellement blanche.