

**Manuel d'Utilisation**  
**Fascicule U4.5- : Méthode de résolution**  
**Document : U4.51.03**

# **Opérateur STAT\_NON\_LINE**

---

## **1 But**

---

Calculer l'évolution mécanique ou thermo-hydro-mécanique couplée, en quasi-statique, d'une structure en non linéaire.

La non linéarité est liée soit au comportement du matériau (par exemple plastique), soit à la géométrie (par exemple en grands déplacements). Pour avoir des détails sur la méthode de résolution employée, on se reportera à la documentation de référence [R5.03.01].

L'évolution peut être étudiée en plusieurs travaux successifs (concept réentrant), soit en poursuite (le dernier instant calculé est l'instant initial du calcul suivant), soit en reprise en partant d'un instant antérieur.

Si le temps nécessaire pour effectuer le calcul n'est pas suffisant, le programme s'interrompt, mais les résultats déjà calculés sont sauvegardés si une base de données a été définie dans le profil d'étude de l'utilisateur. Produit une structure de données de type `evol_noli`.

## Table des matières

<a href="#">1 But</a>	1
<a href="#">2 Syntaxe</a>	4
<a href="#">3 Opérandes</a>	8
<a href="#">3.1 Opérandes MODELE / CHAM MATER / CARA ELEM</a>	8
<a href="#">3.2 Mot clé EXCIT</a>	8
<a href="#">3.2.1 Opérandes CHARGE / FONC MULT</a>	8
<a href="#">3.2.2 Opérande TYPE CHARGE</a>	9
<a href="#">3.3 Mot clé COMP INCR</a>	10
<a href="#">3.3.1 Opérande RELATION</a>	10
<a href="#">3.3.1.1 Modèles classiques</a>	13
<a href="#">3.3.1.2 Modèles locaux avec endommagement</a>	16
<a href="#">3.3.1.3 Modèles non locaux</a>	18
<a href="#">3.3.1.4 Modèles décrivant le phénomène de déformation progressive</a>	20
<a href="#">3.3.1.5 Comportements spécifiques aux crayons combustibles</a>	21
<a href="#">3.3.1.6 Comportements spécifiques aux éléments de poutre et discrets</a>	21
<a href="#">3.3.1.7 Modèles mécaniques avec effets des transformations métallurgiques</a>	24
<a href="#">3.3.1.8 Comportement pour le béton</a>	29
<a href="#">3.3.1.9 Comportement pour les milieux poreux (modélisation thermo-hydro-mécanique)</a>	32
<a href="#">3.3.2 Opérande RELATION KIT sous COMP INCR</a>	35
<a href="#">3.3.2.1 KIT associé au comportement métallurgique</a>	35
<a href="#">3.3.2.2 KIT associé au comportement du béton</a>	35
<a href="#">3.3.2.3 KIT associé au comportement des milieux poreux (relation KIT xxxx)</a>	36
<a href="#">3.3.3 Opérande DEFORMATION sous COMP INCR</a>	39
<a href="#">3.3.4 Opérandes TOUT / GROUP MA / MAILLE / GROUP NO / NOEUD sous COMP INCR</a>	40
<a href="#">3.3.5 Opérande ALGO C PLAN</a>	40
<a href="#">3.4 Mot clé COMP ELAS</a>	40
<a href="#">3.4.1 Opérande RELATION sous COMP ELAS</a>	41
<a href="#">3.4.2 Opérande DEFORMATION sous COMP ELAS</a>	42
<a href="#">3.4.3 Opérandes TOUT / GROUP MA / MAILLE / GROUP NO / NOEUD sous COMP ELAS</a>	42
<a href="#">3.5 Mot clé VARI COMM</a>	42
<a href="#">3.5.1 Opérande IRRA</a>	42
<a href="#">3.6 Mot clé ETAT INIT</a>	43
<a href="#">3.6.1 Opérandes SIGM / VARI / DEPL / VARI NON LOCAL</a>	43
<a href="#">3.6.2 Opérandes EVOL NOLI</a>	43
<a href="#">3.6.3 Opérande NUME ORDRE / INST / NUME DIDI</a>	43
<a href="#">3.6.4 Opérande INST ETAT INIT</a>	43
<a href="#">3.6.5 Opérande PRECISION / CRITERE</a>	44
<a href="#">3.7 Mot clé INCREMENT</a>	45
<a href="#">3.7.1 Opérandes LIST INST / EVOLUTION</a>	45
<a href="#">3.7.2 Opérandes NUME INST INIT / INST INIT / NUME INST FIN / INST FIN</a>	45
<a href="#">3.7.3 Opérande PRECISION</a>	46
<a href="#">3.7.4 Opérande SUBD PAS / SUBD PAS MINI / COEF SUBD PAS 1</a>	46
<a href="#">3.7.5 Opérande OPTI LIST INST / NOM CHAM / NOM CMP / VALEUR</a>	47
<a href="#">3.8 Mot clé NEWTON</a>	47

Titre : Opérateur STAT\_NON\_LINE

Auteur(s) : V. CANO

Clé : U4.51.03-F

Date : 18/03/03

Page : 3/60

3.8.1	<a href="#">Opérande PREDICTION</a>	48
3.8.2	<a href="#">Opérande MATRICE</a>	49
3.8.3	<a href="#">Opérande EVOL NOLI</a>	49
3.9	<a href="#">Mot clé RECH LINEAIRE</a>	49
3.9.1	<a href="#">Opérande RESI LINE RELA / ITER LINE MAXI</a>	50
3.10	<a href="#">Opérande PARM THETA</a>	50
3.11	<a href="#">Mot clé PILOTAGE</a>	50
3.11.1	<a href="#">Opérande TYPE</a>	50
3.11.2	<a href="#">Opérandes NOEUD / GROUP_NO</a>	52
3.11.3	<a href="#">Opérandes TOUT / MAILLE / GROUP_MA</a>	52
3.11.4	<a href="#">Opérande NOM_CMP</a>	52
3.11.5	<a href="#">Opérande COEF_MULT</a>	52
3.11.6	<a href="#">Opérande ETA PILO MAX / ETA PILO MIN</a>	53
3.12	<a href="#">Mot clé SOLVEUR</a>	53
3.13	<a href="#">Mot clé CONVERGENCE</a>	53
3.13.1	<a href="#">Opérande RESI GLOB RELA / RESI GLOB MAXI</a>	53
3.13.2	<a href="#">Opérande ITER GLOB MAXI</a>	54
3.13.3	<a href="#">Opérande ITER GLOB ELAS</a>	54
3.13.4	<a href="#">Opérande ARRET</a>	54
3.13.5	<a href="#">Opérandes RESI INTE RELA / ITER INTE MAXI</a>	55
3.13.6	<a href="#">Opérande ITER INTE PAS</a>	55
3.13.7	<a href="#">Opérande RESO INTE</a>	55
3.14	<a href="#">Mot clé ARCHIVAGE</a>	55
3.14.1	<a href="#">Opérande LIST INST / INST / PAS ARCH</a>	56
3.14.2	<a href="#">Opérande PRECISION</a>	56
3.14.3	<a href="#">Opérande ARCH ETAT INIT / NUME INIT / DETR NUME SUIV</a>	56
3.14.4	<a href="#">Opérande CHAM EXCLU</a>	57
3.15	<a href="#">Opérande OBSERVATION</a>	57
3.16	<a href="#">Opérande SOLV NON LOCAL</a>	58
3.17	<a href="#">Opérande LAGR NON LOCAL</a>	58
3.18	<a href="#">Opérande INFO</a>	58
3.19	<a href="#">Opérande TITRE</a>	59

## 2 Syntaxe

```
statnl [evol_noli] = STAT_NON_LINE
```

```
(
  ◇ reuse = statnl,
  ◆ MODELE = mo, [modele]
  ◆ CHAM_MATER = chmat, [cham_mater]
  ◇ CARA_ELEM = carac, [cara_elem]

  ◆ EXCIT =_F (
    ◆ CHARGE = chi, [char_meca]
    ◇ FONC_MULT = fi, [fonction]
    ◇ TYPE_CHARGE = / 'FIXE_CSTE' [DEFAULT]
                      / 'FIXE_PILO'
                      / 'SUIV'
                      / 'DIDI'
    ),

  ◆ | 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'
    ),

  | 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]
    ),

  ◇ VARI_COMM =_F (
    ◆ / IRRA =irra [evol_varc]
    ),

  ◇ ETAT_INIT =_F (
    ◆ / | SIGM = sig, [cham_elem_SIEF_R]
        | VARI = vain, [carte_SIEF_R]
        | DEPL = depl, [cham_elem_VARI_R]
        | VARI_NON_LOCAL = vanolo, [cham_no_DEPL_R]
        [cham_no_VANL_R]
```

Titre : Opérateur STAT\_NON\_LINE  
Auteur(s) : V. CANO

Date : 18/03/03  
Clé : U4.51.03-F Page : 5/60

```

/ EVOL_NOLI = evol, [evol_noli]
  ◇ / NUME_ORDRE = nuini, [I]
  / INST = instini, [R]
  ◇ PRECISION = / 1.0E-3, [DEFAULT]
  / prec, [R]
  ◇ CRITERE = / 'RELATIF', [DEFAULT]
  / 'ABSOLU',
  ◇ NUME_DIDI = nudidi, [I]
  ◇ INST_ETAT_INIT = istetaini [R]
),
◇ INCREMENT =_F(
  ◆ LIST_INST = litps, [listr8]
  ◇ EVOLUTION = / 'CHRONOLOGIQUE', [DEFAULT]
  / 'RETROGRADE',
  / 'SANS',
  ◇ / NUME_INST_INIT = nuini, [I]
  / INST_INIT = instini, [R]
  ◇ / NUME_INST_FIN = nufin, [I]
  / INST_FIN = instfin, [R]
  ◇ PRECISION = / 1.0E-3, [DEFAULT]
  / prec, [R]
  ◇ SUBD_PAS = / 1, [DEFAULT]
  / subpas, [I]
  ◇ SUBD_PAS_MINI = submini, [R]
  ◇ COEF_SUBD_PAS_1 = / 1., [DEFAULT]
  / coefsub, [R]
  ◇ OPTI_LIST_INST = / 'INCR_MAXI', [DEFAULT]
  ◇ NOM_CHAM = nomch, [Kn]
  ◇ NOM_CMP = nomcmp, [Kn]
  ◇ VALEUR = val [R]
),
◇ NEWTON =_F(
  ◇ PREDICTION = [DEFAULT]
  / 'TANGENTE',
  / 'ELASTIQUE',
  / 'EXTRAPOL',
  / 'DEPL_CALCULE',
  ◇ EVOL_NOLI = evol_noli, [evol_noli]
  ◇ MATRICE = / 'TANGENTE', [DEFAULT]
  / 'ELASTIQUE'
  ◇ REAC_INCR = / 1, [DEFAULT]
  / mf, [I]
  ◇ REAC_ITER = / 0, [DEFAULT]
  / it, [I]
  ◇ PAS_MINI_ELAS= / 0, [DEFAULT]
  / pasmini, [I]
),
◇ RECH_LINEAIRE =_F(
  ◇ RESI_LINE_RELA = / 1.E-1, [DEFAULT]
  / reslin, [R]
  ◇ ITER_LINE_MAXI = / 3, [DEFAULT]
  / itelin [I]
),
◇ PARM_THETA = / 1., [DEFAULT]
/ theta, [R]

```

Titre : *Opérateur STAT\_NON\_LINE*  
Auteur(s) : **V. CANO**

Date : 18/03/03  
Clé : U4.51.03-F Page : 6/60

```

◇ PILOTAGE =_F (
    ◆ TYPE = / 'DDL_IMPO',
              / 'LONG_ARC',
              ◇ /NOEUD = no, [noeud]
                /GROUP_NO = grno, [gr_noeud]
              ◇ NOM_CMP = nomcmp, [Kn]
                / 'ANA_LIM',
                / 'DEFORMATION',
                / 'PRED_ELAS',
              ◇ /TOUT = 'OUI', [DEFAULT]
                /GROUP_MA = lgrma, [l_gr_maille]
                /MAILLE = lma, [l_maille]
              ◇ COEF_MULT = / 1., [DEFAULT]
                / cmult, [R]
              ◇ ETA_PILO_MAX = etamax, [R]
              ◇ ETA_PILO_MIN = etamin [R]
            ),
◇ SOLVEUR =_F ( voir le document [U4.50.01] ),
◇ CONVERGENCE =_F (
    ◇ / RESI_GLOB_RELA = 1.E-6, [DEFAULT]
      / | RESI_GLOB_MAXI = resmax, [R]
        | RESI_GLOB_RELA = resrel, [R]

    ◇ ITER_GLOB_ELAS = / 25, [DEFAULT]
      / maxelas, [I]
    ◇ ITER_GLOB_MAXI = / 10, [DEFAULT]
      / maglob, [I]
    ◇ ARRET = / 'OUI', [DEFAULT]
      / 'NON',
    ◇ RESI_INTE_RELA = / 1.E-6, [DEFAULT]
      / resint, [R]
    ◇ ITER_INTE_MAXI = / 10, [DEFAULT]
      / iteint, [I]
    ◇ ITER_INTE_PAS = / 0, [DEFAULT]
      / itepas,
    ◇ RESO_INTE = / 'IMPLICITE' [DEFAULT]
      / 'RUNGE_KUTTA_2'
      / 'RUNGE_KUTTA_4'
    ),
◇ ARCHIVAGE =_F (
    ◇ / LIST_INST = list_r8, [listr8]
      / INST = l_r8, [R]
      / PAS_ARCH = npas, [I]
    ◇ PRECISION = / 1.E-3, [DEFAULT]
      / prec, [R]
    ◇ / ARCH_ETAT_INIT = 'OUI',
      / NUME_INIT = nuinit, [I]
    ◇ DETR_NUME_SUIV = 'OUI',
    ◇ CHAM_EXCLU = 'DEPL'
                  'SIEF_ELGA'
                  'VARI_ELGA'
                  'VARI_NON_LOCAL'
                  'LANL_ELGA'
    ),
◇ OBSERVATION =_F ( voir le document [U4.53.01]),

```

Titre :       Opérateur STAT\_NON\_LINE  
Auteur(s) :   V. CANO

Date :       18/03/03  
Clé :   U4.51.03-F   Page :   7/60

```

◇  LAGR_NON_LOCAL  =_F (
    ◇  ITER_PRIM_MAXI  =   /   10,                [DEFAULT]
                                / iterprimmax,      [I]
    ◆  RESI_PRIM_ABSO  = resiprimab,              [R]
    ◇  ITER_DUAL_MAXI  =   /   50,                [DEFAULT]
                                / iterdmax,          [I]
    ◆  RESI_DUAL_ABSO  = residabso,               [R]
    ◇  R               =   /  1000.              [DEFAULT]
                                / rho                [R]
    ),
◇  SOLV_NON_LOCAL  =_F ( voir le document [U4.50.01] ),
◇  INFO =           / 1,                        [DEFAULT]
                      / 2,
◇  TITRE = tx                                           [Kn]
);
```

## 3 Opérandes

### 3.1 Opérandes *MODELE* / *CHAM\_MATER* / *CARA\_ELEM*

- ◆ *MODELE* : *mo*  
Nom du modèle dont les éléments font l'objet du calcul mécanique.
- ◆ *CHAM\_MATER* : *chmat*  
Nom du champ de matériau affecté sur le maillage. Attention, toutes les mailles du modèle doivent être associées à un matériau (sinon erreur fatale avec message peu explicite).
- ◇ *CARA\_ELEM* : *carac*  
Nom des caractéristiques des éléments de coque, poutre, tuyau, barre, câble, et éléments discrets affectés sur le modèle *mo*, si nécessaire.

### 3.2 Mot clé *EXCIT*

- ◆ *EXCIT* :  
Ce mot clé facteur permet de décrire à chaque occurrence une charge (solicitations et conditions aux limites), et éventuellement un coefficient multiplicateur et/ou un type de charge.

#### 3.2.1 Opérandes *CHARGE* / *FONC\_MULT*

- ◆ *CHARGE* : *ch<sub>i</sub>*  
*ch<sub>i</sub>* est le chargement mécanique (comportant éventuellement l'évolution d'un champ de température) précisé à la *i*<sup>ème</sup> occurrence de *EXCIT*.

*Une seule charge peut comporter l'évolution d'un champ de température, qui aura précédemment été défini grâce au mot-clé *TEMP\_CALCULEE* de la commande *AFFE\_CHAR\_MECA*.*

#### Attention :

*Dans un calcul thermo-mécanique, si la température initiale est différente de la température de référence (donnée dans l'opérateur *AFFE\_MATERIAU*), le champ de déformation associé à l'instant initial peut être incompatible et donc conduire à un état de contraintes et de variables internes associé non nul. Si l'on utilise une relation de comportement incrémentale (mot clé facteur *COMP\_INCR*) et si on ne définit pas explicitement un état de contraintes et de variables internes initial (associé à un champ de température initiale différente de la température de référence), le champ de contraintes et de variables internes calculé au premier incrément ne tiendra compte que de la seule variation de température entre l'instant initial et le premier instant, et non des éventuelles contraintes de compatibilité associées à la température initiale. Pour prendre cet état initial en compte, il faut le donner explicitement, par exemple grâce aux mots clés *SIGM*, *DEPL*, *VARI* et *VARI\_NON\_LOCAL* dans *ETAT\_INIT*.*

***Pour éviter de telles situations qui peuvent conduire à des erreurs de calculs, il vaut mieux commencer un calcul en considérant qu'il faut partir d'un état vierge.***

#### Attention :

*Si on réalise un calcul en axisymétrique et que l'on impose des forces nodales, ces efforts doivent être divisés par 2\*Pi (on travaille sur un secteur de 1 radian) par rapport aux chargements réels. De même, si l'on souhaite calculer la résultante des efforts, le résultat est à multiplier par 2\*Pi pour avoir la résultante totale sur la structure complète.*

#### Attention :

*Les chargements issus de *AFFE\_CHAR\_CINE* ne sont pas utilisables avec *STAT\_NON\_LINE*.*



◇ FONC\_MULT :  $f_i$

$f_i$  est la fonction du temps multiplicatrice du chargement précisé à la  $i^{\text{ème}}$  occurrence de EXCIT.  
Le chargement et les conditions aux limites pour  $n$  occurrences du mot clé facteur EXCIT sont :

$$ch = \sum_{i=1}^n f_i ch_i$$

Pour les conditions de DIRICHLET, bien entendu, seule la valeur imposée est multipliée par  $f_i$ .  
Par défaut :  $f_i = 1$ .

*|Le champ de température n'est pas multiplié par  $f_i$ .*

### 3.2.2 Opérande TYPE\_CHARGE

◇ TYPE\_CHARGE :  $tchi$

Par défaut,  $tchi$  vaut 'FIXE\_CSTE' : cela correspond à un chargement appliqué sur la géométrie initiale et non piloté. Il peut cependant être une fonction, et en particulier dépendre du temps.

Si  $tchi$  vaut 'FIXE\_PILO', le chargement est toujours fixe (indépendant de la géométrie) mais sera piloté grâce au mot clé PILOTAGE [§3.11].

*|Les charges pilotables doivent être issues d'AFFE\_CHAR\_MECA ou d'AFFE\_CHAR\_MECA\_F et ne pas être affectées du mot clé FONC\_MULT. On ne peut pas piloter les chargements de pesanteur, la force centrifuge, les forces de Laplace, les chargements thermiques ou de déformations initiales ou anélastiques, et les conditions de liaison.*

Si  $tchi$  vaut 'SUIV', le chargement est dit "suiveur", c'est-à-dire qu'il dépend de la valeur des inconnues : par exemple, la pression, étant un chargement s'appliquant dans la direction normale à une structure, dépend de la géométrie actualisée de celle-ci, et donc des déplacements. Un chargement suiveur est réévalué à chaque itération de l'algorithme de résolution. Un chargement fixe n'est réévalué qu'à chaque nouvel instant, et seulement si  $ch_i$  dépend du temps (défini dans AFFE\_CHAR\_MECA\_F et paramétré par l'instant).

*|Actuellement les chargements qui peuvent être qualifiés de 'SUIV' sont le chargement de pesanteur pour l'élément de CABLE\_POULIE, la pression pour les modélisations 3D, 3D\_SI, D\_PLAN, D\_PLAN\_SI, AXIS, AXIS\_SI, C\_PLAN, C\_PLAN\_SI et pour toutes les modélisations THM (3D\_HHM, 3D\_HM, 3D\_JOINT\_CT, 3D\_THH, 3D\_THHM, 3D\_THM, AXIS\_HHM, AXIS\_HM, AXIS\_THH, AXIS\_THHM, AXIS\_THM, D\_PLAN\_HHM, D\_PLAN\_HM, D\_PLAN\_THH, D\_PLAN\_THHM, D\_PLAN\_THM) et la force centrifuge en grands déplacements (mot clé ROTATION dans AFFE\_CHAR\_MECA).*

Si  $tchi$  vaut 'DIDI' alors les conditions de DIRICHLET (déplacements imposés, conditions linéaires) s'appliqueront sur l'incrément de déplacement à partir de l'instant donné sous ETAT\_INIT/NUME\_DIDI (par défaut l'instant de reprise du calcul) et non sur le déplacement total. Par exemple pour un déplacement imposé (mot clé DDL\_IMPO de AFFE\_CHAR\_MECA) la condition sera de la forme :  $u - u_0 = d$  où  $u_0$  est le déplacement défini par NUME\_DIDI et non :  $u = d$ .

### 3.3 Mot clé COMP\_INCR

◆ | COMP\_INCR :

Ce mot clé facteur permet de définir les relations de comportement reliant les incréments de déformations et de contraintes (comportement incrémental). 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. On peut donc également affecter une loi non linéaire aux éléments de structure DKT, COQUE\_3D et TUYAU.*

#### 3.3.1 Opérande RELATION

◆ RELATION :

% Modèles classiques

```
/ 'ELAS'
/ 'VMIS_ISOT_TRAC'
/ 'VMIS_ISOT_LINE'
/ 'VMIS_CINE_LINE'
/ 'VMIS_ECMI_TRAC'
/ 'VMIS_ECMI_LINE'
/ 'LEMAITRE'
/ 'CHABOCHE'
/ 'VISC_CIN1_CHAB'
/ 'VISC_CIN2_CHAB'
/ 'NORTON_HOFF'
/ 'BARENBLATT' [DEFAULT]
```

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

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

% Modèles traités en formulation non local

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

% Modèles décrivant la déformation progressive

```
/ 'VISC_TAHERI'
/ 'POLY_CFC'
```

% Comportements spécifiques aux crayons combustibles

```
/ 'ZIRC_CYRA2'
/ 'ZIRC_EPRI'
/ 'ASSE_COMBU'
```

% Comportements pour des éléments de poutres et discrets

```
/ 'DIS_CONTACT'
/ 'DIS_CHOC'
/ 'VMIS_POU_LINE'
/ 'VMIS_POU_FLEJOU'
/ 'ARME'
/ 'ASSE_CORN'
/ 'DIS_GOUJ2E_PLAS'
/ 'DIS_GOUJ2E_ELAS'
/ 'VMIS_ASYM_LINE'
```

## % 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'  
/ 'GRILLE_ISOT_LINE'  
/ 'GRILLE_CINE_LINE'  
/ 'GRILLE_PINTO_MEN'  
/ 'PINTO_MENEGOTTO'  
/ 'GRANGER_FP'  
/ 'GRANGER_FP_V'  
/ 'BAZANT_FD'  
/ 'KIT_DDI'
```

## % Comportements pour les milieux poreux

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

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

*Dans le cas où on fournit une courbe de traction, le module d'YOUNG utilisé pour la relation de comportement est celui calculé à partir du premier point de la courbe de traction, celui utilisé pour le calcul de la matrice élastique (voir mot clé `NEWTON` [§3.8]) est celui donné dans `ELAS( _FO)`.*

**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 = la modélisation GRILLE
- 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, 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\_HMD, AXIS\_THHD, AXIS\_THHMD, AXIS\_THMD, AXIS\_THVD, D\_PLAN\_HHM, D\_PLAN\_HM, D\_PLAN\_THH, D\_PLAN\_THHM, D\_PLAN\_THM, D\_PLAN\_HHMD, D\_PLAN\_HMD, D\_PLAN\_THHD, D\_PLAN\_THHMD, 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

**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 [§3.8]). 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).*

### 3.3.1.1 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 et BARRE.

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  $(\sigma, \varepsilon)$  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.

Modélisations supportées : 3D, D\_PLAN, AXIS, C\_PLAN, COQUE, TUYAU, COQUE1D, BARRE 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 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.

Signification pour la modélisation BARRE : V1 : déformation plastique, V2 : déformation plastique cumulée.

Modélisation non locale supportée (voir [§ 3.3.1.3]) : GRAD\_VARI

Titre : **Opérateur STAT\_NON\_LINE**  
Auteur(s) : **V. CANO**

Date : **18/03/03**  
Clé : **U4.51.03-F** Page : **14/60**

/ '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 et BARRE.

Nombre de variables internes (hormis la modélisation BARRE) : 7

Signification : V1 à V6 : 6 composantes du tenseur d'écrouissage cinématique X, V7 : indicateur de plasticité (0 pour élastique, 1 pour plastique).

Nombre de variables internes pour la modélisation BARRE : 2

Signification : V1 : déformation plastique, V2 : écrouissage cinématique X.

/ '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 ( $\sigma$ ,  $\epsilon$ ) 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, BARRE et COQUE1D.

Nombre de variables internes : 8

Signification : V1 : déformation plastique cumulée, V2 : indicateur de plasticité (0 pour élastique, 1 pour plastique), V3 à V8 : 6 composantes du tenseur d'écrouissage cinématique X.

/ 'VMIS\_ECMI\_LINE'

Relation de comportement d'élasto-plasticité de VON MISES à écrouissage 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'écrouissage cinématique), ECRO\_LINE(\_FO) (pour l'écrouissage isotrope) et ELAS(\_FO).

Modélisations supportées : 3D, D\_PLAN, AXIS, C\_PLAN, INCO, COQUE, TUYAU, BARRE et COQUE1D.

Nombre de variables internes : 8

Signification : V1 : déformation plastique cumulée, V2 : indicateur de plasticité (0 pour élastique, 1 pour plastique), V3 à V8 : 6 composantes du tenseur d'écrouissage cinématique 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 écrouissage 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, BARRE et COQUE1D.

Nombre de variables internes : 2

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

Titre : **Opérateur STAT\_NON\_LINE**  
Auteur(s) : **V. CANO**

Date : **18/03/03**  
Clé : **U4.51.03-F** Page : **15/60**

/ '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, BARRE et COQUE1D.

Nombre de variables internes : 14

Signification : V1 à V6 : 6 composantes du 1<sup>er</sup> tenseur d'écouissage cinématique  $X_1$ , V7 à V12 : 6 composantes du 2<sup>ème</sup> tenseur d'écouissage cinématique  $X_2$ , 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 1 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.

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 : 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  $X$ .

/ 'VISC\_CIN2\_CHAB'

Relation de comportement de Chaboche (rend compte du comportement cyclique du matériau) en élasto-(visco)-plasticité avec 2 tenseurs 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 `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, BARRE et COQUE1D.

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<sup>er</sup> tenseur de la variable cinématique  $\alpha_1$ , V9 à V14 : 6 composantes du 2<sup>ème</sup> tenseur de la variable cinématique  $\alpha_2$ .

Titre : *Opérateur STAT\_NON\_LINE*  
Auteur(s) : **V. CANO**

Date : 18/03/03  
Clé : U4.51.03-F Page : 16/60

/ '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.

/ 'BARENBLATT'

Relation de comportement de 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 (approche appelée Cohésive Zone Models dans la littérature). 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 : FISSURE.

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).

### 3.3.1.2 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, BARRE 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.



Titre :           Opérateur STAT\_NON\_LINE  
Auteur(s) :     V. CANO

Date :           18/03/03  
Clé :           U4.51.03-F   Page :   17/60

/   '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 ECRO\_LINE (DSDE négative) et ELAS.

Modélisations supportées : 3D, D\_PLAN, AXIS, C\_PLAN (par DEBORST, mot clé ALGO\_C\_PLAN [§3.3.5]), INCO, COQUE, TUYAU, BARRE et COQUELD.

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

## Remarque :

*Les trois modèles suivants 'ROUSSELIER' (modèle élastoplastique), 'ROUSS\_PR' (modèle élastoplastique) et 'ROUSS\_VISC' (modèle élastoviscoplastique) sont trois versions différentes du modèle de Rousselier. Ce modèle est une relation de comportement élasto(visco)plastique qui permet de rendre compte de la croissance des cavités et de décrire la rupture ductile dans les aciers. En dehors du coté plastique/visqueux, la différence essentielle réside dans la manière dont sont traitées les grandes déformations. Pour le modèle 'ROUSSELIER' il s'agit d'une formulation type Simo\_Miehe (DEFORMATION : 'SIMO\_MIEHE' 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).

Titre : *Opérateur STAT\_NON\_LINE*  
Auteur(s) : **V. CANO**

Date : 18/03/03  
Clé : U4.51.03-F Page : 18/60

/ '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], (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 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, BARRE 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 ROUSS\_VISC, 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  $\theta$ -méthode est disponible et on conseille d'utiliser une intégration semi-implicite c'est-à-dire :

```
PARM_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 : 3

Signification : V1 : déformation plastique cumulée, V2 : valeur de la porosité, V3 : indicateur de plasticité (0 si élastique, 1 si plastique).

### 3.3.1.3 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. [R5.04.15] 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.*

Titre :       Opérateur STAT\_NON\_LINE  
Auteur(s) :   V. CANO

Date :       18/03/03  
Clé :       U4.51.03-F   Page :   19/60

*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 locales qui sont écrites en non locale sont les suivantes :

/ 'ENDO\_FRAGILE'

Cf. [R5.04.11] 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. [R5.04.12] 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. [R5.04.12] 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).

Titre : *Opérateur STAT\_NON\_LINE*  
Auteur(s) : **V. CANO**

Date : 18/03/03  
Clé : U4.51.03-F Page : 20/60

/ 'ENDO\_ISOT\_BETON'

Cf. [R5.04.12] 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)).

/ '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.

### 3.3.1.4 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, BARRE 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]

### 3.3.1.5 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.

/ '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.

### 3.3.1.6 Comportements spécifiques aux éléments de poutre et discrets

/ 'ASSE\_COMBU'

Relation de comportement de fluage et de grandissement sous irradiation pour les assemblages combustibles.

Le champ de fluence est récupéré par l'opérande `IRRA` du mot-clé `VARI_COMM` (voir [§3.5]). Les caractéristiques du grandissement sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous le mot-clé `GRAN_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`. Les caractéristiques de fluage (relation de comportement de type `LEMAITRE` modifiée pour tenir compte du flux (calculé à partir de la fluence) et du terme  $e^{-Q/R(T+T_0)}$ ) sont données dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` sous les mots-clés `LEMAITRE` et `FLU_IRRA`.

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 :

```
PARAM_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).

Titre : *Opérateur STAT\_NON\_LINE*  
Auteur(s) : **V. CANO**

Date : 18/03/03  
Clé : U4.51.03-F Page : 22/60

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 : 5

Signification (hormis modélisation POU) : V1 : déformation plastique cumulée, V2 à V5 : vide donc vaut toujours 0.

Signification pour la modélisation POU : V1 : déformation plastique cumulée, V2 : valeur de l'irradiation au point de Gauss considéré, V3 à V5 : vide donc vaut toujours 0.

/ '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).

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 cumulée 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.

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 : vitesses (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 poutres 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 poutres 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 ( $u_y - u_{le}$ ) où  $u_y$  est le déplacement dans la direction locale y de la maille `SEG2` et  $u_{le}$  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).

Titre : *Opérateur STAT\_NON\_LINE*  
Auteur(s) : **V. CANO**

Date : 18/03/03  
Clé : U4.51.03-F Page : 24/60

/ '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.

### 3.3.1.7 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.*

*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



Titre : Opérateur STAT\_NON\_LINE  
Auteur(s) : V. CANO

Date : 18/03/03  
Clé : U4.51.03-F Page : 25/60

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 $\alpha$ pour les 5 phases	V1 à V18 : variables liées à l'écrouissage cinématique $\alpha$ 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 et BARRE.

/ '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 et BARRE.

/ '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 et BARRE.

Titre : *Opérateur STAT\_NON\_LINE*  
Auteur(s) : **V. CANO**

Date : 18/03/03  
Clé : U4.51.03-F Page : 26/60

/ '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 et BARRE.

/ '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 et BARRE.

/ '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 et BARRE.

/ '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 et BARRE.

/ '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 et BARRE.

/ '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 et BARRE.

Titre :       Opérateur STAT\_NON\_LINE  
Auteur(s) :   V. CANO

Date :       18/03/03  
Clé :       U4.51.03-F   Page :   27/60

/   '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 et BARRE.

/   '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 et BARRE.

/   '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 et BARRE.

/   '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 et BARRE.

/   '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 et BARRE.

/   '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 et BARRE.

Titre : *Opérateur STAT\_NON\_LINE*  
Auteur(s) : **V. CANO**

Date : 18/03/03  
Clé : U4.51.03-F Page : 28/60

/ '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 et BARRE.

/ '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 et BARRE.

/ '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 et BARRE.

/ '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 et BARRE.

/ '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 et BARRE.

Titre : **Opérateur STAT\_NON\_LINE**  
Auteur(s) : **V. CANO**

Date : **18/03/03**  
Clé : **U4.51.03-F** Page : **29/60**

/ '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 et BARRE.

/ '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 et BARRE.

/ '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 et BARRE.

/ '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 et BARRE.

### 3.3.1.8 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, BARRE 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.

Titre : **Opérateur STAT\_NON\_LINE**  
Auteur(s) : **V. CANO**

Date : **18/03/03**  
Clé : **U4.51.03-F** Page : **30/60**

/ '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 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 : `POU_D_EM`.

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 dans le sens longitudinal, V2 : déformation plastique cumulée dans le sens longitudinal, V3 : déformation plastique dans le sens transversal, V4 : déformation plastique cumulée dans le sens transversal.

/ '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 : déformation plastique dans le sens longitudinal, V2 : écrouissage cinématique dans le sens longitudinal, V3 : déformation plastique dans le sens transversal, V4 : écrouissage cinématique dans le sens transversal.

Titre : **Opérateur STAT\_NON\_LINE**  
Auteur(s) : **V. CANO**

Date : **18/03/03**  
Clé : **U4.51.03-F** Page : **31/60**

/ '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]

/ '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`, `BARRE` 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`, `BARRE` et `COQUE1D`.

Nombre de variables internes : 55

Signification : Cf. [R7.01.01]

/ '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 : ( 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.

### 3.3.1.9 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], [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` 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      : ( RELATION : 'KIT_THM' ,  
RELATION_KIT   : ( 'THER_POLY' , 'LIQU_SATU' , 'CJS' , 'HYDR_UTIL' ) )
```

Dans cet exemple, on traite de manière couplée un problème thermo-hydro-mécanique pour un milieu poreux saturé, avec `THER_POLY` comme comportement thermique, `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 : THM

/ '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`.

Modélisation supportée : THM

/ '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`.

Modélisation supportée : THM

Titre : *Opérateur STAT\_NON\_LINE*  
Auteur(s) : **V. CANO**

Date : 18/03/03  
Clé : U4.51.03-F Page : 34/60

/ '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`.

Modélisation supportée : THV

/ '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`.

Modélisation supportée : THM

/ '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 redécoupage local 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 : 8

Signification : `V1` : déformation plastique cumulée de cisaillement, `V2` à `V7` : déformation plastique, `V8` : indicateur.

/ '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

/ '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`. Pour faciliter l'intégration de ce modèle, il est conseillé d'utiliser la recherche linéaire.

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.

Modélisations supportées : 3D, D\_PLAN, AXIS et THM

Nombre de variables internes : 2

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

### 3.3.2 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`).

#### 3.3.2.1 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).

#### 3.3.2.2 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).

**3.3.2.3 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'
```

**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,  $\rho$  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 milieux 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 et THM\_GAZ.

```
/ '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_VAPE'
```

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

```
/ '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**

```
/ 'THER_HOMO'
```

Dans l'équation de la chaleur la conductivité thermique est prise constante (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\_DIFFU.

/ 'THER\_POLY'

Dans l'équation de la chaleur, la conductivité thermique est la somme pondérée des conductivités de chacun des constituants (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\_DIFFU.

## Remarque :

Pour les deux modélisations, la capacité calorifique est toujours la somme pondérée des capacités de chaque constituant.

## 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')
('ELAS'	'LIQU_SATU'	'HYDR_UTIL')
('CJS'	'LIQU_SATU'	'HYDR_UTIL')
('LAIGLE'	'LIQU_SATU'	'HYDR_UTIL')

('CAM_CLAY'	'LIQU_SATU'	'HYDR_UTIL')
('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')

Pour relation KIT\_THM :

('ELAS'	'GAZ'	'THER_HOMO'	'HYDR_UTIL')
('CJS'	'GAZ'	'THER_HOMO'	'HYDR_UTIL')
('LAIGLE'	'GAZ'	'THER_HOMO'	'HYDR_UTIL')
('CAM_CLAY'	'GAZ'	'THER_HOMO'	'HYDR_UTIL')
('ELAS'	'LIQU_SATU'	'THER_HOMO'	'HYDR_UTIL')
('CJS'	'LIQU_SATU'	'THER_HOMO'	'HYDR_UTIL')
('LAIGLE'	'LIQU_SATU'	'THER_HOMO'	'HYDR_UTIL')
('CAM_CLAY'	'LIQU_SATU'	'THER_HOMO'	'HYDR_UTIL')
('ELAS'	'LIQU_GAZ_ATM'	'THER_HOMO'	'HYDR_UTIL')
('CJS'	'LIQU_GAZ_ATM'	'THER_HOMO'	'HYDR_UTIL')
('LAIGLE'	'LIQU_GAZ_ATM'	'THER_HOMO'	'HYDR_UTIL')
('CAM_CLAY'	'LIQU_GAZ_ATM'	'THER_HOMO'	'HYDR_UTIL')
('ELAS'	'GAZ'	'THER_POLY'	'HYDR_UTIL')
('CJS'	'GAZ'	'THER_POLY'	'HYDR_UTIL')
('LAIGLE'	'GAZ'	'THER_POLY'	'HYDR_UTIL')
('CAM_CLAY'	'GAZ'	'THER_POLY'	'HYDR_UTIL')
('ELAS'	'LIQU_SATU'	'THER_POLY'	'HYDR_UTIL')
('CJS'	'LIQU_SATU'	'THER_POLY'	'HYDR_UTIL')
('LAIGLE'	'LIQU_SATU'	'THER_POLY'	'HYDR_UTIL')

Titre : *Opérateur STAT\_NON\_LINE*  
Auteur(s) : **V. CANO**

Date : 18/03/03  
Clé : U4.51.03-F Page : 38/60

( 'CAM\_CLAY' 'LIQU\_SATU' 'THER\_POLY' 'HYDR\_UTIL' )

Pour relation KIT\_HMM :

( 'ELAS' 'LIQU\_GAZ' 'HYDR\_UTIL' )  
( 'CJS' 'LIQU\_GAZ' 'HYDR\_UTIL' )  
( 'LAIGLE' 'LIQU\_GAZ' 'HYDR\_UTIL' )  
( 'CAM\_CLAY' 'LIQU\_GAZ' 'HYDR\_UTIL' )  
( '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' )

Pour relation KIT\_THH :

( 'LIQU\_GAZ' 'THER\_HOMO' 'HYDR\_UTIL' )  
( 'LIQU\_GAZ' 'THER\_POLY' 'HYDR\_UTIL' )  
( 'LIQU\_VAPE\_GAZ' 'THER\_HOMO' 'HYDR\_UTIL' )  
( 'LIQU\_VAPE\_GAZ' 'THER\_POLY' 'HYDR\_UTIL' )

Pour relation KIT\_THV :

( 'LIQU\_VAPE' 'THER\_HOMO' 'HYDR\_UTIL' )  
( 'LIQU\_VAPE' 'THER\_POLY' 'HYDR\_UTIL' )

Pour relation KIT\_THHM :

( 'ELAS' 'LIQU\_GAZ' 'THER\_HOMO' 'HYDR\_UTIL' )  
( 'ELAS' 'LIQU\_GAZ' 'THER\_POLY' 'HYDR\_UTIL' )  
( 'CJS' 'LIQU\_GAZ' 'THER\_HOMO' 'HYDR\_UTIL' )  
( 'CJS' 'LIQU\_GAZ' 'THER\_POLY' 'HYDR\_UTIL' )  
( 'LAIGLE' 'LIQU\_GAZ' 'THER\_HOMO' 'HYDR\_UTIL' )  
( 'LAIGLE' 'LIQU\_GAZ' 'THER\_POLY' 'HYDR\_UTIL' )  
( 'CAM\_CLAY' 'LIQU\_GAZ' 'THER\_HOMO' 'HYDR\_UTIL' )  
( 'CAM\_CLAY' 'LIQU\_GAZ' 'THER\_POLY' 'HYDR\_UTIL' )  
( 'ELAS' 'LIQU\_VAPE\_GAZ' 'THER\_HOMO' 'HYDR\_UTIL' )  
( 'ELAS' 'LIQU\_VAPE\_GAZ' 'THER\_POLY' 'HYDR\_UTIL' )  
( 'CJS' 'LIQU\_VAPE\_GAZ' 'THER\_HOMO' 'HYDR\_UTIL' )  
( 'CJS' 'LIQU\_VAPE\_GAZ' 'THER\_POLY' 'HYDR\_UTIL' )  
( 'LAIGLE' 'LIQU\_VAPE\_GAZ' 'THER\_HOMO' 'HYDR\_UTIL' )  
( 'LAIGLE' 'LIQU\_VAPE\_GAZ' 'THER\_POLY' 'HYDR\_UTIL' )  
( 'CAM\_CLAY' 'LIQU\_VAPE\_GAZ' 'THER\_HOMO' 'HYDR\_UTIL' )  
( 'CAM\_CLAY' 'LIQU\_VAPE\_GAZ' 'THER\_POLY' 'HYDR\_UTIL' )

### 3.3.3 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  $X$ ,  $u$ ,  $\Delta u$  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 et AXIS (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].

/ 'GREEN'

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

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

/ 'GREEN\_GR'

Permet de traiter les grandes rotations et les petites déformations pour toutes les lois de comportement sous COMP\_INCR munies des modélisations COQUE\_3D.  
Les déformations utilisées dans la relation de comportement sont les déformations de GREEN-LAGRANGE :

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

**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).*

### 3.3.4 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.

### 3.3.5 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, mettre toujours PHENOMENE : 'C\_PLAN'.

**Attention :**

*La méthode DEBORST n'est pas possible avec l'option de déformation SIMO\_MIEHE.*

## 3.4 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



### 3.4.1 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

### 3.4.2 Opérande DEFORMATION sous COMP\_ELAS

◇ DEFORMATION :

/ 'PETIT' [DEFAULT]

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

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

/ 'GREEN'

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

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

/ '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).

### 3.4.3 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.

## 3.5 Mot clé VARI\_COMM

◇ VARI\_COMM :

Variables de commandes qui pilotent les lois de comportement (au même titre que la température).

### 3.5.1 Opérande IRRA

◆ / IRRA : irr

champs d'irradiation.

### 3.6 Mot clé ETAT\_INIT

◇ ETAT\_INIT :

Etat initial de référence choisi. Par défaut, tous les champs sont identiquement nuls. Cet état initial peut être défini soit en précisant chaque champ de l'état initial, soit en extraction depuis un concept de type `evol_noli` préexistant.

La donnée d'un état initial n'a de sens (et n'est donc prise en compte) que pour la partie du domaine traitée en comportement incrémental (`COMP_INCR`) ; si le comportement est élastique (`COMP_ELAS`) cela n'a aucune incidence.

*Si l'on veut prendre en compte un état initial en élasticité, c'est le mot clé `ELAS` situé sous `COMP_INCR` qu'il faut utiliser.*

#### 3.6.1 Opérandes SIGM / VARI / DEPL / VARI\_NON\_LOCAL

◆ /	SIGM	:	sig
	VARI	:	vain
	DEPL	:	depl
	VARI_NON_LOCAL	:	vanolo

Respectivement, champs de contraintes aux points de Gauss, de variables internes aux points de Gauss, de déplacements aux nœuds et de variables non locales aux nœuds (pour des modèles non locaux) pris à l'état initial. Si l'un de ces champs n'est pas précisé, il est pris nul par défaut. Ils peuvent par exemple être issus de la commande `RECU_CHAMP`, ou bien avoir été lus dans un fichier au format I-DEAS par la commande `LIRE_RESU` (attention le format MED ne lit que des champs aux nœuds).

#### 3.6.2 Opérandes EVOL\_NOLI

/ EVOL\_NOLI : evol

Nom du concept de type `evol_noli` d'où sera extrait l'état initial.

#### 3.6.3 Opérande NUME\_ORDRE / INST / NUME\_DIDI

◇ / NUME\_ORDRE : nuini  
/ INST : instini

Extraction de l'état mécanique initial dans `evol` à partir du numéro d'archivage `NUME_ORDRE` ou de l'instant d'archivage `INST` pour effectuer la poursuite du calcul.

Si `NUME_ORDRE` ou `INST` ne sont pas remplis, on prend le dernier numéro archivé existant dans `evol`.

◇ NUME\_DIDI : nudidi

Dans le cas de chargements de type DIRICHLET différentiel ('DIDI'), on donne sous `NUME_DIDI` le numéro d'archivage de l'état mécanique (déplacement) qui sert de référence pour l'application de ces conditions aux limites (Cf. [§3.2.2]). Par défaut on prend l'état mécanique défini sous `NUME_ORDRE` ou `INST`.

#### 3.6.4 Opérande INST\_ETAT\_INIT

◇ INST\_ETAT\_INIT : istetaini

On peut associer une valeur d'instant `istetaini` à cet état initial.

Par défaut :

- lorsque l'état initial est défini par la donnée des champs, il n'y a pas d'instant associé.
- lorsque l'état est donné par un concept `evol_noli`, il s'agit de l'instant dans le précédent calcul (`istetaini = instini`).

**Attention danger :**

*Dans le cas d'un concept réentrant, INST\_ETAT\_INIT permet d'avoir des instants identiques pour des incréments différents (exemple C avec U2=&U1). Ce cas de figure pose problème, par exemple, dans IMPR\_COURBE lorsque qu'on veut tracer deux fonctions.*

**A - Exemple simple (par défaut)**

```
LIST1 = DEFI_LIST_REEL( DEBUT = 0.,  
                        INTERVALLE = _F( JUSQU'A = 4., NOMBRE = 4 ) ),  
U = STAT_NON_LINE ( INCREMENT = _F( LIST_INST = LIST1 ) ),  
  
LIST2 = DEFI_LIST_REEL( DEBUT = 4.,  
                        INTERVALLE = _F( JUSQU'A = 10., NOMBRE = 6 ) ),  
U = STAT_NON_LINE( reuse=U,  
                  INCREMENT = _F( LIST_INST = LIST2 ),  
                  ETAT_INIT = _F( EVOL_NOLI = U ) ),
```

1<sup>er</sup> STAT\_NON\_LINE : effectue le calcul pour les instants 1, 2, 3 et 4s.

2<sup>nd</sup> STAT\_NON\_LINE : effectue le calcul pour les instants 5, 6, 7, 8, 9 et 10s, l'état initial correspondant au temps 4s.

**B - Exemple pour montrer l'intérêt de INST\_ETAT\_INIT (deux listes d'instantes différentes)**

```
LIST1 = DEFI_LIST_REEL( DEBUT = 0.,  
                        INTERVALLE = _F( JUSQU'A = 10., NOMBRE = 10 ) ),  
U = STAT_NON_LINE ( INCREMENT = _F( LIST_INST = LIST1 ) ),  
  
LIST2 = DEFI_LIST_REEL( DEBUT = 20.,  
                        INTERVALLE = _F( JUSQU'A = 30., NOMBRE = 10 ) ),  
U = STAT_NON_LINE( reuse=U,  
                  INCREMENT = _F( LIST_INST = LIST2 ),  
                  ETAT_INIT = _F( EVOL_NOLI = U,  
                                  INST_ETAT_INIT = 20. ) ),
```

1<sup>er</sup> STAT\_NON\_LINE : effectue le calcul des instants 1 à 10s.

2<sup>nd</sup> STAT\_NON\_LINE : effectue le calcul des instants 21 à 30s, l'état initial correspondant à l'instant t=10s du 1<sup>er</sup> STAT\_NON\_LINE (par défaut INST=10.). Cet état initial correspond pour ce 2<sup>nd</sup> STAT\_NON\_LINE à l'instant t=20s. (INST\_ETAT\_INIT=20.).

**C - Exemple pour montrer l'intérêt de INST\_ETAT\_INIT (pratique quand on fait du cyclique)**

```
LIST1 = DEFI_LIST_REEL( DEBUT = 0.,  
                        INTERVALLE = _F( JUSQU'A = 10., NOMBRE = 10 ) ),  
U1 = STAT_NON_LINE( INCREMENT = _F( LIST_INST = LIST1 ) ),  
  
U2 = STAT_NON_LINE( INCREMENT = _F( LIST_INST = LIST1 ),  
                  ETAT_INIT = _F( EVOL_NOLI = U1,  
                                  INST_ETAT_INIT = 0. ) ),
```

1<sup>er</sup> STAT\_NON\_LINE : effectue le calcul des instants 1 à 10s.

2<sup>nd</sup> STAT\_NON\_LINE : effectue le calcul des instants 1 à 10s, l'état initial correspondant à l'instant t=10s du 1<sup>er</sup> STAT\_NON\_LINE (par défaut INST=10.). Cet état initial correspond pour ce 2<sup>nd</sup> STAT\_NON\_LINE à l'instant t=0s. (INST\_ETAT\_INIT : 0.).

**3.6.5 Opérande PRECISION / CRITERE**

Cf. [U4.71.00]

## 3.7 Mot clé INCREMENT

### ◆ INCREMENT :

Définit les intervalles de temps pris dans la méthode incrémentale.

*Les instants ainsi définis n'ont de sens physique que pour des relations de comportement où le temps intervient explicitement (visco-élastiques ou visco-plastiques par exemple). Dans les autres cas, ils permettent seulement d'indicer les incréments de charge et de paramétrer l'évolution d'un éventuel champ de température.*

### 3.7.1 Opérandes LIST\_INST / EVOLUTION

#### ◆ LIST\_INST :   litps

Les instants de calcul sont ceux définis dans le concept `litps` par l'opérateur `DEFI_LIST_REEL` [U4.34.01].

#### ◇ EVOLUTION :   /   'CHRONOLOGIQUE' [DEFAULT]                   /   'RETROGRADE'                   /   'SANS'

Le mot clé 'CHRONOLOGIQUE' permet de vérifier si la liste d'instants donnée par l'utilisateur est strictement croissante (si non message d'erreur),

Le mot clé 'RETROGRADE' permet d'inverser la liste d'instants donnée par l'utilisateur et de vérifier qu'après cette opération, elle est bien strictement décroissante.

Il n'y a pas de vérification lorsqu'on précise une évolution 'SANS'.

### 3.7.2 Opérandes NUME\_INST\_INIT / INST\_INIT / NUME\_INST\_FIN / INST\_FIN

#### ◇ /   NUME\_INST\_INIT :   nuini      /   INST\_INIT       :   instini

L'instant initial du calcul (qui donc n'est pas (re)calculé) est désigné soit par sa valeur (`INST_INIT`), soit par son numéro d'ordre dans la liste d'instants `litps` (`NUME_INST_INIT`). Pour pouvoir accéder par valeur, il est nécessaire que la liste soit ordonnée (`EVOLUTION` : 'CHRONOLOGIQUE' ou 'RETROGRADE').

En l'absence des mots clés `INST_INIT` ou `NUME_INST_INIT`, le défaut est calculé de la manière suivante :

- si un état initial est précisé (opérande `ETAT_INIT`) et s'il définit un instant correspondant (par `EVOL_NOLI` ou `INST_ETAT_INIT`) alors l'instant initial est celui défini par l'état initial,
- s'il n'y a pas d'état initial (opérande `ETAT_INIT`) ou qu'il ne définit pas d'instant correspondant (les champs sont donnés dans `ETAT_INIT` sans préciser `INST_ETAT_INIT`), alors on prend le premier instant de la liste d'instants `litps` (`NUME_INST_INIT` : 0), ou le dernier lorsque l'évolution est rétrograde.

#### ◇ /   NUME\_INST\_FIN       :   nufin      /   INST\_FIN         :   instfin

L'instant final (dernier pas calculé) est désigné de la même manière que l'instant initial (soit `NUME_INST_FIN`, soit `INST_FIN`), sauf qu'il n'est pas possible de faire référence à l'instant de l'état initial.

Attention : avec une évolution `RETROGRADE`, `INST_INIT > INST_FIN`.

**A - Exemple simple (par défaut)**

```
LIST = DEFI_LIST_REEL( DEBUT =0.,  
                       INTERVALLE =_F(JUSQU'A = 10., NOMBRE =10)),
```

```
U = STAT_NON_LINE (INCREMENT =_F ( LIST_INST =LIST,  
                                   INST_FIN =4.)) ,
```

```
U = STAT_NON_LINE( reuse=U,  
                  INCREMENT =_F (LIST_INST =LIST),  
                  ETAT_INIT =_F (EVOL_NOLI :U)) ,
```

1<sup>er</sup> STAT\_NON\_LINE : effectue le calcul pour les instants 1, 2, 3 et 4s.

2<sup>nd</sup> STAT\_NON\_LINE : effectue le calcul pour les instants 5, 6, 7, 8, 9 et 10s, l'état initial correspondant au temps 4s. (par défaut INST\_INIT=INST\_ETAT\_INIT=INST=4.).

**B - Exemple pour montrer l'intérêt de INST\_INIT**

```
LIST = DEFI_LIST_REEL( DEBUT =0.,  
                       INTERVALLE =_F (JUSQU'A = 10., NOMBRE =10)),
```

```
U = STAT_NON_LINE(INCREMENT =_F( LIST_INST =LIST,  
                                   INST_FIN =4.)) ,
```

```
U = STAT_NON_LINE( reuse = U,  
                  INCREMENT =_F ( LIST_INST =LIST,  
                                   INST_INIT =8.),  
                  ETAT_INIT =_F ( EVOL_NOLI =U)) ,
```

1<sup>er</sup> STAT\_NON\_LINE : effectue le calcul des instants 1 à 4s.

2<sup>nd</sup> STAT\_NON\_LINE : effectue le calcul pour les instants 9 et 10s (ne fait rien pour t=5, 6, 7 et 8s), l'état initial correspondant au temps t=4s (par défaut INST=4.).

**3.7.3 Opérande PRECISION**

◇ PRECISION : prec Cf. [U4.71.00]

**3.7.4 Opérande SUBD\_PAS / SUBD\_PAS\_MINI / COEF\_SUBD\_PAS\_1**

◇ SUBD\_PAS : subpas

◇ SUBD\_PAS\_MINI : submini

◇ COEF\_SUBD\_PAS\_1 : coefsub

Permet de réaliser un redécoupage automatique du pas de temps lorsque l'algorithme de Newton ne converge pas.

Le pas de temps est redécoupé en subpas sous pas. Par défaut il n'y a pas de redécoupage (subd\_pas : 1). La subdivision automatique s'arrête lorsque les nouveaux pas créés sont plus petits que SUBD\_PAS\_MINI. Les nouveaux pas créés sont de taille identique, excepté le premier qui est égal à cette taille multipliée par COEF\_SUBD\_PAS\_1 (par défaut 1). Ceci permet de mieux prendre en compte les problèmes de décharge de la structure (changement de matrice tangente) sans utiliser la matrice élastique (PREDICTION : 'ELASTIQUE' ou MATRICE : 'ELASTIQUE' sous l'opérande NEWTON).

**Remarque concernant le mot clé DECOUPE sous SOLVEUR :**

*Lors de calcul de flambage élastoplastique, il peut arriver que la matrice tangente du système soit singulière au cours des itérations de Newton. En redécoupant le pas de temps, on peut passer ces points durs. Sous l'opérande SOLVEUR, le mot clé DECOUPE sous STOP\_SINGULIER sert à gérer ces points durs. Il est alors nécessaire de renseigner les mots clés relatifs au redécoupage pour que la méthode DECOUPE soit activée.*

**3.7.5 Opérande OPTI\_LIST\_INST / NOM\_CHAM / NOM\_CMP / VALEUR**

```

◇ OPTI_LIST_INST : 'INCR_MAXI' [DEFAULT]
◇ NOM_CHAM       : 'TEMP'      [DEFAULT]
◇ NOM_CMP        : 'TEMP'      [DEFAULT]
◇ VALE           : vale

```

Ces opérandes n'ont d'intérêt que lorsqu'on réalise un calcul thermomécanique. Permet de créer si besoin une nouvelle liste de pas de temps mécanique de sorte que entre chaque incrément de temps, l'incrément de température soit inférieur à une valeur donnée par l'utilisateur et renseignée par le mot clé VALE.

La création de cette nouvelle liste se fait de la façon suivante :

- Liste d'instants initial en mécanique :  $T_i$
- Liste d'instants thermique :  $\theta$
- Nouvelle liste d'instants mécanique final à créer si besoin :  $T_f$
- On insère entre chaque intervalle de la liste initiale mécanique  $T_i$ , les instants thermiques inclus dans cet intervalle. On récupère alors pour chaque intervalle une liste d'instants  $\tau = [\tau_0, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N]$
- Construction de la liste final  $T_f$

a) Initialisation :  $\tau_f = \tau_0$

b) 1<sup>er</sup> Test :

Si  $T(\tau_i) - T(\tau_f) > \text{valeur}$  avec  $T(t)$  la température au temps  $t$  et  $\tau_f$  le dernier instant inséré dans la nouvelle liste  $T_f$ , alors on garde dans la nouvelle liste  $T_f$ , l'instant  $\tau_{i-1}$

c) 2<sup>ème</sup> Test :

Si  $T(\tau_i) - T(\tau_{i-1}) > \text{valeur}$  alors on redécoupe uniformément cet intervalle de façon à satisfaire la condition sur l'incrément de température.

**Exemple :** SI  $T(\tau) = [T(\tau_1) = 20^\circ\text{C}, T(\tau_2) = 30^\circ\text{C}, T(\tau_3) = 55^\circ\text{C}, T(\tau_4) = 65^\circ\text{C}]$  avec  $\text{VALE} = 15^\circ\text{C}$

Initialisation :  $\tau_f = \tau_1$

Intervalle 1 :

1<sup>er</sup> Test = 2<sup>ème</sup> Test :  $T(\tau_2) - T(\tau_1) = 10^\circ\text{C} < 15$  donc on  $T_f = [\tau_1]$

Intervalle 2 :

1<sup>er</sup> Test :  $T(\tau_3) - T(\tau_f) = 35^\circ\text{C} > 15$  donc on a  $T_f = [\tau_1, \tau_2]$  et  $\tau_f = \tau_2$

2<sup>ème</sup> Test :  $T(\tau_3) - T(\tau_2) = 25^\circ\text{C} > 15$  donc on  $T_f = [\tau_1, \tau_2, T_3]$  tel que  $T(T_3) = 42.5^\circ\text{C}$ ,  $\tau_3]$  et  $\tau_f = \tau_3$

Intervalle 3 :

1<sup>er</sup> Test = 2<sup>ème</sup> Test :  $T(\tau_4) - T(\tau_3) = 10^\circ\text{C} < 15^\circ\text{C}$

d'où la liste finale suivante :

$T_f = [\tau_1, \tau_2, T_3 \text{ tel que } T(T_3) = 42.5^\circ\text{C}, \tau_3, \tau_4]$

**3.8 Mot clé NEWTON**

◇ NEWTON :

Précise les caractéristiques de la méthode de résolution du problème incrémental non linéaire (méthode de NEWTON-RAPHSON).

### 3.8.1 Opérande PREDICTION

◇ PREDICTION:  
/ 'TANGENTE'  
/ 'ELASTIQUE'  
/ 'EXTRAPOL'  
/ 'DEPL\_CALCULE'

La phase de prédiction (Cf. [R5.03.01]) a pour but de calculer une estimation du champ de déplacements afin de permettre à la méthode de NEWTON de converger plus rapidement.

Lorsque le mot clé est absent, c'est la matrice tangente en vitesse (option RIGI\_MECA\_TANG dans le fichier .mess) qui est utilisée si l'on a choisi pour la méthode de NEWTON une MATRICE: 'TANGENTE', et c'est la matrice élastique (option RIGI\_MECA dans le fichier .mess) qui est utilisée si on a choisi MATRICE: 'ELASTIQUE'.

/ 'TANGENTE'

On utilise la matrice tangente du problème en vitesse (option RIGI\_MECA\_TANG dans le fichier .mess).

/ 'ELASTIQUE'

On utilise la matrice élastique (option RIGI\_MECA dans le fichier .mess).

/ 'EXTRAPOL'

On calcule l'estimation de l'incrément de déplacement à partir de l'incrément total obtenu comme solution au pas de temps précédent (pondéré par le rapport des pas de temps). On projette cette estimation sur l'ensemble des champs cinématiquement admissibles (i.e. satisfaisant les conditions aux limites de DIRICHLET) selon la norme donnée par la matrice élastique, qui doit donc être calculée. Cette fonctionnalité est intéressante dans le cas de l'utilisation de schémas d'intégration locale explicite de type RUNGE-KUTTA qui ne fournissent pas de matrice tangente : dans ce cas la méthode de NEWTON utilise une matrice élastique, mais le nombre d'itérations nécessaires peut être élevé. L'utilisation de l'extrapolation peut améliorer les performances.

/ 'DEPL\_CALCULE'

Permet de proposer comme déplacement pour la prédiction à chaque pas de temps, le déplacement donné par une histoire mécanique précisée sous le mot clé EVOL\_NOLI ([§3.8.3]).

#### Utilité :

- *supposons qu'on réalise un premier calcul avec un maillage grossier. On souhaite réaliser le même calcul mais sur un maillage plus fin. On peut supposer que la solution en déplacement pour ce second calcul n'est pas éloignée de celle du premier calcul et donc qu'une bonne prédiction du déplacement pour ce second calcul est la projection des déplacements du calcul 1 sur les nœuds du nouveau maillage (la projection des déplacements sur le nouveau maillage doit être réalisée préalablement avec l'opérateur PROJ\_CHAMP [U4.72.05]). Ce mot clé permet de réaliser ce mode de prédiction.*
- *cela permet de réduire la place mémoire et de conserver ces résultats en vue d'une poursuite ultérieure. Pour un gros calcul, on peut stocker uniquement les déplacements à tous les instants aux formats IDEAS ou MED dans IMPR\_RESU. Si on veut recalculer les contraintes et variables internes, on fait un LIRE\_RESU au format adéquate puis on utilise DEPL\_CALCULE avec ITER\_GLOB\_MAXI : 0 (on effectue une seule itération) et ARRET : NON (il n'y a pas convergence, on ne vérifie pas l'équilibre). Il est toutefois nécessaire pour des raisons de syntaxe de donner un chargement (éviter les chargements dirichlet qui imposent une résolution linéaire) ainsi qu'un critère de convergence, même si ces informations ne sont pas prises en compte.*



### 3.8.2 Opérande MATRICE

```
◇ MATRICE :  
  / 'TANGENTE'  
    ◇ REAC_INCR : / 1 [DEFAULT]  
                  / mf  
    ◇ REAC_ITER : / 0 [DEFAULT]  
                  / it
```

La matrice utilisée pour les itérations globales de la méthode est la matrice tangente [R5.03.01] qui est réévaluée tous les `mf` incréments de temps (`mf` positif ou nul) et toutes les `it` itérations de NEWTON pour un incrément de temps donné (précisément aux itérations de numéro `it`, `2it`, `3it`...). Donc à la première itération de NEWTON, on ne réassemble la matrice tangente que si `it` vaut 1 : sinon on garde la matrice utilisée dans la phase de prédiction. Par convention si `it` vaut 0 la matrice n'est pas réévaluée durant tout le pas de temps.

```
◇ PAS_MINI_ELAS: 0. [DEFAULT]  
                  pasmini [I]
```

Permet de passer de la matrice tangente à la matrice élastique lorsque le pas de temps est ou devient (par le redécoupage) inférieur à `pasmini`.

Comme la convergence avec la matrice élastique est plus lente que celle avec la matrice tangente, le mot clé `ITER_GLOB_ELAS` sous le mot clé facteur `CONVERGENCE` permet de définir un nombre d'itérations maximal spécifique à l'utilisation de la matrice élastique et différent de celui associé à l'utilisation de la matrice tangente.

#### Utilité :

*Cette option peut être utile lorsque le redécoupage automatique du pas de temps (cf. [§ 3.7.4]) ne suffit pas à faire converger un calcul. Par exemple, dans le cas de lois adoucissantes, la matrice tangente peut devenir singulière et il vaut donc mieux utiliser la matrice élastique pour converger.*

```
/ 'ELASTIQUE'
```

La matrice utilisée correspond au calcul élastique : elle n'est évaluée qu'une fois à l'instant initial, en début d'algorithme.

*Cette matrice "élastique" est calculée en utilisant le module d'YOUNG donné sous le mot clé `ELAS` de l'opérateur `DEFI_MATERIAU`, et non pas la pente à l'origine de la courbe de traction donnée sous le mot clé `TRACTION` (et qui sert, elle, dans l'expression de la relation de comportement).*

### 3.8.3 Opérande EVOL\_NOLI

```
◇ EVOL_NOLI : evol_noli
```

Nom du concept de type `evol_noli` qui servira dans la prédiction par `DEPL_CALCULE`.

## 3.9 Mot clé RECH\_LINEAIRE

```
◇ RECH_LINEAIRE :
```

La recherche linéaire peut permettre d'améliorer la convergence de la méthode de Newton (Cf. [R5.03.01] pour plus de détails).

#### Attention :

*Il est déconseillé d'utiliser la recherche linéaire avec les déformations `GREEN_GR` pour les modélisations `COQUE_3D`.*

### 3.9.1 Opérande RESI\_LINE\_RELA / ITER\_LINE\_MAXI

◇ RESI\_LINE\_RELA :      / 1.E-1                    [DEFAULT]  
                              / reslin  
◇ ITER\_LINE\_MAXI :      / 3                            [DEFAULT]  
                              / itelin

Ce sont les paramètres de la recherche linéaire. On donne le nombre d'itérations maximum *itelin* à effectuer et la précision *reslin* à atteindre pour réaliser la convergence de la recherche linéaire. Il est conseillé de ne pas utiliser la recherche linéaire avec du contact.

*Il n'est pas nécessaire de spécifier une précision ni un nombre d'itérations très élevés, la pratique montrant que 2 ou 3 itérations de recherche linéaire sont suffisantes. On peut donc se contenter de demander 3 itérations avec la précision par défaut.*

### 3.10 Opérande PARM\_THETA

◇ PARM\_THETA :      / 1.                    [DEFAULT]  
                              / theta

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

Pour les lois de comportements ROUSS\_VISC, ASSE\_COMBU, ZIRC\_CYRA2 et ZIRC\_EPRI, l'argument *theta* sert à l'intégration de la loi de comportement (pour le modèle ASSE\_COMBU, il sert à intégrer la loi de Lemaître en 1D). Il peut prendre les valeurs 0.5 ou 1.

### 3.11 Mot clé PILOTAGE

◇ PILOTAGE :

Lorsque l'intensité  $\eta$  d'une partie du chargement n'est pas connue a priori (chargement dit de référence défini dans *AFFE\_CHAR\_MECA* ou *AFFE\_CHAR\_MECA\_F* avec charge de type *FIXE\_PILO*), le mot clé *PILOTAGE* permet de piloter ce chargement par l'intermédiaire d'un nœud (ou groupe de nœud) sur lequel on peut imposer différents modes de pilotage (mot clé *TYPE*).

#### Attention :

*Avec *FIXE\_PILO*, on ne peut pas utiliser pour le chargement de référence le mot clé *FONCT\_MULT*.*

#### Attention :

*Lorsque le chargement de référence est défini par *AFFE\_CHAR\_MECA\_F*, ce chargement peut être fonction des variables d'espace mais pas du temps.*

#### Attention :

*Le mot clé *PILOTAGE* est interdit avec le contact.*

#### 3.11.1 Opérande TYPE

◇ TYPE :      / 'DDL\_IMPO'  
                 / 'LONG\_ARC'  
                 / 'ANA\_LIM'  
                 / 'DEFORMATION'  
                 / 'PRED\_ELAS'

C'est le type de pilotage effectué. Cinq modes de pilotage sont disponibles (Cf. [R5.03.80] pour plus de détails) :

/    'DDL\_IMPO'

Permet d'imposer une valeur donnée d'incrément de déplacement (une seule composante  $i$  possible) en un unique nœud  $no$  (ou d'un groupe de nœuds ne comportant qu'un seul nœud). À chaque incrément de temps, on cherche l'amplitude  $\eta$  du chargement de référence qui permettra de satisfaire la relation incrémentale suivante :

$$c_{mult} \Delta u_i(no) = \Delta t$$

/    'LONG\_ARC'

Permet de piloter l'intensité  $\eta$  du chargement de référence par la longueur (abscisse curviligne) de la réponse en déplacement d'un groupe de nœuds (à utiliser par exemple lorsqu'on veut contrôler le flambement d'une éprouvette). On vérifie la relation suivante :

$$C_{mult} \|\Delta u\| = \Delta t \text{ avec } \|\Delta u\| = \sqrt{\sum_n \sum_c \Delta U_{n,c}^2}$$

où  $n$  sont les nœuds du pilotage et  $c$  les composantes du déplacement des nœuds considérés. Même si le groupe de nœud du pilotage est réduit à un seul nœud, il faut quand même utiliser GROUP\_NO.

/    'ANA\_LIM'

Ce mode de pilotage est spécifique au calcul de charge limite (loi NORTON\_HOFF) par approche cinématique ( cf. [R7.07.01] pour plus de détail). Si  $F$  désigne le chargement assemblé piloté, TYPE\_CHARGE = 'FIXE\_PILO', alors la fonction de pilotage s'écrit simplement :

$$P(U) = F.U = 1$$

Excepté pour le calcul de charge limite, cette fonctionnalité ne présente pas d'intérêt *a priori*.

*Pour ce mode de pilotage, aucun autres mots clés n'est à préciser.*

**Remarque :**

*L'utilisation de lois de comportement adoucissantes peut conduire à des snap backs brutaux qui rendent délicat le déroulement du calcul. Les deux modes de pilotage suivants y remédient (Cf. [R5.03.80] pour plus de détail).*

/    'DEFORMATION'

DEFORMATION garantit qu'au moins un point de Gauss de la structure voit sa déformation évoluer de façon monotone. On vérifie la relation :

$$C_{mult} \underset{\text{point de Gauss}}{Max} \left( \frac{\varepsilon^-}{\|\varepsilon^-\|} \Delta \varepsilon \right) = \Delta t$$

Ce mode de pilotage est valable pour toutes les lois de comportement y compris en grandes déformations SIMO\_MIEHE.

/    'PRED\_ELAS'

PRED\_ELAS assure qu'au moins un point de Gauss de la structure sorte du seuil d'élasticité linéarisé  $f_{pred-elas}$  d'une quantité  $\Delta T/C_{mult}$ . On vérifie la relation :

$$C_{mult} \underset{\text{point de Gauss}}{Max} (f_{pred-elas}) = \Delta t$$

Ce mode de pilotage est valable uniquement pour les lois ENDO\_FRAGILE (avec la version locale et les deux versions non locales), ENDO\_ISOT\_BETON (avec la version locale et la version non locale), BARENBLATT et BETON\_DOUBLE\_DP.

**Utilisation – Attention :**

*Lorsqu'on veut utiliser ces deux derniers modes de pilotage, il est indispensable de faire un premier STAT\_NON\_LINE sans le mot clé PILOTAGE pour amorcer le problème et obtenir un état initial  $\varepsilon^-$  différent de zéro (sinon division par zéro pour le pilotage par incrément de déformation). On effectue après une reprise à partir de cet état initial non nul et on utilise le pilotage.*

*De plus, la résolution des deux équations précédentes permet d'obtenir l'intensité du chargement inconnue. Dans certains cas, la résolution de ces équations peut conduire à plusieurs solutions pour l'intensité. On choisit alors toujours la solution qui est la plus proche de  $\varepsilon^-$ . C'est pourquoi, lorsqu'on veut imposer un chargement alterné, on est obligé à chaque changement de signe du chargement de réaliser un premier STAT\_NON\_LINE sans le mot clé PILOTAGE afin d'obtenir un état initial  $\varepsilon^-$  de traction ou de compression. On effectue ensuite un second STAT\_NON\_LINE en poursuite à partir de l'état initial précédent avec le mot clé PILOTAGE.*

**Remarques :**

*DEFORMATION et PRED\_ELAS ne sont pas disponibles pour les éléments de structures.*

**3.11.2 Opérands NOEUD / GROUP\_NO**

```
◇ / NOEUD :      no
  / GROUP_NO :   grno
```

On donne le nom du nœud ou le nom de groupe de nœuds sur lequel on va imposer le pilotage. A n'utiliser qu'avec 'DDL\_IMPO' ou 'LONG\_ARC'.

Pour 'DDL\_IMPO', si on utilise l'opérande GROUP\_NO, le groupe de nœuds en question ne doit contenir qu'un seul nœud. Pour 'LONG\_ARC', on utilise uniquement GROUP\_NO (qui peut éventuellement ne contenir qu'un seul nœud).

**3.11.3 Opérands TOUT / MAILLE / GROUP\_MA**

```
◇ / TOUT      :   'OUI'      [DEFAULT]
  / GROUP_MA  :   lgrma
  / MAILLE    :   lma
```

On donne les mailles ou groupes de mailles servant à piloter le calcul. A n'utiliser qu'avec DEFORMATION ou PRED\_ELAS. Intéressant pour alléger la résolution des équations de ces trois modes de pilotages.

**3.11.4 Opérande NOM\_CMP**

```
◇ NOM_CMP :      nomcmp
```

C'est le nom de la composante (correspondant au degré de liberté  $i$ ) utilisée pour le pilotage ('DX' par exemple). A n'utiliser qu'avec 'DDL\_IMPO' ou 'LONG\_ARC'.

**3.11.5 Opérande COEF\_MULT**

```
◇ COEF_MULT :      cmult
```

C'est la valeur (notée  $c_{mult}$  dans la formule de définition) par laquelle on multiplie le degré de liberté utilisé pour le pilotage. Par défaut, cette valeur vaut 1. A ne pas utiliser avec ANA\_LIM.

**Exemple avec DDL\_IMPO :**

Supposons que l'on veut connaître la charge limite d'une structure.

Le chargement imposé sur la structure est la pression d'intensité inconnue ( $P = \eta \cdot \text{valeur de référence } P_x$ ) sur le groupe de maille A. Pour trouver la charge limite  $P_{\text{limite}}$ , on va piloter le déplacement du nœud NO1. On veut que le déplacement final suivant x de ce nœud soit égal à 2. (soit d'après la liste d'instantanés des pas de 0.2, soit un coefficient  $\text{cmult} = 1/0.2 = 5$ .)

```
PRESSION = AFFE_CHAR_MECA (PRES = ( GROUP_MA = A,    PX = 1.0 ) ) ,

LIST = DEFI_LIST_REEL (DEBUT = 0. ,
                       INTERVALLE = _F( JUSQU'A = 10,    NOMBRE = 10 ) ,
RESU = STAT_NON_LINE(    EXCIT = _F(    CHARGE = PRESSION,
                                   TYPE_CHARGE = 'FIXE_PILO' ) ,
                       PILOTAGE = _F( TYPE = 'DDL_IMPO' ,
                                   NOEUD = NO1 ,
                                   NOM_CMP = 'DX' ,
                                   COEF_MULT = 5. ) ) ,
```

Dans le fichier.resu, la valeur de  $\eta$  sera affichée à chaque instant du calcul. Pour connaître la charge limite, il suffit de faire  $P_{\text{limite}} = \eta \cdot P_x$ . (Ici  $P_x$  vaut 1 donc on a directement la charge limite). Si on impose sur la structure une pression  $P$  proche de la charge limite sans utiliser le pilotage, le calcul ne convergera pas si on est proche de la charge limite.

**3.11.6 Opérande ETA\_PILO\_MAX / ETA\_PILO\_MIN**

◇    **ETA\_PILO\_MAX :**            etamax

Arrêt du calcul lorsque le paramètre de pilotage atteint la valeur donnée etamax.

◇    **ETA\_PILO\_MIN:**            etamin

Permet d'interrompre le calcul lorsque le paramètre **ETA\_PILOTAGE** atteint cette valeur minimale etamin (pour des modèles adoucissants, permet de stopper le calcul lorsque la structure est suffisamment adoucie).

**Attention :**

| Avec la loi *ENDO\_ISOT\_BETON*, ces deux mots clés sont obligatoires.

**3.12 Mot clé SOLVEUR**

La syntaxe de ce mot clé commun à plusieurs commandes est décrite dans le document [U4.50.01].

**3.13 Mot clé CONVERGENCE**

◇    **CONVERGENCE :**

| Si aucun des deux opérandes suivants n'est présent, alors tout se passe comme si :  
| *RESI\_GLOB\_RELA* = 1.E-6.

**3.13.1 Opérande RESI\_GLOB\_RELA / RESI\_GLOB\_MAXI**

◇    |    **RESI\_GLOB\_RELA :** resrel

L'algorithme continue les itérations globales tant que :

$$\max_{i=1, \dots, nb\_ddl} |F_i^n| > \text{resrel} \max |\mathbf{L}|$$

où  $F^n$  est le résidu de l'itération  $n$  et  $\mathbf{L}$  le vecteur du chargement imposé et des réactions d'appuis (Cf. [R5.03.01] pour plus de détails).

Lorsque le chargement et les réactions d'appui deviennent nuls, c'est-à-dire lorsque **L** est nul (par exemple dans le cas d'une décharge totale), on passe du critère de convergence relatif au critère de convergence absolu *RESI\_GLOB\_MAXI*. Cette opération est transparente pour l'utilisateur (message d'alarme émis dans le fichier .mess). Lorsque le vecteur **L** redevient différent de zéro, on repasse automatiquement au critère de convergence relatif *RESI\_GLOB\_RELA*.

Si cet opérande est absent, le test est effectué avec la valeur par défaut, sauf si *RESI\_GLOB\_MAXI* est présent.

◇ |    *RESI\_GLOB\_MAXI* : resmax

L'algorithme continue les itérations globales tant que :

$$\max_{i=1,\dots,nb\_ddl} |F_i^n| > \text{resmax}$$

où  $F^n$  est le résidu de l'itération  $n$  (Cf. [R5.03.01] pour plus de détails).

Si cet opérande est absent, le test n'est pas effectué.

Si *RESI\_GLOB\_RELA* et *RESI\_GLOB\_MAXI* sont présents tous les deux, les deux tests sont effectués.

### 3.13.2 Opérande *ITER\_GLOB\_MAXI*

◇    *ITER\_GLOB\_MAXI* :        / 10                    [DEFAULT]  
                                  / maglob

Nombre d'itérations maximum effectué pour résoudre le problème global à chaque instant (10 par défaut). Ce test est toujours effectué.

### 3.13.3 Opérande *ITER\_GLOB\_ELAS*

◇    *ITER\_GLOB\_ELAS* :        / 25                    [DEFAULT]  
                                  / maxelas

Nombre d'itérations maximum effectué avec la matrice élastique lorsqu'on utilise le mot clé *PAS\_MINI\_ELAS* du mot clé facteur *NEWTON* (voir [§3.8.2]). pour résoudre le problème global à chaque instant (25 par défaut).

On rappelle que *PAS\_MINI\_ELAS* permet de passer de la matrice tangente à la matrice élastique lorsque le pas de temps est ou devient (par le redécoupage) inférieur à une certaine valeur précisée sous *PAS\_MINI\_ELAS*.

### 3.13.4 Opérande *ARRET*

◇    *ARRET* :  
      / 'OUI'                    [DEFAULT]

Si un des critères de convergence globale choisis n'est pas vérifié après maglob itérations, alors le programme s'arrête (les résultats précédents sont sauvegardés).

/ 'NON'

Si maglob est insuffisant pour vérifier les critères de convergence donnés par l'utilisateur, on passe quand même à l'instant suivant. Utilisation à éviter.

### 3.13.5 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, 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.

### 3.13.6 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, VISCTAHERI, 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.

### 3.13.7 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.

- le modèle POLY\_CFC est traité 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 autres modèles utilisent le schéma IMPLICITE.

## 3.14 Mot clé ARCHIVAGE

```
◇ ARCHIVAGE :
```

Permet d'archiver des ou certains résultats à tous ou certains instants du calcul.

En l'absence de ce mot clé tous les pas de temps sont archivés, y compris les instants de calculs nouvellement créés par redécoupage automatique du pas de temps.

### 3.14.1 Opérande LIST\_INST / INST / PAS\_ARCH

◇ / 'LIST\_INST' : list\_r8  
/ 'INST' : l\_r8  
/ 'PAS\_ARCH' : npas

La désignation des instants à stocker est effectuée soit par une liste d'instants (list\_r8 ou l\_r8) à condition que l'évolution soit ordonnée (EVOLUTION : CHRONOLOGIQUE ou RETROGADE, cf [§3.6.1]) ou alors par une fréquence d'archivage (tous les npas de temps).

En l'absence de ces mots clés tous les pas de temps sont archivés.

Deux remarques :

- le dernier pas de calcul est toujours stocké pour pouvoir effectuer une reprise,
- si on emploie un accès par liste d'instants, alors les instants de calculs nouvellement créés par redécoupage automatique du pas de temps ne sont pas archivés

### 3.14.2 Opérande PRECISION

◇ PRECISION : prec Cf. [U4.71.00]

### 3.14.3 Opérande ARCH\_ETAT\_INIT / NUME\_INIT / DETR\_NUME\_SUIV

◇ / 'ARCH\_ETAT\_INIT' : 'OUI' (absent par défaut)

Uniquement pour un *concept non réentrant* sinon message d'erreur. Permet d'imposer l'archivage de l'état initial dans le numéro d'ordre 0 (intéressant lorsque l'état initial provient d'un autre STAT\_NON\_LINE. Permet d'avoir le 1<sup>er</sup> point sur une courbe).

/ 'NUME\_INIT' : nuinit

Uniquement pour un *concept réentrant* sinon message d'erreur. Permet de préciser à partir de quel numéro d'ordre on archive.

Par défaut :

- si l'état initial n'est pas fixé par le concept calculé, il s'agit du dernier numéro d'ordre +1 (exemple A),
- si le concept calculé coïncide avec le concept qui fixe l'état initial, il s'agit du numéro d'ordre +1 sous ETAT\_INIT (exemple B et C).

◇ DETR\_NUME\_SUIV : 'OUI' (absent par défaut)

Cette opération peut conduire à écraser des numéros d'ordre préexistants : le mot clé DETR\_NUME\_SUIV confirme cette destruction, tandis que son absence met fin au calcul.

#### A - Exemple simple

```
LIST = DEFI_LIST_REEL( DEBUT = 0.,  
                      INTERVALLE = _F(JUSQU'A = 5., NOMBRE = 5)),  
U1 = STAT_NON_LINE(INCREMENT = _F(LIST_INST = LIST,  
                                   INST_FIN = 3.)) ,  
U2 = STAT_NON_LINE(INCREMENT = _F(LIST_INST = LIST)) ,  
U2 = STAT_NON_LINE(reuse=U2,  
                  ETAT_INIT = _F(EVOL_NOLI = U1),  
                  INCREMENT = _F(LIST_INST = LIST),  
                  ARCHIVAGE = _F(LIST_INST = LIST)) ,
```



Le résultat final pour l'archivage de U2 est le suivant :

numéro d'archivage	:	1	2	3	4	5	6	7
instants correspondants	:	1.	2.	3.	4.	5.	4.	5.

## B - Exemple simple

```
LIST = DEFI_LIST_REEL( DEBUT =0.,
                        INTERVALLE =_F(JUSQU'A =10., NOMBRE =5)),
U2 = STAT_NON_LINE(INCREMENT =_F(LIST_INST =LIST)) ,
&U2 = STAT_NON_LINE(reuse=U2,
                    ETAT_INIT =_F( EVOL_NOLI =U2,
                                   INST =4.),
                    INCREMENT =_F( LIST_INST =LIST),
                    ARCHIVAGE =_F( LIST_INST =LIST,
                                   DETR_NUME_SUIV ='OUI' )) ,
```

Le résultat de l'archivage pour le 1<sup>er</sup> U2 est le suivant :

numéro d'archivage	:	1	2	3	4	5
instants correspondants	:	2.	4.	6.	8.	10.

Le résultat final de l'archivage pour U2 est le suivant (par défaut nuinit = 3):

numéro d'archivage	:	1	2	3	4	5
instants correspondants	:	2.	4.	6.	8.	10.

## C - Exemple avec NUME\_INIT

```
LIST = DEFI_LIST_REEL( DEBUT =0.,
                        INTERVALLE =_F(JUSQU'A =10., NOMBRE =5)),
U2 = STAT_NON_LINE(INCREMENT =_F( LIST_INST =LIST)) ,
U2 = STAT_NON_LINE(reuse=U2,
                    ETAT_INIT =_F( EVOL_NOLI =U2,
                                   INST =4.),
                    INCREMENT =_F( LIST_INST =LIST),
                    ARCHIVAGE =_F( LIST_INST =LIST,
                                   NUME_INIT =2 ,
                                   DETR_NUME_SUIV ='OUI' )) ,
```

Le résultat de l'archivage pour le 1<sup>er</sup> U2 est le suivant :

numéro d'archivage	:	1	2	3	4	5
instants correspondants	:	2.	4.	6.	8.	10.

Le résultat final de l'archivage pour U2 est le suivant :

numéro d'archivage	:	1	2	3	4
instants correspondants	:	2.	6.	8.	10.

### 3.14.4 Opérande CHAM\_EXCLU

◇ CHAM_EXCLU :	'DEPL'
	'SIEF_ELGA'
	'VARI_ELGA'
	'VARI_NON_LOCAL'
	'LANL_ELGA'

Permet de préciser les champs qui ne seront pas archivés, excepté au dernier pas de temps.

### 3.15 Opérande OBSERVATION

La syntaxe de ce mot clé commun à la commande DYNA\_NON\_LINE est décrite dans le document [U4.50.01].

### 3.16 Opérande SOLV\_NON\_LOCAL

La syntaxe de ce mot clé est identique au mot clé SOLVEUR décrit dans le document [U4.50.01]. A utiliser pour un modèle non local.

### 3.17 Opérande LAGR\_NON\_LOCAL

L'intégration de lois de comportement non locales impose la résolution d'un problème global (sur toute la structure) : la minimisation d'une fonctionnelle énergie (l'expression du lagrangien augmenté) par rapport à une variable nodale scalaire.

La résolution de ce problème s'effectue au moyen d'un algorithme newton primal et BFGS dual combiné, qui consiste en deux phases :

- Résolution du problème primal :
  - Minimisation par rapport à la variable interne non locale et son gradient (*cham\_elem*)
  - Minimisation par rapport à la variable interne aux nœuds (*cham\_no*)
  - Test de convergence primal : la plus grande composante du résidu assemblé
- Résolution du problème dual : (Maximisation par rapport aux multiplicateurs de Lagrange)
  - Calcul d'une direction de descente BFGS
  - Recherche linéaire par méthode de Wolfe
  - Test de convergence dual : la plus grande composante du gradient
  - Réactualisation des multiplicateurs de Lagrange

◇ ITER\_PRIM\_MAXI : *iterprimmax* (10 par défaut)

Nombre d'itérations maximales pour la résolution du problème primal.

◆ RESI\_PRIM\_ABSO : *resiprimab*

Précision pour le test de convergence pour le problème primal.

◇ ITER\_DUAL\_MAXI : *iterdmax* (50 par défaut)

Nombre d'itérations maximales pour la résolution du problème dual.

◆ RESI\_DUAL\_ABSO : *residabso*

Précision pour le test de convergence pour le problème dual.

◇ R : *rho* (1000 par défaut)

Coefficient de pénalisation du lagrangien augmenté.

**Remarque :**

*comme la précision du problème dual dépend fortement de celle du problème primal, on conseille de choisir une meilleure précision pour le problème primal, par exemple 100 ou 1000 fois plus que pour le problème dual.*

### 3.18 Opérande INFO

◇ INFO : *inf*

Permet d'effectuer dans le fichier message diverses impressions intermédiaires en présence de contact unilatéral traité par la méthode des contraintes actives.

<i>inf</i>	= 1	impression de la liste des nœuds en contact après convergence à chaque itération de Newton.
	= 2	idem 1 plus impression des associations/dissociations de nœuds entre itérations de la méthode des contraintes actives.

D'autres impressions sont faites systématiquement lors du calcul non linéaire, indépendamment de la valeur affectée au mot-clé INFO : ce sont les impressions des résidus et des incréments relatifs de déplacement au cours des itérations de Newton.

## 3.19 Opérande TITRE

◇    TITRE : tx

tx est le titre du calcul. Il sera imprimé en tête des résultats. Voir [U4.03.01].

Page laissée intentionnellement blanche.