

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

1 But	1
2 Syntaxe	5
3 Opérandes	10
3.1 Opérandes MODELE / CHAM_MATER / CARA_ELEM	10
3.2 Mot clé EXCIT	10
3.2.1 Opérandes CHARGE	10
3.2.2 Opérande FONC_MULT	11
3.2.3 Opérande TYPE_CHARGE	11
3.3 Mot clé COMP_INCR.....	12
3.3.1 Opérande RELATION	12
3.3.1.1 Modèles classiques.....	15
3.3.1.2 Modèles locaux avec endommagement	18
3.3.1.3 Modèles non locaux	20
3.3.1.4 Modèles décrivant le phénomène de déformation progressive	22
3.3.1.5 Comportements spécifiques aux crayons combustibles	23
3.3.1.6 Comportements spécifiques aux éléments de poutre et discrets	23
3.3.1.7 Modèles mécaniques avec effets des transformations métallurgiques	26
3.3.1.8 Comportement pour le béton	32
3.3.1.9 Comportement pour les milieux poreux (modélisation thermo-hydro-mécanique) ..	35
3.3.2 Opérande RELATION_KIT sous COMP_INCR	38
3.3.2.1 KIT associé au comportement métallurgique.....	38
3.3.2.2 KIT associé au comportement du béton	38
3.3.2.3 KIT associé au comportement des milieux poreux (relation KIT_XXXX)	38
3.3.3 Opérande DEFORMATION sous COMP_INCR	42
3.3.4 Opérandes TOUT / GROUP_MA / MAILLE / GROUP_NO / NOEUD sous COMP_INCR	43
3.3.5 Opérande ALGO_C_PLAN.....	44
3.4 Mot clé COMP_ELAS.....	44
3.4.1 Opérande RELATION sous COMP_ELAS.....	44
3.4.2 Opérande DEFORMATION sous COMP_ELAS	45
3.4.3 Opérandes TOUT / GROUP_MA / MAILLE / GROUP_NO / NOEUD sous COMP_ELAS.....	46
3.5 Mot clé VARI_COMM.....	46
3.5.1 Opérande IRRA	46
3.6 Mot clé ETAT_INIT.....	46
3.6.1 Opérandes SIGM / VARI / DEPL / VARI_NON_LOCAL.....	46
3.6.2 Opérandes EVOL_NOLI	46
3.6.3 Opérande NUME_ORDRE / INST / NUME_DIDI	47
3.6.4 Opérande INST_ETAT_INIT.....	47
3.6.5 Opérande PRECISION / CRITERE	48

3.7	Mot clé INCREMENT	48
3.7.1	Opérandes LIST_INST / EVOLUTION.....	48
3.7.2	Opérandes NUME_INST_INIT / INST_INIT / NUME_INST_FIN / INST_FIN.....	49
3.7.3	Opérande PRECISION.....	50
3.7.4	Opérande SUBD_PAS / SUBD_PAS_MINI / COEF_SUBD_PAS_1	50
3.7.5	Opérande OPTI_LIST_INST / NOM_CHAM / NOM_CMP / VALEUR	50
3.8	Mot clé NEWTON.....	51
3.8.1	Opérande PREDICTION.....	51
3.8.2	Opérande MATRICE.....	52
3.8.3	Opérande EVOL_NOLI.....	53
3.9	Mot clé RECH_LINEAIRE	53
3.9.1	Opérande RESI_LINE_RELA / ITER_LINE_MAXI	53
3.9.2	Opérande PAS_MINI_CRIT / ITER_LINE_CRIT	53
3.9.3	Opérandes RHO_MIN / RHO_MAX / RHO_EXCL.....	53
3.10	Opérande PARM_THETA.....	54
3.11	Mot clé PILOTAGE	54
3.11.1	Opérande TYPE.....	54
3.11.2	Opérandes NOEUD / GROUP_NO.....	56
3.11.3	Opérandes TOUT / MAILLE / GROUP_MA	56
3.11.4	Opérande NOM_CMP.....	56
3.11.5	Opérande COEF_MULT	56
3.11.6	Opérande ETA_PILO_R_MAX / ETA_PILO_R_MIN.....	57
3.11.7	Opérande ETA_PILO_MAX / ETA_PILO_MIN.....	57
3.11.8	Opérande PROJ_BORNES	57
3.11.9	Opérande SELECTION	58
3.12	Mot clé SOLVEUR	58
3.13	Mot clé CONVERGENCE.....	58
3.13.1	Opérande RESI_GLOB_RELA / RESI_GLOB_MAXI.....	58
3.13.2	Opérande RESI_REFE_RELA.....	59
3.13.3	Opérande ITER_GLOB_MAXI	59
3.13.4	Opérande ITER_GLOB_ELAS.....	59
3.13.5	Opérande ARRET.....	59
3.13.6	Opérandes RESI_INTE_RELA / ITER_INTE_MAXI	59
3.13.7	Opérande ITER_INTE_PAS	60
3.13.8	Opérande RESO_INTE	60
3.14	Mot-clé CRIT_FLAMB.....	60
3.15	Mot-clé SENSIBILITE.....	61
3.16	Mot clé ARCHIVAGE	61
3.16.1	Opérande LIST_INST / INST / PAS_ARCH	61
3.16.2	Opérande PRECISION	61

3.16.3	Opérande ARCH_ETAT_INIT / NUME_INIT / DETR_NUME_SUIV.....	61
3.16.4	Opérande CHAM_EXCLU.....	63
3.17	Opérande OBSERVATION.....	63
3.18	Opérande SOLV_NON_LOCAL.....	63
3.19	Opérande LAGR_NON_LOCAL.....	63
3.20	Opérande INFO	64
3.21	Opérande TITRE	64

2 Syntaxe

```

statnl [evol_noli] = STAT_NON_LINE
(
  ◇ reuse = statnl, [evol_noli]
  ◆ MODELE = mo, [modele]
  ◆ CHAM_MATER = chmat, [cham_mater]
  ◇ CARA_ELEM = carac, [cara_elem]
  ◆ EXCIT = _F (
    ◆ CHARGE = chi, [char_meca]
    ◇ FONC_MULT = fi, [fonction/formule]
    ◇ 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]
    ),

```

Titre : *Opérateur STAT_NON_LINE*
Auteur(s) : **P. BADEL**

Date : 13/01/04
Clé : U4.51.03-G1 Page : 6/64

```

◇  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]
        |   VARI_NON_LOCAL = vanolo,                [cham_no_VANL_R]

    /   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]
    ),

```

Titre : Opérateur *STAT_NON_LINE*
Auteur(s) : **P. BADEL**

Date : 13/01/04
Clé : U4.51.03-G1 Page : 7/64

```

◇  NEWTON =_F (
    ◇  PREDICTION =                / 'TANGENTE',          [DEFAULT]
                                   / '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]

    ◇  PAS_MINI_CRIT =              / 0.                  [DEFAULT]
                                   / pmicri               [R]

    ◇  ITER_LINE_CRIT =              / 20                 [DEFAULT]
                                   / itelic               [I]

    ◇  RHO_MIN =                    / 1.E-2              [DEFAULT]
                                   / rmin                 [R]

    ◇  RHO_MAX =                    / 1.E+1              [DEFAULT]
                                   / rmax                 [R]

    ◇  RHO_EXCL =                   / 9.E-3              [DEFAULT]
                                   / rexc                 [R]
    ),

◇  PARM_THETA =                    / 1.,                [DEFAULT]
                                   / theta,               [R]

◇  PILOTAGE =_F (
    ◆  TYPE =                       / 'DDL_IMPO',
                                   / 'LONG_ARC',
                                   / 'ANA_LIM',
                                   / 'DEFORMATION',
                                   / 'PRED_ELAS',

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

    ◇  /  NOEUD =                  no,                    [noeud]
        /  GROUP_NO =              grno,                  [gr_noeud]

    ◇  NOM_CMP =                   nomcmp,                [Kn]

    ◇  COEF_MULT =                  / 1.,                [DEFAULT]
                                   / cmult,               [R]

```

Titre : *Opérateur STAT_NON_LINE*
Auteur(s) : **P. BADEL**

Date : 13/01/04
Clé : *U4.51.03-G1* Page : 8/64

```

      ◇ ETA_PILO_R_MAX =          etarmax,          [R]
      ◇ ETA_PILO_R_MIN =          etarmin,          [R]
      ◇ ETA_PILO_MAX =          etamax,          [R]
      ◇ ETA_PILO_MIN =          etamin          [R]

      ◇ PROJ_BORNES =          / 'OUI'          [DEFAULT]
                                / 'NON'

      ◇ SELECTION =          / 'NORM_INCR_DEPL', [DEFAULT]
                                / 'ANGL_INCR_DEPL',
                                / 'RESIDU',

      ),

      ◇ 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]
              | RESI_GLOB_REFE = resref,          [R]
          ◇ SIGM_REFE =          sigref,          [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,          [I]

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

          ),

      ◇ CRIT_FLAMB =_F (
          ◇ NB_FREQ =          / 3,          [DEFAULT]
                                / nbfreq,          [I]

          ◇ CHAR_CRIT =          / (-10,10),          [DEFAULT]
                                / intcc,

          ),
```


Titre : Opérateur *STAT_NON_LINE*
Auteur(s) : **P. BADEL**

Date : 13/01/04
Clé : U4.51.03-G1 Page : 9/64

```

◇  SENSIBILITE   (   voir le document [U4.50.02] ),

◇  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] ),

◇  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*
- ◆ **CHAM_MATER** = *chmat*
- ◇ **CARA_ELEM** = *carac*

Ces mots-clés permettent de renseigner :

- le nom du modèle (*mo*) dont les éléments font l'objet du calcul mécanique,
- le nom du champ de matériau (*chmat*) affecté sur le maillage. Attention, toutes les mailles du modèle doivent être associées à un matériau (sinon erreur fatale avec message peu explicite),
- le nom des caractéristiques (*carac*) des éléments de coque, poutre, tuyau, barre, câble, et éléments discrets affectés sur le modèle *mo*. Evidemment, ce mot-clé est optionnel : si le modèle ne contient pas de tels éléments, il n'est pas utile ; en revanche, si le modèle contient de tels éléments, il est obligatoire.

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

- ◆ **CHARGE** : *ch_i*

ch_i est le chargement mécanique (comportant éventuellement l'évolution d'un champ de température) précisé à la *i*^{ème} occurrence de **EXCIT**.

*Une et 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. De même en contraintes planes ou en déformation plane, on travaille sur une épaisseur unité : les efforts (sur l'épaisseur) appliqués doivent être divisés par l'épaisseur, les efforts réels sont obtenus en multipliant par l'épaisseur les efforts « du calcul ».*

Attention :

| Les chargements issus de *AFFE_CHAR_CINE* ne sont pas utilisables avec *STAT_NON_LINE*.

3.2.2 Opérande FONC_MULT

◇ **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 : $f_i = 1$.

Remarque :

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

3.2.3 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 $tchi_i$ vaut 'FIXE_PIL0', 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 $tchi_i$ 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 pour lesquelles l'histoire du matériau influe sur son comportement : la plupart des lois de comportement (en particulier en plasticité) s'écrivent alors de façon incrémentales. L'histoire vue par le matériau est stockée dans les variables internes. On peut avoir dans le même calcul certaines parties de la structure obéissant à divers comportements incrémentaux (COMP_INCR) et d'autres parties obéissant à divers comportements élastiques (COMP_ELAS).

Certains modèles de comportements n'ont pas été développés en contrainte plane. Cependant, le mot clé ALGO_C_PLAN [§3.3.5] permet d'ajouter cette condition à tous les modèles : l'algorithme dénommé 'DEBORST' permet une prise en compte de l'hypothèse des contraintes planes au niveau de l'algorithme d'équilibre (contrairement aux modèles de comportement développés explicitement – 'ANALYTIQUE' dans le langage Aster - en contraintes planes, qui prennent cette hypothèse au niveau de l'intégration des lois de comportement). On peut donc également affecter une loi non linéaire aux éléments de structure DKT, COQUE_3D et TUYAU.

3.3.1 Opérande RELATION

◆ RELATION :

% Modèles classiques

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

% 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'  
/ 'ROUSSELIER'
```

% 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'
/ 'UMLV_FP'
/ '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 (σ , ϵ) en traction simple est fournie dans l'opérateur *DEFI_MATERIAU* [U4.43.01], sous le mot clé *TRACTION* (Cf. [R5.03.02] pour plus de détails). On peut éventuellement définir plusieurs courbes de traction suivant la température. On doit également renseigner le mot clé *ELAS(_FO)* dans l'opérateur *DEFI_MATERIAU*. C'est la relation de comportement par défaut pour les comportements incrémentaux.

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) : **P. BADEL**

Date : 13/01/04
Clé : U4.51.03-G1 Page : 16/64

/ '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 (σ , ϵ) ou éventuellement par plusieurs courbes si celles ci dépendent de la température. Les caractéristiques du matériau sont fournies dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous les mots clés PRAGER(_FO) (pour l'écrouissage cinématique), TRACTION (pour l'écrouissage isotrope) et ELAS(_FO).

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

/ **'CHABOCHE'**

Relation de comportement de Chaboche en élasto-plasticité isotherme avec 2 tenseurs d'écroissage cinématique non linéaire (sans effet de l'écroissage sur le terme de rappel) plus un écroissage 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^{er} tenseur d'écroissage cinématique \mathbf{X}_1 , `V7` à `V12` : 6 composantes du 2^{ème} tenseur d'écroissage cinématique \mathbf{X}_2 , `V13` : déformation plastique cumulée, `V14` : vaut 1.

/ **'VISC_CIN1_CHAB'**

Relation de comportement de Chaboche (rend compte du comportement cyclique du matériau) en élasto-(visco)-plasticité avec 1 tenseur d'écroissage cinématique non linéaire, un écroissage isotrope non linéaire, un effet d'écroissage sur la variable tensorielle de rappel et éventuellement la prise en compte de la viscosité. Toutes les constantes du matériau peuvent éventuellement dépendre de la température (contrairement à `CHABOCHE`). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous les mots clés `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'écroissage cinématique \mathbf{X} .

/ **'VISC_CIN2_CHAB'**

Relation de comportement de Chaboche (rend compte du comportement cyclique du matériau) en élasto-(visco)-plasticité avec 2 tenseurs d'écroissage cinématique non linéaire, un écroissage isotrope non linéaire, un effet d'écroissage sur la variable tensorielle de rappel et éventuellement la prise en compte de la viscosité. Toutes les constantes du matériau peuvent éventuellement dépendre de la température (contrairement à `CHABOCHE`). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous les mots clés `CIN2_CHAB(_FO)`, `ELAS(_FO)` (Cf. [R5.03.04] pour plus de détails) et `LEMAITRE` si on tient compte de la viscosité (dans le cas où il n'y a pas de viscosité surtout ne pas renseigner `LEMAITRE`). L'intégration est totalement implicite.

Modélisations supportées : 3D, `D_PLAN`, `AXIS`, `C_PLAN` (par `DEBORST`, mot clé `ALGO_C_PLAN` [§3.3.5]), `INCO`, `COQUE`, `TUYAU`, `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^{er} tenseur de la variable cinématique α_1 , `V9` à `V14` : 6 composantes du 2^{ème} tenseur de la variable cinématique α_2 .

/ 'NORTON_HOFF'

Relation de comportement de viscosité indépendante de la température, à utiliser notamment pour le calcul de charges limites de structures, à seuil de VON MISES. Le seul paramètre matériau est la limite d'élasticité à renseigner dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01] sous le mot-clé `ECRO_LINE` (Cf. [R7.07.01] et [R5.03.12] pour plus de détails). Pour le calcul de la charge limite, il existe un mot clé spécifique sous `PILOTAGE` pour ce modèle (voir mot clé `PILOTAGE : 'ANA_LIM'` [§3.11]). Il est fortement conseillé d'employer de la recherche linéaire (voir mot clé `RECH_LINEAIRE` [§3.9]). En effet, le calcul de la charge limite requiert beaucoup d'itérations de recherche linéaire (de l'ordre de 50) et d'itérations de Newton (de l'ordre de 50).

Modélisation supportée : `INCO`.

Nombre de variables internes : 1

Signification : `V1` : vide donc vaut 0.

/ '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`.

/ 'ENDO_ISOT_BETON'

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

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

Nombre de variables internes : 2

Signification : V1 : valeur de l'endommagement, V2 : indicateur d'endommagement (0 pour régime élastique (endommagement nul), 1 si endommagé, 2 si rompu (endommagement égal à 1)).

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

Remarque :

*Les trois modèles suivants 'ROUSSELIER' (modèle élastoplastique), 'ROUSS_PR' (modèle élastoplastique) et 'ROUSS_VISC' (modèle élastoviscoplastique) sont trois versions différentes du modèle de Rousselier. Ce modèle est une relation de comportement élasto(visco)plastique qui permet de rendre compte de la croissance des cavités et de décrire la rupture ductile dans les aciers. En dehors du côté plastique/visqueux, la différence essentielle réside dans la manière dont sont traitées les grandes déformations. Pour le modèle 'ROUSSELIER' il s'agit d'une formulation type *Simo_Miehe* (DEFORMATION : 'SIMO_MIEHE' voir [§3.3.3]) et pour les deux autres d'une formulation type 'PETIT_REAC' (DEFORMATION : 'PETIT_REAC' voir [§3.3.3]). Sur différents exemples traités en plasticité, on a constaté que le modèle 'ROUSS_PR' a besoin de beaucoup plus d'itérations de Newton pour converger par rapport au modèle 'ROUSSELIER'. Il faut noter également que ces trois modèles traitent de manière différente le matériau rompu. Dans les modèles 'ROUSS_PR' et 'ROUSS_VISC', lorsque la porosité atteint une porosité limite, on considère le matériau rompu. Le comportement est alors remplacé par une chute imposée des contraintes. Pour activer cette modélisation du matériau rompu, il faut alors renseigner dans l'opérateur *DEFI_MATERIAU* [U4.43.01], sous le mot clé *ROUSSELIER(_FO)*, les deux coefficients 'PORO_LIMI' et 'D_SIGM_EPSI_NORM'. Pour 'ROUSSELIER', on ne fait rien de particulier car la contrainte tend naturellement vers zéro lorsque la porosité tend vers un. Les deux paramètres précédents peuvent être renseignés mais n'ont pas d'impact sur le modèle.*

/ 'ROUSSELIER'

Relation de comportement élasto-plastique. Elle permet de rendre compte de la croissance des cavités et de décrire la rupture ductile. Ce modèle s'emploie exclusivement avec le mot clé *DEFORMATION : 'SIMO_MIEHE'* (voir [§3.3.3]). Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur *DEFI_MATERIAU* [U4.43.01], sous les mots clés *ROUSSELIER(_FO)* et *ELAS(_FO)* (Cf. [R5.03.06] pour plus de détails). Pour faciliter l'intégration de ce modèle, il est conseillé d'utiliser systématiquement le redécoupage global du pas de temps (voir [§3.7.4], mot clé *SUBD_PAS*). Ce modèle n'est pas développé en contrainte plane. De plus, avec le mot clé *SIMO_MIEHE*, on ne peut pas utiliser les contraintes planes par la méthode *DEBORST*.

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS.

Nombre de variables internes : 9

Signification : V1 : déformation plastique cumulée, V2 : valeur de la porosité, V3 à V8 : 6 composantes d'un tenseur eulérien en grandes déformations de déformations élastiques, V9 : indicateur de plasticité (0 si élastique, 1 si plastique avec solution régulière, 2 si plastique avec solution singulière).

/ 'ROUSS_PR'

Relation de comportement élasto-plastique. Elle permet de rendre compte de la croissance des cavités et de décrire la rupture ductile. Ce modèle s'emploie exclusivement avec les mots clés DEFORMATION : 'PETIT_REAC' ou 'PETIT', voir [§3.3.3], (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 θ -méthode est disponible et on conseille d'utiliser une intégration semi-implicite c'est-à-dire :

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

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

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) : **P. BADEL**

Date : 13/01/04
Clé : U4.51.03-G1 Page : 22/64

/ '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.

/ 'ROUSSELIER'

Cf. [R5.04.11] pour plus de détail pour la version non locale.

Modélisation non locale supportée : GRAD_VARI

Nombre de variables internes : 12

Signification :

V1 : déformation plastique cumulée,

V2 à V4 : gradient de la déformation plastique cumulée suivant les axes x, y, z, respectivement,

V5 : porosité,

V6 à V11 : déformations élastiques utilisées pour SIMO_MIEHE,

V12 : indicateur de plasticité

(0 si élastique,

1 si plastique et solution régulière,

2 si plastique et solution singulière).

3.3.1.4 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 :

```
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 : 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 :

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

Modélisations supportées : 3D, D_PLAN, AXIS, C_PLAN (par *DEBORST*, mot clé *ALGO_C_PLAN* [§3.3.6]), *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 :

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

Titre : Opérateur *STAT_NON_LINE*
Auteur(s) : **P. BADEL**

Date : 13/01/04
Clé : U4.51.03-G1 Page : 24/64

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

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

Nombre de variables internes : 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 : vitesse (différentielles entre les nœuds 1 et 2 si on a une maille SEG2) dans les directions locales y et z, respectivement, V5 et V6 : forces internes dans les directions locales y et z, respectivement, V7 : indicateur d'adhérence (0 si glissement, 1 si adhérence).*

/ 'VMIS_POU_LINE'

Relation de comportement élasto-plastique isotherme des éléments de 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 ($u_y - u_l$) où u_y est le déplacement dans la direction locale y de la maille `SEG2` et u_l le déplacement limite du domaine élastique.

/ 'ASSE_CORN'

Relation de comportement élasto-plastique isotherme pour les assemblages boulonnés de cornières de pylônes. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous le mot clé `ASSE_CORN`.

Modélisations supportées : `3D_DIS`

Nombre de variables internes : 4

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

/ 'DIS_GOUJ2E_PLAS'

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

Modélisations supportées : `2D_DIS_T`.

Nombre de variables internes : 2

Signification : `V1` : déplacement plastique cumulée, `V2` : indicateur de plasticité (0 si élastique, 1 si plastique).

/ 'DIS_GOUJ2E_ELAS'

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

Modélisations supportées : 2D_DIS_T.

Nombre de variables internes : 1

Signification : V1 : vide (donc vaut 0).

/ 'VMIS_ASYM_LINE'

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

Modélisation supportée : BARRE

Nombre de variables internes : 4

Signification : V1 : déformation plastique cumulée en traction, V2 : indicateur de plasticité en traction, V3 : déformation plastique cumulée en compression, V4 : indicateur de plasticité en compression.

3.3.1.7 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'écouissage (isotrope ou cinématique), du type de matériau (ACIER ou ZIRC) et du type de déformations (PETIT, PETIT_REAC, GREEN ou SIMO_MIEHE).

Les phases sont rangées dans l'ordre suivant :

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

Déformation	Ecrouissage isotrope		Ecrouissage cinématique	
	ACIER	ZIRC	ACIER	ZIRC
PETIT, PETIT_REAC et GREEN	V1 à V5 : variables liées à l'écouissage isotrope pour les 5 phases	V1 à V3 : variables liées à l'écouissage isotrope pour les 3 phases	V1 à V30 : variables liées à l'écouissage cinématique α pour les 5 phases	V1 à V18 : variables liées à l'écouissage cinématique α pour les 3 phases
	V6 : indicateur de plasticité (0 si élastique, 1 si plastique)	V4 : indicateur de plasticité (0 si élastique, 1 si plastique)	V31 à V36 : écouissage cinématique moyen X	V19 à V24 : écouissage cinématique moyen X
	V7 : écouissage isotrope moyen	V5 : écouissage 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 écouissage isotrope linéaire. Dans les effets dus aux transformations structurales, les phénomènes de plasticité de transformation et de restauration d'écouissage 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 écouissage isotrope non linéaire. Dans les effets dus aux transformations structurales, les phénomènes de plasticité de transformation et de restauration d'écouissage 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 écouissage isotrope en fonction de la déformation plastique cumulée.**

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

Titre : *Opérateur STAT_NON_LINE*
Auteur(s) : **P. BADEL**

Date : 13/01/04
Clé : U4.51.03-G1 Page : 28/64

/ '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.

/ '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.

/ '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.

Titre : Opérateur *STAT_NON_LINE*
Auteur(s) : P. BADEL

Date : 13/01/04
Clé : U4.51.03-G1 Page : 30/64

/ '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.

/ '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.

/ '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 Drücker Prager en traction et un critère de Drücker Prager en compression, découplés. Les deux critères peuvent avoir un écrouissage adoucissant. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous les mots clés `BETON_DOUBLE_DP` et `ELAS(_FO)` (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.

/ '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.

/ '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]

Titre : *Opérateur STAT_NON_LINE*
Auteur(s) : **P. BADEL**

Date : 13/01/04
Clé : U4.51.03-G1 Page : 34/64

/ '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]

/ 'UMLV_FP'

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

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

/ 'BAZANT_FD'

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

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

Nombre de variables internes : 1

Signification : V1 : valeur de l'hygrométrie

/ 'KIT_DDI'

Permet d'additionner deux termes de déformations anélastiques définis par certaines lois de comportement déjà existantes dans `COMP_INCR` (Cf. [R5.03.60] pour plus de détails). On peut assembler un modèle de fluage du béton `GRANGER_FP` ou `GRANGER_FP_V` avec soit `ELAS`, soit `BETON_DOUBLE_DP`, soit `VMIS_ISOT_TRAC`, soit `VMIS_ISOT_LINE`, soit `ROUSS_PR` ou soit `CHABOCHE`. Les deux modèles à associer sont à préciser dans `RELATION_KIT` [§3.3.2]. Les données nécessaires du champ matériau sont fournies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01], sous les mots clés `ELAS(_FO)` (**les deux lois doivent avoir le même module d'YOUNG**) et ceux correspondants aux deux modèles choisis.

Les variables internes de chaque loi sont cumulées dans le tableau des variables internes, et restituées loi par loi. Sous l'hypothèse que le fluage est un phénomène qui évolue plus lentement que la plasticité, on assimile la matrice tangente du modèle complet à celle de la plasticité. Ce choix nécessitera donc d'adapter les incréments du calcul aux temps caractéristiques des phénomènes modélisés afin de ne pas handicaper le calcul en terme de nombre d'itérations.

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

Exemple :

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

Dans ce cas, les paramètres de convergence locaux (`RESI_INTE_RELA` et `ITER_INTE_MAXI` sous le mot clé `CONVERGENCE`) sont les mêmes pour l'intégration des deux modèles.

3.3.1.9 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` (si le comportement mécanique n'est pas endommageable, i.e. si l'on n'utilise pas '`MAZARS`' ou '`ENDO_ISOT_BETON`') ou `HYDR_ENDO` (si on utilise '`MAZARS`' ou '`ENDO_ISOT_BETON`') sous `RELATION_KIT` (ce mot clé permet de renseigner la courbe de saturation et sa dérivée en fonction de la pression capillaire ainsi que la perméabilité relative et sa dérivée en fonction de la saturation)
- `THM_INIT` dans `DEFI_MATERIAU`.

Exemple :

```
COMP_INCR =_F(  
  RELATION      = 'KIT_THM',  
  RELATION_KIT = ( '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

/ **'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 déviatorique critique, V11 (V9 en 2D) : distance normalisée au seuil isotrope, V12 (V10 en 2D) : nombre d'itérations internes, V13 (V11 en 2D) : valeur du test local d'arrêt du processus itératif, V14 (V12 en 2D) : nombre de redécoupage local du pas de temps, V15 (V13 en 2D) : signe du produit contracté de la contrainte déviatorique par la déformation plastique déviatorique, V16 (V14 en 2D) : indicateur (0 si élastique, 1 si élastoplastique avec mécanisme 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.

Modélisation supportées : 3D, `D_PLAN`, `AXIS` et `THM`

Nombre de variables internes : 2

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

/ **'MAZARS'**

Relation de comportement élastique fragile. Elle permet de rendre compte de l'adoucissement du béton et distingue l'endommagement en traction et en compression. Une seule variable d'endommagement scalaire est utilisée (cf. [R7.01.08] pour plus de détails). Les caractéristiques du matériau sont définies dans l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01] sous les mots clés `MAZARS` et `ELAS(FO)`. En cas de chargement thermique, les coefficients matériaux dépendent de la température maximale atteinte au point de Gauss considéré. De plus la dilatation thermique supposée linéaire ne contribue pas à l'évolution de l'endommagement.

Titre : *Opérateur STAT_NON_LINE*
Auteur(s) : **P. BADEL**

Date : 13/01/04
Clé : U4.51.03-G1 Page : 38/64

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

Nombre de variables internes : 3

Signification : V1 : valeur de l'endommagement, V2 : indicateur d'endommagement (0 si non endommagé, 1 si endommagé), V3 : température maximale atteinte au point de Gauss considéré.

/ **'ENDO_ISOT_BETON'**

Relation de comportement élastique fragile. Il s'agit d'une modélisation locale à endommagement scalaire et à écrouissage isotrope linéaire négatif qui distingue le comportement en traction et en compression du béton (Cf. [R7.01.04] pour plus de détails). Les caractéristiques du matériau sont définies dans l'opérateur *DEFI_MATERIAU* [U4.43.01] sous les mots clés *BETON_ECRO_LINE*) et *ELAS*. En cas de chargement thermique, seule la déformation thermique est prise en compte, les coefficients matériaux étant supposés constants.

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

Nombre de variables internes : 2

Signification : V1 : valeur de l'endommagement, V2 : indicateur d'endommagement (0 pour régime élastique (endommagement nul), 1 si endommagé, 2 si rompu (endommagement égal à 1)).

3.3.2 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'
/ 'MAZARS'
/ 'ENDO_ISOT_BETON'

B - Comportement des gaz et liquides disponibles sous KIT_XXXX

/ 'GAZ'

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

/ 'LIQU_SATU'

Loi de comportement pour un 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.

Titre : Opérateur *STAT_NON_LINE*
Auteur(s) : **P. BADEL**

Date : 13/01/04
Clé : U4.51.03-G1 Page : 40/64

/ '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')
('MAZARS'	'GAZ'	'HYDR_ENDO')
('ENDO_ISOT_BETON'	'GAZ'	'HYDR_ENDO')
('ELAS'	'LIQU_SATU'	'HYDR_UTIL')
('CJS'	'LIQU_SATU'	'HYDR_UTIL')
('LAIGLE'	'LIQU_SATU'	'HYDR_UTIL')
('CAM_CLAY'	'LIQU_SATU'	'HYDR_UTIL')
('MAZARS'	'LIQU_SATU'	'HYDR_ENDO')
('ENDO_ISOT_BETON'	'LIQU_SATU'	'HYDR_ENDO')
('ELAS'	'LIQU_GAZ_ATM'	'HYDR_UTIL')
('CJS'	'LIQU_GAZ_ATM'	'HYDR_UTIL')
('LAIGLE'	'LIQU_GAZ_ATM'	'HYDR_UTIL')
('CAM_CLAY'	'LIQU_GAZ_ATM'	'HYDR_UTIL')
('MAZARS'	'LIQU_GAZ_ATM'	'HYDR_ENDO')
('ENDO_ISOT_BETON'	'LIQU_GAZ_ATM'	'HYDR_ENDO')

Pour relation KIT_THM :

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

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

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')
('CJS'	'LIQU_GAZ'	'THER_HOMO'	'HYDR_UTIL')
('LAIGLE'	'LIQU_GAZ'	'THER_HOMO'	'HYDR_UTIL')
('CAM_CLAY'	'LIQU_GAZ'	'THER_HOMO'	'HYDR_UTIL')
('MAZARS'	'LIQU_GAZ'	'THER_HOMO'	'HYDR_ENDO')
('ENDO_ISOT_BETON'	'LIQU_GAZ'	'THER_HOMO'	'HYDR_ENDO')
('ELAS'	'LIQU_VAPE_GAZ'	'THER_HOMO'	'HYDR_UTIL')
('CJS'	'LIQU_VAPE_GAZ'	'THER_HOMO'	'HYDR_UTIL')
('LAIGLE'	'LIQU_VAPE_GAZ'	'THER_HOMO'	'HYDR_UTIL')
('CAM_CLAY'	'LIQU_VAPE_GAZ'	'THER_HOMO'	'HYDR_UTIL')
('MAZARS'	'LIQU_VAPE_GAZ'	'THER_HOMO'	'HYDR_ENDO')
('ENDO_ISOT_BETON'	'LIQU_VAPE_GAZ'	'THER_HOMO'	'HYDR_ENDO')
('ELAS'	'LIQU_GAZ'	'THER_POLY'	'HYDR_UTIL')
('CJS'	'LIQU_GAZ'	'THER_POLY'	'HYDR_UTIL')
('LAIGLE'	'LIQU_GAZ'	'THER_POLY'	'HYDR_UTIL')
('CAM_CLAY'	'LIQU_GAZ'	'THER_POLY'	'HYDR_UTIL')
('MAZARS'	'LIQU_GAZ'	'THER_POLY'	'HYDR_ENDO')
('ENDO_ISOT_BETON'	'LIQU_GAZ'	'THER_POLY'	'HYDR_ENDO')
('ELAS'	'LIQU_VAPE_GAZ'	'THER_POLY'	'HYDR_UTIL')
('CJS'	'LIQU_VAPE_GAZ'	'THER_POLY'	'HYDR_UTIL')
('LAIGLE'	'LIQU_VAPE_GAZ'	'THER_POLY'	'HYDR_UTIL')
('CAM_CLAY'	'LIQU_VAPE_GAZ'	'THER_POLY'	'HYDR_UTIL')
('MAZARS'	'LIQU_VAPE_GAZ'	'THER_POLY'	'HYDR_ENDO')
('ENDO_ISOT_BETON'	'LIQU_VAPE_GAZ'	'THER_POLY'	'HYDR_ENDO')

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

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

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

Attention :

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

Remarque :

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

/ 'SIMO_MIEHE'

Toute l'information sur le gradient de la transformation F est prise en compte, aussi bien la rotation que les déformations :

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

Cela permet de réaliser des calculs en grandes déformations plastiques, avec les relations de comportement 'ELAS', 'VMIS_ISOT_LINE', 'VMIS_ISOT_TRAC', 'ROUSSELIER' et tous les comportements, à écrouissage isotrope uniquement, associés à un matériau subissant des changements de phases métallurgiques (relations META_X_IL_XXX_XXX et META_X_INL_XXX_XXX,), (Cf. [§3.3.1.7]).

Attention :

Cette option n'est valable que pour les modélisations 3D, D_PLAN, AXIS, 3D_INCO, AXIS_INCO et PLAN_INCO (pas de contrainte plane avec la méthode DEBORST).

Pour de plus amples informations sur la formulation des grandes déformations plastiques selon SIMO et MIEHE, on pourra se reporter à [R5.03.21].

/ 'GREEN'

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

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

/ 'GREEN_GR'

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

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

Attention :

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

3.3.4 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, toujours mettre 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^{er} STAT_NON_LINE : effectue le calcul pour les instants 1, 2, 3 et 4s.

2nd 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)),
```

Titre : *Opérateur STAT_NON_LINE*
 Auteur(s) : **P. BADEL**

Date : 13/01/04
 Clé : U4.51.03-G1 Page : 48/64

```
U = STAT_NON_LINE ( reuse=U
                    INCREMENT =_F(LIST_INST =LIST2),
                    ETAT_INIT =_F(EVOL_NOLI =U,
                    INST_ETAT_INIT = 20.)) ,
```

1^{er} STAT_NON_LINE : effectue le calcul des instants 1 à 10s.

2nd STAT_NON_LINE : effectue le calcul des instants 21 à 30s, l'état initial correspondant à l'instant t=10s du 1^{er} STAT_NON_LINE (par défaut INST=10.). Cet état initial correspond pour ce 2nd 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^{er} STAT_NON_LINE : effectue le calcul des instants 1 à 10s.

2nd STAT_NON_LINE : effectue le calcul des instants 1 à 10s, l'état initial correspondant à l'instant t=10s du 1^{er} STAT_NON_LINE (par défaut INST=10.). Cet état initial correspond pour ce 2nd 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'indiquer 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^{er} STAT_NON_LINE : effectue le calcul pour les instants 1, 2, 3 et 4s.

2nd 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^{er} STAT_NON_LINE : effectue le calcul des instants 1 à 4s.

2nd 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 : θ
- 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
 - Initialisation : $\tau_f = \tau_0$
 - 1^{er} Test :
Si $T(\tau_j) - T(\tau_f) > \text{valeur}$ avec $T(t)$ la température au temps t et τ_f le dernier instant inséré dans la nouvelle liste T_f , alors on garde dans la nouvelle liste T_f , l'instant τ_{j-1}
 - 2^{ème} Test :
Si $T(\tau_j) - T(\tau_{j-1}) > \text{valeur}$ 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^{er} Test = 2^{ème} Test : $T(\tau_2) - T(\tau_1) = 10^\circ\text{C} < 15$ donc on $T_f = [\tau_1]$

Intervalle 2 :

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

Intervalle 3 :

1^{er} Test = 2^{ème} 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.

3.9.2 Opérande PAS_MINI_CRIT / ITER_LINE_CRIT

◇ PAS_MINI_CRIT = / 0. [DEFAULT]
/ pmicri [R]
◇ ITER_LINE_CRIT = / 20 [DEFAULT]
/ itelic [I]

Lors de pas de temps où la convergence est délicate, on peut vouloir augmenter le nombre maximum d'itérations de recherche linéaire. C'est ce que permettent les mots-clés PAS_MINI_CRIT et ITER_LINE_CRIT. Quand le pas de temps (directement fixé par l'utilisateur ou conséquence de découpages de pas de temps) devient inférieur à la valeur pmicri, le nombre d'itérations de recherche de recherche linéaire passe de itelin (renseigné par ITER_LINE_MAXI) à itelic (renseigné par ITER_LINE_MAXI)

3.9.3 Opérandes RHO_MIN / RHO_MAX / RHO_EXCL

◇ RHO_MIN = / 1.E-2 [DEFAULT]
/ rmin [R]
◇ RHO_MAX = / 1.E+1 [DEFAULT]
/ rmax [R]
◇ RHO_EXCL = / 9.E-3 [DEFAULT]
/ rexc [R]

Ces mots-clés fixent l'intervalle I de la recherche linéaire, sous la forme :
 $I = [r_{\min}, r_{\max}] - [-rexc, rexc]$.

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 Lemaitre en 1D). Il peut prendre les valeurs 0.5 ou 1.

3.11 Mot clé PILOTAGE

◇ PILOTAGE :

Lorsque l'intensité η 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_PIL0`), 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_PIL0`, 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 n_0 (ou d'un groupe de nœuds ne comportant qu'un seul nœud). À chaque incrément de temps, on cherche l'amplitude η 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 η 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_PIL0', 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 :

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

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 $f_{\text{préd-élas}}$ d'une quantité $\Delta T/C_{mult}$. On vérifie la relation :

$$C_{mult} \max_{\text{point de Gauss}} (f_{\text{préd-élas}}) = \Delta t$$

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 ε^- 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 ε^- . 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 ε^- 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.

Remarque :

| *DEFORMATION et PRED_ELAS ne sont pas disponibles pour les éléments de structures.*

3.11.2 Opérandes 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 Opérandes 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 ($P=\eta$ *valeur de référence P_x) sur le groupe de maille A. Pour trouver la charge limite P_{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 $cmult=1/0.2=5$.)

```
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_PIL0' ) ,  
PILOTAGE =_F( TYPE = 'DDL_IMPO' ,  
NOEUD = NO1 ,  
NOM_CMP = 'DX' ,  
COEF_MULT = 5. ) ) ,
```


Dans le fichier.resu, la valeur de η sera affichée à chaque instant du calcul. Pour connaître la charge limite, il suffit de faire $P_{\text{limite}} = \eta * P_x$. (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_PILLO_R_MAX / ETA_PILLO_R_MIN

```

◇   ETA_PILO_R_MAX    =  etarmax,                [R]
◇   ETA_PILO_R_MIN    =  etarmin,                [R]

```

Ces deux mots-clés permettent de préciser l'intervalle de valeurs de pilotage attendues. Le principe de fonctionnement est le suivant : à chaque itération de Newton, si l'on trouve des valeurs de pilotage dans l'intervalle $[etar\ min, etar\ max]$, toutes les valeurs de pilotage en dehors de cet intervalle ne sont pas considérées. En revanche, si aucune valeur de pilotage n'est trouvée dans cette intervalle, toutes les valeurs de pilotage sont conservées.

Si on ne précise pas de valeurs, c'est $-\infty$ pour et_{\min} et $+\infty$ pour et_{\max} .

Une utilisation possible de cet intervalle est le suivant. on désire par exemple, piloter une pression à quelque part sur la structure et on s'attend à garder cette pression positive. En fixant ϵ_{tarmin} à 0, cela permet de ne conserver que les valeurs de pilotage positives, si on trouve au moins une valeur de pilotage positive lors de la résolution du pilotage.

3.11.7 Opérande ETA_PILO_MAX / ETA_PILO_MIN

◇ ETA_PILO_MAX : etamax

Arrêt du calcul lorsque le paramètre de pilotage atteint la valeur donnée et_{max} .

◇ 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.

3.11.8 Opérande PROJ_BORNES

◇ PROJ_BORNES = / 'OUI' [DEFAULT]
/ 'NON'

En cas de dépassement de l'intervalle ($etamin$, $etamax$), l'utilisateur peut indiquer s'il veut projeter la valeur de pilotage sur ($etamin$, $etamax$).

Avec PROJ_BORNE='OUI', la projection sera effectuée (si $\text{eta} > \text{etamax} \rightarrow \text{eta} = \text{etamax}$; si $\text{eta} < \text{etamin} \rightarrow \text{eta} = \text{etamin}$), ce qui permet, en cas de convergence d'arrêter le calcul précisément sur `etamin` ou `etamax`.

Avec PROJ_BORNE= 'NON', on ne fait rien, donc le calcul s'arrêtera, en cas de convergence, avec une valeur supérieure à $etamax$ ou inférieure à $etamin$.

3.11.9 Opérande SELECTION

◇ / SELECTION = / 'NORM_INCR_DEPL', [DEFAULT]
/ 'ANGL_INCR_DEPL',
/ 'RESIDU',

Cet opérande permet de sélectionner la méthode permettant de choisir la valeur de pilotage dans le cas où plusieurs solutions sont fournies par la résolution de pilotage.

'NORM_INCR_DEPL' permet de sélectionner la valeur de pilotage par la plus petite norme de l'incrément de déplacement sur le pas de temps considéré.

'ANGL_INCR_DEPL' permet de sélectionner la valeur de pilotage par le plus petit angle entre le déplacement obtenu pour le pas de temps courant et le déplacement obtenu pour le pas de temps précédent.

'RESIDU' permet de sélectionner la valeur de pilotage conduisant au plus petit résidu.

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 \mathbf{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 \mathbf{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 RESI_REFE_REL

```
| RESI_REFE_REL = resref, [R]
| SIGM_REFE = sigref, [R]
```

Cet opérande conduit à estimer la convergence de l'algorithme de Newton de la manière suivante (Cf. RX.XXX pour plus de détails). A partir de la contrainte de référence *sigref*, on calcule une référence de résidu *Fref* (un vecteur de même longueur que le vecteur résidu). La convergence sera réalisée si et seulement si :

$$\forall i \in [1, \dots, nb_ddl] \quad |F_i^n| < resref \ F_i^{ref}$$

3.13.3 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.

3.13.4 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*.

3.13.5 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.

3.13.6 Opérandes RESI_INTE_REL / ITER_INTE_MAXI

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

Dans la plupart des relations de comportement, une équation non linéaire ou un système non linéaire doivent être résolus localement (en chaque point de GAUSS). Ces opérandes (résidu et nombre maximum d'itérations dites internes) sont utilisés pour tester la convergence de cet algorithme itératif de résolution. Pour plus de détails, se reporter à la documentation de référence, par exemple au document [R5.03.02]. 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*.

3.13.7 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.

3.13.8 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 CRIT_FLAMB

◇ CRIT_FLAMB = _F (

◇ NB_FREQ = / 3, [DEFAULT]
/ nbfreq, [I]

◇ CHAR_CRIT = / (-10,10), [DEFAULT]
/ intcc,

),

Ce mot-clé permet de déclencher le calcul, à la fin de chaque incrément de temps, d'un critère de stabilité.

Ce critère est utile pour déceler, au cours du chargement, le point à partir duquel on perd la stabilité (par flambage par exemple).

Ce critère est calculé de la façon suivante : à la fin d'un pas de temps, en petites perturbations, on résout $\det(K^T - \lambda K^g) = 0$. K^T est la matrice tangente cohérente à cet instant. K^g est la matrice de rigidité géométrique, calculée à partir du champ de contraintes à cet instant.

En pratique, le chargement est instable si $|\lambda| < 1$ (en fait $-1 < \lambda < 0$). On calcule les valeurs propres par la méthode de Sorensen (cd MODE_ITER_SIMULT). Ceci peut être assez coûteux pour les problèmes de grande taille.

Le mot-clé CHAR_CRIT permet de gagner du temps en ne faisant qu'un test de Sturm dans la bande de fréquence fournie. Si on trouve au moins une fréquence, alors on calcule réellement les valeurs des charges critiques dans cet intervalle.

Pour les grands déplacements et les grandes déformations GREEN(_GR) ou SIMO_MIEHE, on résout $\det(K^T - \lambda Id) = 0$ car K^T contient alors K^g (et éventuellement K^p).

Le critère est alors un critère d'instabilité : quand λ change de signe (donc passe par 0) le chargement est instable.

Le mot-clé `NB_FREQ` (3 par défaut) désigne le nombre de charges critiques à calculer. En fait seule la première suffit mais il peut y avoir des modes multiples

On stocke le mode propre correspondant à la plus petite charge critique (en valeur absolue) dans la *S.D. RESULTAT*, sous le nom `MODE_FLAMB`. Ce mode propre peut être extrait et visualisé (comme un champ de déplacements ou un mode propre classique). Il est normalisé à 1 sur la plus grande composante de déplacement.

3.15 Mot-clé SENSIBILITE

La syntaxe de ce mot clé commun à plusieurs commandes est décrite dans le document [U4.50.02].

3.16 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.

3.16.1 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

3.16.2 Opérande PRECISION

◇ `PRECISION = prec`
Cf. [U4.71.00]

3.16.3 Opérande ARCH_ETAT_INIT / NUME_INIT / DETR_NUME_SUIV

◇ / `'ARCH_ETAT_INIT' = 'NON' [DEFAULT]`
`'OUI'`

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^{er} 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).

Le résultat de l'archivage pour le 1er 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.

3.16.4 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.

3.17 Opérande OBSERVATION

La syntaxe de ce mot clé commun à la commande *DYNA_NON_LINE* est décrite dans le document [U4.53.01].

3.18 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.

3.19 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.

3.20 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.

inf = 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.

3.21 Opérande TITRE

◇ **TITRE : tx**

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