Opérateur CALC_FATIGUE

1 But

Calculer un champ de dommage de fatigue subi par une structure ; un plan critique dans lequel le cisaillement est maximal ; ou une amplitude maximale de vibration admissible.

Calcul d'un champ de dommage : à partir d'une histoire de contraintes équivalentes (contraintes de von Mises signées) ou de déformations équivalentes (invariant du second ordre signé) calculée aux nœuds ou aux points de Gauss, on calcule un champ de grandeur qui contient le dommage subi par la structure en chaque nœud ou en chaque point de Gauss. Les cycles élémentaires de chargement sont extraits par une méthode de comptage de cycles (méthode RAINFLOW) ; le dommage total subi par la structure est la somme des dommages associés aux cycles élémentaires.

Critère d'amorçage: pour calculer l'endommagement, il est indispensable de disposer d'un critère d'amorçage. Les critères d'amorçage sont fournis par le mot-clé (comme critère de Dang-Van...). Il est aussi possible pour l'utilisateur de construire un critère en formule des grandeurs pré-définis.

Plan critique et cisaillement maximal : à partir d'une histoire de contraintes calculée aux points de Gauss ou aux nœuds, dans le cas où le chargement est périodique, nous calculons un champ de grandeur qui contient entre autres : la demi amplitude de cisaillement maximal, le vecteur normal associé, le nombre de cycles à la rupture et l'endommagement correspondant aux points de Gauss ou aux nœuds. Si le chargement est non périodique le champ de grandeurs contient l'endommagement maximal et le vecteur normal associé aux points de Gauss ou aux nœuds.

Amplitude maximale de vibration admissible : cette option vise à estimer l'amplitude maximale de vibration admissible d'une structure soumise à un chargement statique (connu) et à un chargement dynamique (inconnu). A partir de la contrainte statique et des contraintes modales des modes propres considérés, calculées aux points de Gauss ou aux nœuds, l'amplitude de vibration maximale est calculée en utilisant un critère de fatigue uni-axial.

Produit un concept de type cham_elem ou cham_no.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2 Syntaxe

```
CHAM [cham_elem*] = CALC_FATIGUE (

♦ TYPE_CALCUL  =  /  'CUMUL_DOMMAGE',
                  /  'FATIGUE_MULTI',
                  /  'FATIGUE_VIBR',

# Si TYPE_CALCUL = 'CUMUL_DOMMAGE' -> calcul du dommage

   #  Choix de l'option de calcul

♦ OPTION    =  /  'DOMA_ELNO_SIGM' ,
               /  'DOMA_ELGA_SIGM' ,
               /  'DOMA_ELNO_EPSI' ,
               /  'DOMA_ELGA_EPSI' ,
               /  'DOMA_ELNO_EPME' ,
               /  'DOMA_ELGA_EPME' ,

   #  Lecture de l'histoire de contrainte ou de déformation

♦ HISTOIRE = _F (

   ♦ RESULTAT  =  res,                          / [evol_elas]
                                                / [evol_noli]
                                                / [dyna_trans]

   ♦ EQUI_GD   =  /  'VMIS_SG',                   [DEFAUT]
                  /  'INVA_2_SG',

            )

   #  Calcul du dommage

♦ DOMMAGE   =  /  'WOHLER',
               /  'MANSON_COFFIN',
               /  'TAHERI_MANSON',
               /  'TAHERI_MIXTE' ,

♦ MATER     =  mater,                           [mater]

◊ TAHERI_NAPPE =  nappe,                     /  [nappe]
                                             /  [formule]

◊ TAHERI_FONC  =  fonc,                      /  [fonction]
                                             /  [formule]

            ),

# Finsi

# Si TYPE_CALCUL = 'FATIGUE_MULTI'-> Calcul du cisaillement maximal ou du
                                     dommage maximal

♦ TYPE_CHARGE  =  /  'PERIODIQUE',
                  /  'NON_PERIODIQUE',

♦ OPTION    =  /  'DOMA_ELGA',
               /  'DOMA_NOEUD',

♦ RESULTAT     =  res,                       /  [evol_elas]
                                             /  [evol_noli]

◊ CHAM_MATER   =  cham_mater,                   [cham_mater]

# Si TYPE_CHARGE = 'PERIODIQUE'

♦ CRITERE      =  /  'MATAKE_MODI_AC',
                  /  'DANG_VAN_MODI_AC',
                  /  'FORMULE_CRITERE',
                  /  'VMIS_TRESCA',
```


Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

```
      # Si CRITERE != 'VMIS_TRESCA'
      ♦  METHODE      =  /  'CERCLE_EXACT',
      # Finsi
      # Si CRITERE = 'FORMULE_CRITERE'
      ♦  FORMULE_GRDEQ   =  for_grd,                    /  [formule]
      ♦  COURBE_GRD_VIE  =  /  'WOHLER',
                            /  'MANSON_C',
                             /  'FORM_VIE'
         # Si COURBE_GRD_VIE = 'FORM_VIE'
         ♦  FORMULE_VIE = for_vie,                      /  [formule]
                                                        /  [fonction]
         # Finsi
      # Finsi
       ◊  INST_INIT_CYCL =    / inst_ini_cyc           [R]
       ◊  INST_CRIT  = / 'RELATIF'
                      / 'ABSOLU'
       # Si INST_CRIT = 'RELATIF'
          ◊ PRECISION = / prec                       [R]
                        /  1.E-6 ,                        [DEFAUT]
       #Finsi
       # Si INST_CRIT = 'ABSOLU'
          ♦ PRECISION = / prec                       [R]
       #Finsi
   # Finsi

   # Si TYPE_CHARGE = 'NON_PERIODIQUE'
   ♦  CRITERE      =  /  'MATAKE_MODI_AV',
                      /  'DANG_VAN_MODI_AV',
                      /  'FATESOCI_MODI_AV',
                      /  'FORMULE_CRITERE',
                      /  'VMIS_TRESCA',
      # Si Si CRITERE = 'MATAKE_MODI_AC' or CRITERE = 'DANG_VAN_MODI_AC'
      ♦  PROJECTION   =  /  'UN_AXE',
                         /  'DEUX_AXES',
      ◊  DELTA_OSCI   =  /  delta,                   [R]
                         /  0.,                      [DEFAUT]
      # Finsi
      # Si CRITERE = 'FORMULE_CRITERE'
      ♦  FORMULE_GRDEQ   =  for_grd,                    /  [formule]
      ♦  COURBE_GRD_VIE  =  /  'WOHLER',
                            /  'MANSON_C',
                            /  'FORM_VIE'
         # Si COURBE_GRD_VIE = 'FORM_VIE'
         ♦  FORMULE_VIE = for_vie,                      /  [formule]
                                                        /  [fonction]
         # Finsi
      # Finsi
   # Finsi
   /  ◊  GROUP_MA     =  grma,                           [l_gr_maille]
   /  ◊  MAILLE       =  ma,                             [l_maille]
   /  ◊  GROUP_NO     =  grno,                           [l_gr_noeud]
   /  ◊  NOEUD        =  no,                             [l_noeud]
```


Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

```
      ◊  COEF_PREECROU=  /  coef_pre,                    [R]
                         /  1.0,                         [DEFAUT]

   # Si ( GROUP_MA != None or MAILLE != None or \
         GROUP_NO != None or NOEUD != None )

   ♦  MAILLAGE     =  maillage,                          [maillage]

   # Finsi

# Finsi


# Si TYPE_CALCUL = 'FATIGUE_VIBR' -> calcul de l'amplitude maximale
admissible pour une structure soumise à un chargement vibratoire

      #  Choix de l'option de calcul

   ♦  OPTION    =  /  'DOMA_ELNO_SIGM' ,
                   /  'DOMA_ELGA_SIGM' ,

      #  Lecture de l'histoire de contrainte

   ♦  HISTOIRE = _F(

         ♦  RESULTAT  =  res,                          / [evol_elas]
                                                       / [evol_noli]
         ♦  MODE_MECA =  mode,                           [mode_meca]
         ♦  NUME_MODE    =  I,                           [LISTE_I]
         ♦  FACT_PARTICI =  R,                           [LISTE_R]
                  )

      #  Calcul du dommage

   ♦  DOMMAGE   =  /  'WOHLER',

   ♦  MATER     =  mater,                                [mater]



                  ),

# Finsi

      #  Niveau d'impression

   ◊  INFO      =     /  1,                          [DEFAUT]
                      /  2,
                                 )
```


Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Table des Matières

1 But....1
2 Syntaxe....2
3 Opérandes....7
3.1 Mot clé TYPE_CALCUL....7
3.2 Opérandes communs à toutes les options....7
3.2.1 Opérande MATER....7
3.2.2 Opérande INFO....7
3.3 Opérandes spécifiques au calcul de type CUMUL_DOMMAGE....7
3.3.1 Mot clé facteur HISTOIRE....7
3.3.1.1 Opérande RESULTAT....8
3.3.1.2 Opérande EQUI_GD....8
3.3.2 Opérande OPTION....8
3.3.3 Opérande DOMMAGE....9
3.3.4 Opérande TAHERI_NAPPE....11
3.3.5 Opérande TAHERI_FONC....12
3.4 Opérandes spécifiques au calcul de type FATIGUE_MULTI....12
3.4.1 Opérande TYPE_CHARGE....12
3.4.2 Opérande OPTION....12
3.4.3 Opérande RESULTAT....12
3.4.4 Opérande CHAM_MATER....12
3.4.5 Opérande CRITERE....12
3.4.6 Opérande FORMULE_GRDEQ....17
3.4.7 Opérande COURBE_GRD_VIE....18
3.4.8 Opérande FORMULE_VIE....19
3.4.9 Opérande METHODE....19
3.4.10 Opérande INST_INIT_CYCL....19
3.4.11 Opérande INST_CRIT....19
3.4.12 Opérande PRECISION....19
3.4.13 Opérande PROJECTION....19
3.4.14 Opérande DELTA_OSCI....19
3.4.15 Opérandes GROUP_MA / MAILLE / GROUP_NO / NOEUD....20
3.4.16 Opérande COEF_PREECROU....20
3.4.17 Opérande MAILLAGE....20
3.5 Opérandes spécifiques au calcul de type FATIGUE_VIBR....20
20
3.5.1 Principe du calcul....20
3.5.2 Mot clé facteur HISTOIRE....21
3.5.2.1 Opérande RESULTAT....21
3.5.2.2 Opérande MODE_MECA....22

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3.5.2.3 Opérande NUME_MODE....22
3.5.2.4 Opérande FACT_PARTICI....22
3.5.3 Opérande OPTION....22
3.5.4 Opérande CORR_SIGM_MOYENNE....22
3.5.5 Opérande DOMMAGE....23
4 Grandeur et composantes introduites dans Code_Aster....24
5 Exemples....24
5.1 Calcul de la demi amplitude de cisaillement maximal par la méthode : 'CERCLE_EXACT'....25
5.2 Calcul du dommage lorsque le chargement est non périodique....25
5.3 Calcul du dommage avec le critère FATESOCI_MODI_AV....25
5.4 Calcul du dommage avec les critères en formule....25

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3 Opérandes

3.1 Mot clé TYPE_CALCUL

Ce mot clé permet de calculer
- soit un champ de dommage de fatigue subi par une structure, si TYPE_CALCUL = 'CUMUL_DOMMAGE' ;
- soit le plan critique dans lequel le cisaillement est maximal, si TYPE_CALCUL = 'FATIGUE_MULTI' ;
- soit l'amplitude de vibration maximale admissible par une structure soumise à un chargement vibratoire, si TYPE_CALCUL = 'FATIGUE_VIBR' .

Dans les deux premiers cas, on connait le chargement de la structure (évolution temporelle des contraintes ou des déformations) et on s'intéresse au dommage ou au plan critique associé.

Dans le dernier cas, on connait le chargement statique de la structure (typiquement les efforts centrifuges pour une ailette de turbine) mais pas le chargement dynamique (typiquement la vibration de l'ailette). L'option 'FATIGUE_VIBR' permet alors d'estimer l'amplitude de vibration maximale admissible par la structure pour avoir une endurance illimitée. Le principe du calcul est décrit dans le §20.

3.2 Opérandes communs à toutes les options

3.2.1 Opérande MATER

◊ MATER = mater

Permet de spécifier le nom du matériau mater créé par DEFI_MATERIAU [U4.43.01].

Le matériau mater doit contenir la définition de la courbe de Wöhler du matériau pour le calcul du dommage par les méthodes 'WOHLER' et 'TAHERI_MIXTE' et la définition de la courbe de Manson-Coffin du matériau pour le calcul du dommage par les méthodes 'MANSON_COFFIN', 'TAHERI_MANSON' et 'TAHERI_MIXTE'.

Pour les calculs de type 'FATIGUE_VIBR', le matériau doit en plus contenir la contrainte à la rupture (opérateur DEFI_MATERIAU, mot clé facteur RCCM, opérande SU).

3.2.2 Opérande INFO

◊ INFO = / 1 Aucune impression.
/ 2

Impression des paramètres du calcul du dommage (nombre des numéros d'ordre, nombre des points de calcul, type du calcul du dommage (contraintes, déformations), localisation du dommage (nœuds ou points de Gauss), type de la composante équivalente (VMIS_SG ou INVA_2SG), méthode d'extraction des cycles (RAINFLOW) et méthode de calcul du dommage (WOHLER ou MANSON_COFFIN ou TAHERI_MANSON ou TAHERI_MIXTE).

- point par point de l'histoire de chargement, des cycles extraits et de la valeur du dommage.
- du champ de dommage.

Les impressions sont faites dans le fichier MESSAGE.

3.3 Opérandes spécifiques au calcul de type CUMUL_DOMMAGE

3.3.1 Mot clé facteur HISTOIRE

Ce mot clé facteur regroupe toute la phase de définition de l'histoire de chargement.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

L'histoire de chargement est l'évolution d'une valeur de la contrainte ou de la déformation au cours du temps.

3.3.1.1 Opérande RESULTAT

♦ RESULTAT = res

Nom du concept résultat contenant les champs de contraintes ou les champs de déformation définissant l'histoire de chargement. Plus précisément, le concept résultat doit contenir l'un des champs de nom symbolique SIEQ_ELNO, SIEQ_ELGA, EPEQ_ELNO, EPEQ_ELGA, EPMQ_ELNO ou EPMQ_ELGA selon l'option de calcul désirée.

3.3.1.2 Opérande EQUI_GD

♦ EQUI_GD = / 'VMIS_SG',
/ 'INVA_2_SG'

Pour pouvoir calculer le dommage subi par une structure, par une méthode de Wöhler, de Manson-Coffin ou une méthode de Taheri, il faut disposer d'une histoire de chargement en contraintes ou en déformations "uniaxiale". Pour ce faire il faut transformer le tenseur de contraintes ou le tenseur de déformations en un champ uniaxial (scalaire) "équivalent".

'VMIS_SG' pour calculer le dommage à partir d'une histoire de chargement de type contrainte de von Mises signée,

'INVA_2_SG' pour calculer le dommage à partir d'une histoire de chargement de type invariant d'ordre 2 signé de la déformation.

3.3.2 Opérande OPTION

Ce mot clé facteur permet de spécifier le type de dommage à calculer :

- 'DOMA_ELNO_SIGM' pour le calcul du dommage aux nœuds à partir d'un champ de contraintes.
- La structure de données résultat spécifiée sous le mot clé facteur RESULTAT doit contenir le champ de nom symbolique SIEQ_ELNO (calculable par CALC_CHAMP), qui définit entre autre la valeur de la contrainte équivalente de von Mises signée (composante VMIS_SG) calculée aux nœuds.
- 'DOMA_ELGA_SIGM' pour le calcul du dommage aux points de Gauss à partir d'un champ de contraintes.
- La structure de données résultat spécifiée sous le mot clé facteur RESULTAT doit contenir le champ de nom symbolique SIEQ_ELGA (calculable par CALC_CHAMP), qui définit entre autre la valeur de la contrainte équivalente de von Mises signée (composante VMIS_SG) calculée aux points de Gauss.
- 'DOMA_ELNO_EPSI' pour le calcul du dommage aux nœuds à partir d'un champ de déformations.
- La structure de données résultat spécifiée sous le mot clé facteur RESULTAT doit contenir le champ de nom symbolique EPEQ_ELNO, qui définit entre autre la valeur de l'invariant d'ordre 2 signé (composante INVA_2SG) calculée aux nœuds.
- 'DOMA_ELGA_EPSI' pour le calcul du dommage aux points de Gauss à partir d'un champ de déformations.
- La structure de données résultat spécifiée sous le mot clé facteur RESULTAT doit contenir le champ de nom symbolique EPEQ_ELGA, qui définit entre autre la valeur de l'invariant d'ordre 2 signé (composante INVA_2SG) calculée aux points de Gauss.
- 'DOMA_ELNO_EPME' pour le calcul du dommage aux nœuds à partir d'un champ de déformations mécaniques, hors-thermique : $\varepsilon = B \cdot u - \varepsilon_{th}$.
- La structure de données résultat spécifiée sous le mot clé facteur RESULTAT doit contenir le champ de nom symbolique EPMQ_ELNO (calculable par CALC_CHAMP), qui définit entre autre la valeur de l'invariant d'ordre 2 signé (composante INVA_2SG) calculée aux nœuds.
- 'DOMA_ELGA_EPME' pour le calcul du dommage aux points de Gauss à partir d'un champ de déformations mécaniques, hors-thermique : $\varepsilon = B \cdot u - \varepsilon_{th}$.
- La structure de données résultat spécifiée sous le mot clé facteur RESULTAT doit contenir le champ de nom symbolique EPMQ_ELGA, qui définit entre autre la valeur de l'invariant d'ordre 2 signé (composante INVA_2SG) calculée aux points de Gauss.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3.3.3 Opérande DOMMAGE

Pour pouvoir calculer le dommage subi par une structure, il faut préalablement extraire les cycles élémentaires de l'histoire de chargement.

Pour cela de nombreuses méthodes sont disponibles. La méthode disponible dans *Code_Aster* pour le calcul du dommage par la méthode Wöhler ou Manson-Coffin, est la méthode de comptage des étendues en cascade ou méthode de Rainflow [R7.04.01].

Pour le calcul du dommage par les méthodes TAHERI_MANSON et TAHERI_MIXTE, on utilise la méthode de comptage dite naturelle qui consiste à générer des cycles dans l'ordre de leur application.

Une fois les cycles élémentaires extraits, cet opérande permet de spécifier la méthode de calcul du dommage pour chaque cycle élémentaire.

♦ DOMMAGE = / 'WOHLER'

Pour une histoire de chargement de type contraintes, le nombre de cycles à la rupture est déterminé par interpolation de la courbe de Wöhler du matériau pour un niveau de contrainte alternée donnée (à chaque cycle élémentaire correspond un niveau d'amplitude de contrainte $\Delta\sigma=\left|\sigma_{max}-\sigma_{min}\right|$ et une contrainte alternée $S_{alt}=1/2\,\Delta\sigma$).
On ne peut utiliser la méthode WOHLER que pour les options 'DOMA_ELNO_SIGM' ou 'DOMA_ELGA_SIGM'. De plus, il faut que le concept resultat spécifié contienne respectivement le champ de nom symbolique SIEQ_ELNO ou SIEQ_ELGA (calculables par CALC_CHAMP).

La courbe de Wöhler du matériau doit être introduite dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01], sous une des trois formes possibles [R7.04.02] :

- fonction discrétisée point par point (mot clé FATIGUE, opérande WOHLER),
- forme analytique de Basquin (mot clé FATIGUE, opérandes A_BASQUIN et BETA_BASQUIN),
- forme "zone courante" (mot clé FATIGUE, opérandes E_REFE, A0, A1, A2, A3 et SL et mot clé ELAS opérande E).

Remarque sur les courbes de fatigue :

Pour les petites amplitudes, le problème du prolongement de la courbe de fatigue peut se poser : par exemple, pour les courbes de fatigue du RCC-M au-delà de 10^6 cycles, la contrainte correspondante 180 MPa est considérée comme limite d'endurance, c'est-à-dire que toute contrainte inférieure à 180 MPa doit produire un facteur d'usage nul, ou un nombre de cycles admissible infini.

Dans Code_Aster, la limite d'endurance est fixée à 10 milions de cylces.
La méthode adoptée ici correspond à cette notion de limite d'endurance : si l'amplitude de contrainte est inférieure à la première abscisse de la courbe de fatigue, alors on prend un facteur d'usage nul c'est-à-dire un nombre de cycle admissible infini.

♦ DOMMAGE = / 'MANSON_COFFIN'

Pour une histoire de chargement de type déformations, le nombre de cycles à la rupture est déterminé par interpolation de la courbe de Manson-Coffin du matériau pour un niveau de déformation alternée donné (à chaque cycle élémentaire correspond un niveau d'amplitude de déformation $\Delta\varepsilon=\left|\varepsilon_{max}-\varepsilon_{min}\right|$ et une déformation alternée $E_{alt}=1/2\,\Delta\varepsilon$).

On ne peut utiliser la méthode MANSON_COFFIN que pour les options 'DOMA_ELNO_EPSI' ou 'DOMA_ELGA_EPSI', 'DOMA_ELNO_EPME' ou 'DOMA_ELGA_EPME'. De plus, il faut que le concept resultat spécifié contienne respectivement le champ de nom symbolique EPEQ_ELNO, EPEQ_ELGA, EPMQ_ELNO ou EPMQ_ELGA (calculables par CALC_CHAMP).

La courbe de Manson-Coffin doit être introduite dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01] (mot clé FATIGUE, opérande MANSON_COFFIN).

♦ DOMMAGE = / 'TAHERI_MANSON'

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Cette méthode de calcul du dommage ne s'applique qu'à des chargements de type déformation, c'est-à-dire pour les options 'DOMA_ELNO_EPSI', 'DOMA_ELGA_EPSI', 'DOMA_ELNO_EPME' ou 'DOMA_ELGA_EPME'. De plus, il faut que le concept résultat spécifié contienne respectivement le champ de nom symbolique EPEQ_ELNO, EPEQ_ELGA, EPMQ_ELNO ou EPMQ_ELGA (calculables par CALC_CHAMP).

Soient n cycles élémentaires de demi amplitude $\frac{\Delta\varepsilon_1}{2},\ldots,\frac{\Delta\varepsilon_n}{2}$.

Le calcul du dommage élémentaire du premier cycle est déterminé par interpolation sur la courbe de Manson-Coffin du matériau.
Le calcul du dommage élémentaire des cycles suivants est déterminé par l'algorithme décrit ci-dessous :

- Si $\frac{\Delta\varepsilon_{i+1}}{2}\geq\frac{\Delta\varepsilon_i}{2}$

  le calcul du dommage élémentaire du cycle $(i+1)$ est déterminé par interpolation sur la courbe de Manson-Coffin.

- Si $\frac{\Delta\varepsilon_{i+1}}{2}<\frac{\Delta\varepsilon_i}{2}$

  on détermine :

$$\frac{\Delta\sigma_{i+1}}{2}=F_{NAPPE}\left(\frac{\Delta\varepsilon_{i+1}}{2},\max_{j<i}\left(\frac{\Delta\varepsilon_j}{2}\right)\right)$$
$$\frac{\Delta\varepsilon^*_{i+1}}{2}=F_{FONC}\left(\frac{\Delta\sigma_{i+1}}{2}\right)$$

  où F_{NAPPE} est une nappe introduite sous l'opérande TAHERI_NAPPE.

  F_{FONC} est une fonction introduite sous l'opérande TAHERI_FONC.

La valeur du dommage du cycle $(i+1)$ est obtenue par interpolation de $\frac{\Delta\varepsilon^*_{i+1}}{2}$ sur la courbe de Manson-Coffin du matériau ($Nrupt_{i+1}$ = nombre de cycles à la rupture pour le cycle $(i+1)=\text{MANSON_COFFIN}\left(\frac{\Delta\varepsilon^*_{i+1}}{2}\right)$ et Dom_{i+1} = dommage du cycle $(i+1)=1/Nrupt_{i+1}$
.

La courbe de Manson-Coffin doit être introduite dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01] (mot clé FATIGUE, opérande MANSON_COFFIN).

Remarques :

1) *La nappe ou la formule introduite sous l'opérande TAHERI_NAPPE est en fait la courbe d'écrouissage cyclique avec pré-contrainte du matériau.*
2) *La fonction ou la formule introduite sous l'opérande TAHERI_FONC est en fait la courbe d'écrouissage cyclique du matériau.*
3) *La nappe ou la formule introduite sous l'opérande TAHERI_NAPPE , doit avoir 'X' et 'EPSI' comme paramètres.*
4) *La fonction ou la formule introduite sous l'opérande TAHERI_FONC , doit avoir pour paramètre 'SIGM' .*

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

♦ DOMMAGE = / 'TAHERI_MIXTE'

Cette méthode de calcul du dommage ne s'applique qu'à des chargements de type déformation, c'est-à-dire pour les options 'DOMA_ELNO_EPSI', 'DOMA_ELGA_EPSI', 'DOMA_ELNO_EPME' ou 'DOMA_ELGA_EPME'. De plus, il faut que le concept résultat spécifié contienne respectivement le champ de nom symbolique EPEQ_ELNO, EPEQ_ELGA, EPMQ_ELNO ou EPMQ_ELGA (calculables par CALC_CHAMP).

Soient n cycles élémentaires de demi amplitude $\frac{\Delta\varepsilon_1}{2},\ldots,\frac{\Delta\varepsilon_n}{2}$.

Le calcul du dommage élémentaire du premier cycle est déterminé par interpolation sur la courbe de Manson-Coffin du matériau.

Le calcul du dommage élémentaire des cycles suivants est déterminé par l'algorithme décrit ci-dessous :

- Si $\frac{\Delta\varepsilon_{i+1}}{2}\geq\frac{\Delta\varepsilon_i}{2}$

  le calcul du dommage élémentaire du cycle $(i+1)$ est déterminé par interpolation sur la courbe de Manson-Coffin.

- Si $\frac{\Delta\varepsilon_{i+1}}{2}<\frac{\Delta\varepsilon_i}{2}$

  on détermine :

$$\frac{\Delta\sigma_{i+1}}{2}=F_{NAPPE}\left(\frac{\Delta\varepsilon_{i+1}}{2},\max_{j<i}\left(\frac{\Delta\varepsilon_j}{2}\right)\right)$$

  où F_{NAPPE} est une nappe introduite sous l'opérande TAHERI_NAPPE.

La valeur du dommage du cycle $(i+1)$ est obtenue par interpolation de $\frac{\Delta\sigma_{i+1}}{2}$ sur la courbe de Wöhler du matériau ($Nrupt_{i+1}$ = nombre de cycles à la rupture pour le cycle $(i+1)=WOHLER\left(\frac{\Delta\sigma_{i+1}}{2}\right)$ et Dom_{i+1} = dommage du cycle $(i+1)=1/Nrupt_{i+1}$).

Cette méthode nécessite la donnée des courbes de Wöhler et de Manson-Coffin du matériau, qui doivent être introduites dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01] (mot clé facteur FATIGUE).

Remarques :

1) *La nappe ou la formule introduite sous l'opérande TAHERI_NAPPE est en fait la courbe d'écrouissage cyclique avec pré-contrainte du matériau.*
2) *La nappe ou la formule introduite sous l'opérande TAHERI_NAPPE , doit avoir 'X' et 'EPSI' comme paramètres.*

3.3.4 Opérande TAHERI_NAPPE

Cet opérande permet de spécifier le nom d'une nappe $F_{NAPPE}\left(\frac{\Delta\varepsilon}{2},\varepsilon_{MAX}\right)$ nécessaire au calcul du dommage par les méthodes 'TAHERI_MANSON' et 'TAHERI_MIXTE'.

La nappe doit avoir 'X' et 'EPSI' comme paramètres.

Remarque :

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Cette nappe est en fait la courbe d'écrouissage cyclique avec pré-contrainte du matériau.

3.3.5 Opérande TAHERI_FONC

Cet opérande permet de spécifier le nom d'une fonction $F_{FONC}\left(\frac{\Delta\sigma}{2}\right)$ nécessaire au calcul du dommage par la méthode 'TAHERI_MANSON'.

Le paramètre de cette fonction doit être 'SIGM'.

Remarque :

Cette fonction est en fait la courbe d'écrouissage cyclique du matériau.

3.4 Opérandes spécifiques au calcul de type FATIGUE_MULTI

3.4.1 Opérande TYPE_CHARGE

Cet opérande permet de spécifier le type de chargement appliqué à la structure :

- PERIODIQUE, le chargement est périodique ;
- NON_PERIODIQUE, le chargement est non périodique.

3.4.2 Opérande OPTION

Cet opérande permet de spécifier le lieu où sera fait le post-traitement :

- DOMA_ELGA, le post-traitement est fait aux points de Gauss du maillage ;
- DOMA_NOEUD, le post-traitement est fait aux nœuds du maillage ou d'une partie du maillage, cf. opérandes : GROUP_MA, MAILLE, GROUP_NO et NO.

3.4.3 Opérande RESULTAT

♦ RESULTAT = res

Nom du concept résultat contenant les champs de contraintes et de déformation définissant l'histoire de chargement. Plus précisément, le concept résultat doit contenir le champ de nom symbolique

•SIEF_ELGA, EPSI_ELGA, EPSP_ELGA sont les champs de contrainte, de déformation totale et déformation plastique, respectivement, pour le calcul de fatigue aux champs aux éléments

•SIGM_NOEU/SIEF_NOEU, EPSI_NOEU, EPSP_NOEU sont les champs de contrainte, de déformation totale et déformation plastique, respectivement, pour le calcul de fatigue aux champs aux éléments

Le critère est d'abord analysé. En fonctions des paramètres du critère, les champs au-dessus sont demandés.

Dans cet opérateur, la déformation élastique = la déformation totale - la déformation plastique. Pour le critère qui demande la déformation élastique, la demande de la déformation totale est obligatoire. Si l'on ne renseigne pas la déformation plastique, on prendra la valeur zéro.

3.4.4 Opérande CHAM_MATER

◊ CHAM_MATER = cham_mater

Permet de spécifier le nom du champ du matériau cham_mater créé par AFFE_MATERIAU [U4.43.03].

Le matériau mater défini avec la commande DEFI_MATERIAU et qui sert à l'affectation du matériau au maillage avec la commande AFFE_MATERIAU doit contenir la définition de la courbe de Wöhler ainsi que les informations nécessaires à la mise en œuvre du critère, voir les mots clés facteurs FATIGUE et CISA_PLAN_CRIT de la commande DEFI_MATERIAU [U4.43.01].

3.4.5 Opérande CRITERE

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

♦ CRITERE = / 'MATAKE_MODI_AC',
/ 'DANG_VAN_MODI_AC',
/ 'MATAKE_MODI_AV',
/ 'DANG_VAN_MODI_AV',
/ 'FATESOCI_MODI_AV',
/ 'FORMULE_CRITERE',
/ 'VMIS_TRESCA',

Remarque :

Pour le chargement périodique, le calcul du dommage s'effectue seulement sur le premier cycle complet. La première partie de l'histoire du chargement correspondant au chargement monotone n'est pas prise en compte car celle-ci a pour objectif d'imposer un chargement moyen non nul. Pour le comportement élastique, le calcul est réalisé entre la valeur maximale et la valeur minimale du cycle considéré. Pour le comportement élasto-plastique, le calcul est réalisé entre le premier décharge et le deuxième décharge.

Le tableau suivant liste des critères d'amorçage disponibles pour deux types de chargements.

TYPE_CHARGE = 'PERIODIQUE'	TYPE_CHARGE = 'NON_PERIODIQUE'
'MATAKE_MODI_AC' 'DANG_VAN_MODI_AC' 'FORMULE_CRITERE'	'MATAKE_MODI_AV', 'DANG_VAN_MODI_AV' 'FATESOCI_MODI_AV' 'FORMULE_CRITERE'

Pour le chargement à amplitude constante, l'opérande CRITERE permet de spécifier le critère que devra satisfaire la demi amplitude de cisaillement maximal. Pour le chargement à amplitude variable, l'opérande CRITERE permet de spécifier le critère que devra satisfaire l'endommagement maximal.

Les critères d'amorçage dans Code_Aster peut être appelé par un nom pour les critères bien établis. Il est aussi possible pour l'utilisateur de construire un critère d'amorçage par lui-même comme une formule des grandeurs pré-définies.

Notation:

$\mathbf{n}^*$: normale au plan dans lequel l'amplitude de cisaillement est maximale;
$\Delta\tau(\mathbf{n})$: amplitude de cisaillement en contrainte dans un plan de normale $\mathbf{n}$;
$\Delta\gamma(\mathbf{n})$: amplitude de cisaillement en déformation dans un plan de normale $\mathbf{n}$;
$N_{max}(\mathbf{n})$: contrainte maximale normale sur le plan de normale $\mathbf{n}$;
τ_0 : limite d'endurance en cisaillement pur alterné ;
d_0 : limite d'endurance en traction-compression pure alternée ;
P : pression hydrostatique ;
c_p : coefficient servant à prendre en compte un éventuel préécrouissage ;
σ_y : limite d'élasticité.

Critère MATAKE_MODI_AC

Le critère initial de MATAKE est défini par l'inéquation [éq.3.12-1] :

$$\frac{\Delta\tau}{2}(\mathbf{n}^*)+aN_{max}(\mathbf{n}^*)\leq b \qquad \textbf{éq 3.12-1}$$

où a et b sont deux constantes données par l'utilisateur sous les mots clés MATAKE_A et MATAKE_B du mot clé facteur CISA_PLAN_CRIT de DEFI_MATERIAU, elles dépendent des caractéristiques matériaux et valent :

$$a=\left(\tau_0-\frac{d_0}{2}\right)/\frac{d_0}{2} \qquad b=\tau_0$$

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Si l'utilisateur possède les résultats de deux essais de traction compression, un alterné et l'autre non, les constants a et b sont données par :

$$a=\frac{\Delta\sigma_2-\Delta\sigma_1}{(\Delta\sigma_1-\Delta\sigma_2)-2\sigma_m},$$
$$b=\frac{\sigma_m}{(\Delta\sigma_2-\Delta\sigma_1)+2\sigma_m}\times\frac{\Delta\sigma_1}{2},$$

avec $\Delta\sigma_1$ l'amplitude de chargement pour le cas alterné $(\sigma_m=0)$ et $\Delta\sigma_2$ l'amplitude de chargement pour le cas où la contrainte moyenne est non nulle $(\sigma_m\neq 0)$.

Nous modifions le critère initial de MATAKE en introduisant la définition d'une contrainte équivalente, notée $\sigma_{eq}(\mathbf{n}^*)$:

$$\sigma_{eq}(\mathbf{n}^*)=\left(c_p\frac{\Delta\tau}{2}(\mathbf{n}^*)+a\,N_{max}(\mathbf{n}^*)\right)\frac{f}{t},$$

où f/t représente le rapport des limites d'endurance en flexion et torsion alternées, et doit être renseigné sous le mot clé COEF_FLEX_TORS du mot clé facteur CISA_PLAN_CRIT de DEFI_MATERIAU.

Critère DANG_VAN_MODI_AC

Le critère initial de DANG VAN est défini par l'inéquation [éq 3.12-2] :

$$\frac{\Delta\tau}{2}(\mathbf{n}^*)+a\,P\leq b \qquad \textbf{éq 3.12-2}$$

où a et b sont deux constantes données par l'utilisateur sous les mots clés D_VAN_A et D_VAN_B du mot clé facteur CISA_PLAN_CRIT de DEFI_MATERIAU, elles dépendent des caractéristiques matériaux. Dans le cas où l'utilisateur dispose de deux essais de traction compression, un alterné l'autre non les constantes a et b valent :

$$a=\frac{3}{2}\times\frac{\Delta\sigma_2-\Delta\sigma_1}{(\Delta\sigma_1-\Delta\sigma_2)-2\sigma_m} \qquad b=\frac{\sigma_m}{(\Delta\sigma_2-\Delta\sigma_1)+2\sigma_m}\times\frac{\Delta\sigma_1}{2}$$

avec $\Delta\sigma_1$ l'amplitude de chargement pour le cas alterné $(\sigma_m=0)$ $\Delta\sigma_2$ et pour le cas où la contrainte moyenne est non nulle $(\sigma_m\neq 0)$.

De plus, nous définissons une contrainte équivalente au sens de DANG VAN, notée $\sigma_{eq}(\mathbf{n}^*)$:

$$\sigma_{eq}(\mathbf{n}^*)=\left(c_p\frac{\Delta\tau}{2}(\mathbf{n}^*)+a\,P\right)\frac{c}{t}$$

où c/t représente le rapport des limites d'endurance en cisaillement et traction alternés, et doit être renseigné sous le mot clé COEF_CISA_TRAC du mot clé facteur CISA_PLAN_CRIT de DEFI_MATERIAU.

Pour plus d'informations, consulter le document [R7.04.04].

Critère MATAKE_MODI_AV

Le critère MATAKE_MODI_AV est une évolution du critère de MATAKE. Contrairement aux deux critères précédents, ce critère sélectionne le plan critique en fonction du dommage calculé dans chaque plan. C'est le plan dans lequel le dommage est maximal qui est retenu. Ce critère est adapté aux chargements non périodiques, ce qui induit l'utilisation d'une méthode de comptage de cycles afin de calculer les dommages élémentaires. Pour compter les cycles, nous utilisons la méthode RAINFLOW.

Les dommages élémentaires une fois connus sont cumulés linéairement pour déterminer le dommage.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Pour calculer les dommages élémentaires nous projetons l'historique des contraintes de cisaillement sur un ou deux axes afin de réduire celui-ci à une fonction unidimensionnelle du temps $\tau_p = f(t)$. Après avoir extrait les sous-cycles élémentaires de τ_p avec la méthode RAINFLOW nous définissons une contrainte équivalente élémentaire pour tout sous-cycle élémentaire i :

$$\sigma_{eq}^{i}(\mathbf{n}) = \alpha \left(c_p \frac{Max\left(\tau_{p1}^{i}(\mathbf{n}), \tau_{p2}^{i}(\mathbf{n})\right) - Min\left(\tau_{p1}^{i}(\mathbf{n}), \tau_{p2}^{i}(\mathbf{n})\right)}{2} + a\, Max\left(N_1^i(\mathbf{n}), N_2^i(\mathbf{n}), 0\right) \right)$$

éq 3.12-3

avec $\mathbf{n}$ la normale du plan courant, $\tau_{p1}^{i}(\mathbf{n})$ et le $\tau_{p2}^{i}(\mathbf{n})$ s valeurs des contraintes de cisaillement projetées du sous-cycle i et $N_1^i(\mathbf{n})$ et le $N_2^i(\mathbf{n})$ s contraintes normales du sous-cycle i . A partir de $\sigma_{eq}^{i}(\mathbf{n})$ et d'une courbe de fatigue nous déterminons le nombre de cycles à la rupture élémentaire $N^i(\mathbf{n})$ et le dommage correspondant $D^i(\mathbf{n}) = 1/N^i(\mathbf{n})$. Dans [éq 3.12-3] α est un terme correctif qui permet d'utiliser une courbe de fatigue en traction-compression. Les constantes a et α doivent être renseignées sous les mots clés MATAKE_A et COEF_FLEX_TORS du mot clé facteur CISA_PLAN_CRIT de DEFI_MATERIAU.

Nous utilisons un cumul de dommage linéaire. Soit k le nombre de sous-cycles élémentaires, pour une normale $\mathbf{n}$ fixée, le dommage cumulé est égal à :

$$D(\mathbf{n}) = \sum_{i=1}^{k} D^i(\mathbf{n})$$

éq 3.12-4

Pour déterminer le vecteur normal $\mathbf{n}^*$ correspondant au dommage cumulé maximal nous faisons varier $\mathbf{n}$, le vecteur normal $\mathbf{n}^*$ correspondant au dommage cumulé maximal est alors donné par :

$$D(\mathbf{n}^*) = \underset{\mathbf{n}}{Max}\left(D(\mathbf{n})\right)$$

Critère DANG_VAN_MODI_AV

La démarche et les techniques mises en œuvre pour calculer ce critère sont identiques à celles utilisées pour le critère MATAKE_MODI_AV. La seule différence réside dans la définition de la contrainte équivalente élémentaire où la pression hydrostatique P remplace la contrainte normale maximale N_{max} :

$$\sigma_{eq}^{i}(\mathbf{n}) = \alpha \left(c_p \frac{Max\left(\tau_{p1}^{i}(\mathbf{n}), \tau_{p2}^{i}(\mathbf{n})\right) - Min\left(\tau_{p1}^{i}(\mathbf{n}), \tau_{p2}^{i}(\mathbf{n})\right)}{2} + a\, Max\left(P_1^i(\mathbf{n}), P_2^i(\mathbf{n}), 0\right) \right)$$

Les constantes a et α sont à renseigner par l'utilisateur sous les mots clés D_VAN_A et COEF_CISA_TRAC du mot clé facteur CISA_PLAN_CRIT de DEFI_MATERIAU.

Pour plus d'information consulter le document [R7.04.04].

Critère FATESOCI_MODI_AV

Le critère de FATEMI et SOCIE est défini par la relation :

$$\varepsilon_{eq}(n) = \frac{\Delta\gamma(n)}{2}\left(1 + k\frac{N_{max}(n)}{\sigma_y}\right)$$

où k est une constante qui dépend des caractéristiques matériaux. Contrairement aux autres critères, il utilise le cisaillement en déformation au lieu du cisaillement en contrainte. De plus, les différentes quantités qui contribuent au critère sont multipliées et non additionnées. Le critère de FATEMI et SOCIE est utilisable après un calcul élastique ou élastoplastique. Ce critère

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

sélectionne le plan critique en fonction du dommage calculé dans chaque plan. C'est le plan dans lequel le dommage est maximal qui est retenu.

Ce critère est adapté aux chargements non périodiques, ce qui nous conduit à utiliser la méthode de comptage de cycles RAINFLOW pour calculer les dommages élémentaires. Les dommages élémentaires sont ensuite cumulés linéairement pour déterminer le dommage.

Afin de calculer les dommages élémentaires nous projetons l'historique du cisaillement en déformation sur un ou deux axes afin de réduire celui-ci à une fonction unidimensionnelle du temps $\gamma_p = f(t)$. Après avoir extrait les sous-cycles élémentaires avec la méthode RAINFLOW nous définissons une déformation équivalente élémentaire pour tout sous-cycle élémentaire i :

$$\varepsilon_{eq}^{i}(\mathbf{n}) = \alpha\, c_p \left(\frac{Max\left(\gamma_{p1}^{i}(\mathbf{n}), \gamma_{p2}^{i}(\mathbf{n})\right) - Min\left(\gamma_{p1}^{i}(\mathbf{n}), \gamma_{p2}^{i}(\mathbf{n})\right)}{2} \right) \left(1 + a\, Max\left(N_1^i(\mathbf{n}), N_2^i(\mathbf{n}), 0\right)\right)$$

éq 3.12-5

avec $a = \frac{k}{\sigma_y}$, $\mathbf{n}$ la normale au plan courant, $\gamma_{p1}^{i}(\mathbf{n})$ et $\gamma_{p2}^{i}(\mathbf{n})$ les valeurs des cisaillements en déformation projetés du sous-cycle i, $N_1^i(\mathbf{n})$ et $N_2^i(\mathbf{n})$ étant les deux valeurs de la contrainte normale du sous-cycle i. A partir de $\varepsilon_{eq}^{i}(\mathbf{n})$ et d'une courbe de Manson-Coffin nous déterminons le nombre de cycles à la rupture élémentaire et $N^i(\mathbf{n})$ le dommage correspondant $D^i(\mathbf{n}) = 1/N^i(\mathbf{n})$.

On notera que les déformations de cisaillement utilisées dans le critère de FATEMI et de SOCIE sont des distorsions γ_{ij} ($i \neq j$). Si on utilise les déformations de cisaillement du type tensoriel ϵ_{ij} ($i \neq j$), il faut les multiplier par un facteur 2 car $\gamma_{ij} = 2\ \epsilon_{ij}$.

Dans l'équation [éq 3.12-5] α est un terme correctif qui d'utiliser une courbe de Manson-Coffin obtenue en traction-compression. c_p est un coefficient qui permet de prendre en compte un éventuel pré-écrouissage.

Les constantes a et α doivent être renseignées sous les mots clés FATSOC_A et COEF_CISA_TRAC du mot clé facteur CISA_PLAN_CRIT de la commande DEFI_MATERIAU.

Il est noté qu'une approche rigoureuse est d'utiliser la courbe de Manson-Coffin obtenue directement en torsion (qui n'est pas toujours disponible). L'utilisation de la courbe de Manson-Coffin obtenue en traction-compression avec le terme correctif α (qui est le rapport entre deux limites d'endurance), comme programmé dans Code_Aster, est donc une approximation.

Comme nous utilisons un cumul de dommage linéaire, si m est le nombre de sous-cycles élémentaires, alors pour une normale $\mathbf{n}$ fixée, le dommage cumulé est égal à :

$$D(\mathbf{n}) = \sum_{i=1}^{m} D^i(\mathbf{n})$$

Pour trouver le vecteur normal $\mathbf{n}^*$ correspondant au dommage cumulé maximal nous faisons varier $\mathbf{n}$. Le vecteur normal $\mathbf{n}^*$ associé au dommage cumulé maximal est alors donné par :

$$D(\mathbf{n}^*) = \underset{\mathbf{n}}{Max}\left(D(\mathbf{n})\right)$$

Critère FORMULE_CRITERE

Ce type de critère permet à l'utilisateur de construire un critère comme une formule des grandeurs pré-définies. Ce critère se base sur une relation générale:

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

« Grandeur équivalente » = « Courbe de vie »

où la « Grandeur équivalente » est une formule fournie sous l'opérande FORMULE_GRDEQ (voir 3.4.6) et la « Courbe de vie » est fournie sous l'opérande COURBE_GRD_VIE (voir 3.4.7) soit par une fonction (tablée ou formule, sous l'opérande de 'FORMULE_VIE', voir 3.4.8), soit par un nom de courbe 'WOHLER' ou 'MANSON_C' définie préalablement dans DEFI_MATERIAU.

Critère VMIS_TRESCA
Le critère VMIS_TRESCA n'est pas à proprement parler un critère de fatigue puisqu'il ne permet pas de calculer un dommage. Il détermine la variation d'amplitude maximale du tenseur des contraintes au cours du temps. Concrètement, nous appliquons les critères de Von Mises et de Tresca aux tenseurs qui résultent de la différence du tenseur des contraintes pris à deux instants distincts. En faisant varier ces instants nous pouvons calculer les valeurs maximales des critères de Von Mises et de Tresca [R7.04.04].

3.4.6 Opérande FORMULE_GRDEQ

♦ FORMULE_GRDEQ = for_grd, / [formule]

Permet de fournir la formule du critère comme une fonction des grandeurs disponibles. Les listes de grandeurs disponibles pour chaque type de chargement se trouvent dans le tableau suivant:

TYPE_CHARGE = 'PERIODIQUE', CRITERE = 'FORMULE_CRITERE'
Les grandeurs disponibles:
'DTAUMA': demi-amplitude de cisaillement en contrainte maximale($\Delta\tau(\mathbf{n}^*)/2$)
'PHYDRM': pression hydrostatique (P)
'NORMAX': contrainte normale maximale sur le plan critique ($N_{max}(\mathbf{n}^*)$)
'NORMOY': contrainte normale moyenne sur le plan critique ($N_{moy}(\mathbf{n}^*)$)
'EPNMAX': déformation normale maximale sur le plan critique ($\varepsilon_{Nmax}(\mathbf{n}^*)$)
'EPNMOY': déformation normale moyenne sur le plan critique ($\varepsilon_{Nmoy}(\mathbf{n}^*)$)
'DEPSPE': demi-amplitude de la déformation plastique équivalente ($\Delta\varepsilon_{eq}^{p}/2$)
'EPSPR1': demi-amplitude de la première déformation principale (avec la prise en compte du signe)
'SIGNM1': contrainte normale maximale sur le plan associé avec ε_1
'DENDIS': densité d'énergie dissipée (W_{cy})
'DENDIE': densité d'énergie des distorsions élastiques (W_e)
'APHYDR': demi-amplitude de la pression hydrostatique (P_a)
'MPHYDR': pression hydrostatique moyenne (P_m)
'DSIGEQ': demi-amplitude de la contrainte équivalente ($\Delta\sigma_{eq}/2$)
'SIGPR1': demi-amplitude de la première contrainte principale (avec la prise en compte du signe)
'EPSNM1': déformation normale maximale sur le plan associé avec σ_1
'INVA2S': demi-amplitude du deuxième invariant de la déformation $J_2(\epsilon)$
'DSITRE': demi-amplitude de la demi-contrainte Tresca ($(\sigma_{max}^{Tresca}-\sigma_{min}^{Tresca})/4$)
'DEPTRE': demi-amplitude de la demi-déformation Tresca ($(\epsilon_{max}^{Tresca}-\epsilon_{min}^{Tresca})/4$)
'EPSPAC': déformation plastique accumulé p
'RAYSPH': le rayon de la plus petite sphère circonscrite au trajet de chargement dans l'espace des déviateurs des contraintes R
'AMPCIS': amplitude de cission τ_a
TYPE_CHARGE = 'NON-PERIODIQUE', CRITERE = 'FORMULE_CRITERE'

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Les grandeurs disponibles:

'TAUPR_1' : contraintes de cisaillement projetées du premier sommet du sous-cycle ($\tau_{p1}(\mathbf{n})$)

'TAUPR_2' : contraintes de cisaillement projetées du deuxième sommet du sous-cycle ($\tau_{p2}(\mathbf{n})$)

'SIGN_1' : contrainte normale du premier sommet du sous-cycle ($N_1(\mathbf{n})$)

'SIGN_2' : contrainte normale du deuxième sommet du sous-cycle ($N_2(\mathbf{n})$)

'PHYDR_1' : pression hydrostatique du premier sommet du sous-cycle

'PHYDR_2' : pression hydrostatique du deuxième sommet du sous-cycle

'EPSPR_1' : cisaillement en déformation projetés du premier sommet du sous-cycle ($\gamma_{p1}(\mathbf{n})$)

'EPSPR_2' : cisaillement en déformation projetés du deuxième sommet du sous-cycle($\gamma^i_{p2}(\mathbf{n})$)

'SIPR1_1' : première contrainte principale du premier sommet du sous-cycle ($\sigma_1(1)$)

'SIPR1_2' : première contrainte principale du deuxième sommet du sous-cycle ($\sigma_1(2)$)

'EPSN1_1' : déformation normale sur le plan associé avec $\sigma_1(1)$ du premier sommet du sous-cycle

'EPSN1_2' : déformation normale sur le plan associé avec $\sigma_1(2)$ du deuxième sommet du sous-cycle

'ETPR1_1' : première déformation totale principale du premier sommet du sous-cycle ($\epsilon_1^{tot}(1)$)

'ETPR1_2' : première déformation totale principale du deuxième sommet du sous-cycle ($\epsilon_1^{tot}(2)$)

'SITN1_1' : contrainte normale sur le plan associé avec $\epsilon_1^{tot}(1)$ du premier sommet du sous-cycle

'SITN1_2' : contrainte normale sur le plan associé avec $\epsilon_1^{tot}(2)$ du deuxième sommet du sous-cycle

'EPPR1_1' : première déformation plastique principale du premier sommet du sous-cycle ($\epsilon_1^{p}(1)$)

'EPPR1_2' : première déformation plastique principale du deuxième sommet du sous-cycle ($\epsilon_1^{p}(2)$)

'SIPN1_1' : contrainte normale sur le plan associé avec $\epsilon_1^{p}(1)$ du premier sommet du sous-cycle

'SIPN1_2' : contrainte normale sur le plan associé avec $\epsilon_1^{p}(2)$ du deuxième sommet du sous-cycle

'SIGEQ_1' : contrainte équivalente du premier sommet du sous-cycle ($\sigma_{eq}(1)$)

'SIGEQ_2' : contrainte équivalente du deuxième sommet du sous-cycle ($\sigma_{eq}(2)$)

'ETEQ_1' : déformation totale équivalente du premier sommet du sous-cycle ($\epsilon_{eq}^{tot}(1)$)

'ETEQ_2' : déformation totale équivalente du deuxième sommet du sous-cycle ($\epsilon_{eq}^{tot}(2)$)

Remarques :

1) Pour le chargement périodique, la formule de critère est utilisée pour déterminer le plan de cisaillement maximal si le paramètre 'DTAUMA' est introduit dans la formule.

2) Pour le chargement non-périodique, après avoir extrait les sous-cycles élémentaires avec la méthode RAINFLOW, nous calculons une grandeur équivalente élémentaire par la formule de critère pour tout sous-cycle élémentaire. On note que le sous-cycle est représenté par deux états de contrainte ou déformation, notés par le premier et le deuxième sommets du sous-cycle.

3) Les paramètres d'entrées de la commande FORMULE doivent être parmi ceux listés dans le tableau au-dessus.

4) Des expressions de certaines grandeurs se trouvent dans le document [R7.04.04].

5) On souligne que la déformation thermique n'a pas été prise en compte, i.e., $\epsilon^{tot}=\epsilon^{e}+\epsilon^{p}$.

6) Les opérateurs utilisés dans la formule doivent être conformes à la syntaxe de Python comme indiqué dans la note [U4.31.05].

7) Pour le chargement périodique, l'évaluation de la grandeur équivalente est sortie sous le nom 'SIGEQ1'.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3.4.7 Opérande COURBE_GRD_VIE

♦ COURBE_GRD_VIE = / 'WOHLER',
/ 'MANSON_C',
/ 'FORM_VIE'

Permet de fournir une courbe de reliant la grandeur équivalente au nombre de cycles à la rupture.
Si COURBE_GRD_VIE = 'WOHLER', on va prendre la courbe de Wohler ($N_f = f(SIGM)$) défini dans AFFE_MATERIAU.
Si COURBE_GRD_VIE = 'MANSON_C', on va prendre la courbe de Manson_Coffin ($N_f = f(EPSN)$) défini dans AFFE_MATERIAU.
Si COURBE_GRD_VIE = 'FORM_VIE', on va fournir une fonction définissant la courbe de vie, voir 3.4.8.

3.4.8 Opérande FORMULE_VIE

♦ FORMULE_VIE = for_vie, / [formule]
/ [fonction]

Permet de spécifier la courbe reliant la grandeur équivalente et la durée de vie.
Si for_vie est fournie par une fonction tabulée, elle doit être sous la forme :
$N_f = f$ ($grandeur_{équivalente}$).
Si for_vie est fournie par une formule, elle doit être sous la forme :
$grandeur_{équivalente} = f(N_f)$.
Dans ce cas, le paramètre d'entrée pour la commande FORMULE doit être ' NBRUPT ' (i.e., N_f).

3.4.9 Opérande METHODE

♦ METHODE = 'CERCLE_EXACT'

Permet de spécifier le nom de la méthode qui sera utilisée pour calculer la demi amplitude de cisaillement maximal.

La méthode du 'CERCLE_EXACT' sert à déterminer le cercle circonscrit aux points qui se trouvent dans des plans de cisaillement. Cette méthode repose sur le procédé qui consiste à obtenir le cercle qui passe par trois points, cf. document [R7.04.04].

3.4.10 Opérande INST_INIT_CYCL

◊ INST_INIT_CYCL = / inst_ini_cyc

Permet de spécifier l'instant intial du partie du chargement cyclique. Si cet opérande n'est pas renseigné ou inst_ini_cyc ne fait pas partie des instants calculés , on prend la valeur initiale stockée dans le résultat comme l'instant initial du cycle. Cet opérande permet également aux utilisateurs d'appliquer un chargement moyen non-nul.

3.4.11 Opérande INST_CRIT

◊ INST_CRIT = / 'RELATIF'
/ 'ABSOLU'

Permet de préciser le critère pour chercher l'instant initial INST_INIT_CYCL

3.4.12 Opérande PRECISION

◊ PRECISION = / prec [R]
/ 1.E-6 ,

Permet de spécifier la précision de l'instant initial INST_INIT_CYCL

3.4.13 Opérande PROJECTION

♦ PROJECTION = / 'UN_AXE',
/ 'DEUX_AXES',

Dans le cas où le chargement est non périodique, il est nécessaire de projeter l'histoire du cisaillement sur un ou deux axes, cf. document [R7.04.04].

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- UN_AXE, l'histoire du cisaillement est projetée sur un axe ;
- DEUX_AXES, l'histoire du cisaillement est projetée sur deux axes.

3.4.14 Opérande DELTA_OSCI

◊ DELTA_OSCI = / delta,
/ 0.0,

Filtrage de l'histoire du chargement. Dans tous les cas, si la fonction reste constante ou décroissante sur plus de deux points consécutifs on supprime les points intermédiaires pour ne garder que les deux points extrêmes. Puis, on supprime de l'histoire de chargement les points pour lesquels la variation de la valeur de la contrainte est inférieure à la valeur delta. Par défaut delta est égal à zéro, ce qui revient à garder toutes les oscillations du chargement, même celles de faible amplitude. Pour plus de renseignement voir la documentation de la commande POST_FATIGUE, [U4.83.01], même opérande.

3.4.15 Opérandes GROUP_MA / MAILLE / GROUP_NO / NOEUD

◊ GROUP_MA = lgma ,

Les options sont calculées sur les groupes de mailles contenus dans la liste lgma .

◊ MAILLE = lma ,

Les options sont calculées sur les mailles contenues dans la liste lgma .

◊ GROUP_NO = lgno ,

Les options sont calculées sur les groupes de nœuds contenus dans la liste lgno .

◊ NOEUD = lno ,

Les options sont calculées sur les nœuds contenus dans la liste lno .

3.4.16 Opérande COEF_PREECROU

◊ COEF_PREECROU = / coef_pre ,
/ 1.0,

Ce coefficient sert à prendre en compte l'effet d'un éventuel préécrouissage.

3.4.17 Opérande MAILLAGE

♦ MAILLAGE = maillage ,

Permet de spécifier le nom du maillage donné par l'utilisateur.

3.5 Opérandes spécifiques au calcul de type FATIGUE_VIBR

3.5.1 Principe du calcul

Cette option ne vise pas à calculer le dommage associé à un chargement connu, mais à l'inverse à estimer le chargement vibratoire maximal associé à une endurance illimitée à la structure étudiée. Les structures visées sont typiquement les ailettes, sollicités par un chargement statique connu (effort centrifuge lié à la rotation de la machine) et par un chargement dynamique inconnu ou mal connu (vibrations induites par l'écoulement du fluide).

Une hypothèse fondamentale de cette option est de considérer un critère de fatigue uniaxial (méthode de Wöhler). Autrement dit, on suppose que les directions principales du chargement statique et du chargement dynamique sont les mêmes. Cette hypothèse semble licite pour les structures usuelles visées (ailettes, lignes de tuyauterie, …) ; elle induit un conservatisme sans doute excessif dans le cas général.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

La démarche d'une étude avec cette option est la suivante :

•Calcul de la contrainte liée au chargement statique σ_{stat} avec MECA_STATIQUE ou STAT_NON_LINE ;
•Calcul des contraintes associées aux N modes propres considérés σ^i_{mod} avec MODE_ITER_SIMULT ;
•Calcul en fatigue avec CALC_FATIGUE / TYPE_CALCUL = 'FATIGUE_VIBR'
•Introduction d'une hypothèse sur le poids relatif des différents modes propres considérés $(\beta_i)_{1\le i\le N}$ (correspond à l'opérande FACT_PARTICI) :

$$\sigma_{total}(t)=\sigma_{stat}+\alpha\sum_{i=1}^{N}\beta_i\sigma^i_{mod}\cos(\omega_i t+\phi_i)\ ,$$

où ω_i et ϕ_i sont respectivement la pulsation (connue) et le déphasage (inconnu) du mode i. Le coefficient α est le paramètre que l'on cherche à calculer ;
•Récupération des paramètres matériaux et choix du critère de calcul du dommage (opérandes CORR_SIGM_MOYE et MATER , cf. § 22). On note f le critère que doit vérifier l'amplitude maximale de variation de la contrainte S^{max}_{alt} . f dépend de la limite d'endurance S_l et de la limite à la rupture S_u du matériau :

$$S^{\max}_{alt}=f(\sigma_{stat},S_l,S_u)$$

•Sur tous les nœuds ou points de Gauss du maillage (selon le choix dans OPTION) :
•Calcul de l'amplitude de variation des contraintes : $S_{alt}=\alpha\sum_{i=1}^{N}\beta_i\sigma^i_{mod}$ (à noter que, ne connaissant pas les déphasages entre les modes, l'amplitude est définie de manière conservative comme la somme de l'amplitude de chacun des modes) ;
• Calcul du coefficient α correspondant à une endurance illimitée : $\alpha=\dfrac{f(\sigma_{stat},S_l,S_u)}{\sum_{i=1}^{N}\beta_i\sigma^i_{mod}}$

•Interprétation et utilisation du résultat de CALC_FATIGUE : l'opérateur fournit le champ (aux nœuds ou au point de Gauss) des valeurs admissibles de α : la valeur minimale de α sur le maillage permet de calculer l'amplitude maximale admissible de vibration de la structure (la valeur minimale est affichée dans le fichier message ; elle peut aussi être retrouvée en post-traitant ou visualisant le champ résultat) ; le champ permet de localiser les zones qui limitent la durée de vie de la structure.

Pour passer du coefficient α à l'amplitude de vibration admissible en un point donné $\partial\tilde{u}$ (correspondant par exemple à la position d'un capteur), une opération supplémentaire est à réaliser. On note $\tilde{u}^i_{mod}$ le déplacement au point d'intérêt associé au mode i ; l'amplitude de vibration admissible en ce point est alors :

$$\partial\tilde{u}=min(\alpha)\sum_{i=1}^{N}\beta_i\tilde{u}^i_{mod}$$

Remarque :

Si la contrainte statique dépasse en un nœud la contrainte à la rupture du matériau, l'amplitude de vibration admissible est nulle. Dans ce cas, un message d'alarme est émis et le calcul se poursuit sur les autres nœuds.

3.5.2 Mot clé facteur HISTOIRE

Ce mot clé facteur regroupe la phase de définition du chargement : contrainte statique (opérande RESULTAT) ; contraintes modales (MODE_MECA) ; numéro du ou des modes à considérer (NUME_MODE) ; poids relatif de chacun de ses modes (FACT_PARTICI).

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3.5.2.1 Opérande RESULTAT

♦ RESULTAT = res

Nom du concept résultat contenant le champ de contraintes associé au chargement statique de la structure (un seul pas de temps). Plus précisément, le concept résultat doit contenir l'un des champs de nom symbolique SIEQ_ELNO ou SIEQ_ELGA selon l'option de calcul désirée.

3.5.2.2 Opérande MODE_MECA

♦ MODE_MECA = mode

Nom du concept de type mode_meca, contenant les champs de contraintes pour les modes propres de la structure.

Plus précisément, le concept résultat doit contenir l'un des champs de nom symbolique SIEQ_ELNO ou SIEQ_ELGA selon l'option de calcul désirée. Ces champs sont calculés avec l'opérateur CALC_CHAMP, en post-traitement d'un calcul de modes propres avec MACRO_MODE_MECA ou MODE_ITER_SIMULT.

3.5.2.3 Opérande NUME_MODE

♦ NUME_MODE = list_I

Numéro du ou des modes à considérer pour le calcul du dommage.

3.5.2.4 Opérande FACT_PARTICI

♦ FACT_PARTICI = list_R

Poids relatif de chacun des modes à considérer. La longueur de la liste doit être identique à la longueur de celle renseignée sous l'opérande NUME_MODE.

Seul le rapport entre les différents facteurs fournis est important. Si l'on veut passer du paramètre calculé par CALC_FATIGUE à une amplitude maximale de déplacement en un nœud donné, il convient cependant de bien prendre en compte les mêmes coefficients (cf. § 20).

3.5.3 Opérande OPTION

Ce mot clé facteur permet de spécifier le lieu de calcul du dommage :

- 'DOMA_ELNO_SIGM' pour le calcul du dommage aux nœuds à partir d'un champ de contraintes.
  Les résultats statiques et modaux (opérandes RESULTAT et MODE_MECA) doivent contenir le champ de nom symbolique SIEQ_ELNO (calculable par CALC_CHAMP), qui définit entre autre la valeur de la contrainte équivalente de von Mises signée (composante VMIS_SG) calculée aux nœuds.
- 'DOMA_ELGA_SIGM' pour le calcul du dommage aux points de Gauss à partir d'un champ de contraintes.
  Les résultats statiques et modaux (opérandes RESULTAT et MODE_MECA) doivent contenir le champ de nom symbolique SIEQ_ELGA (calculable par CALC_CHAMP), qui définit entre autre la valeur de la contrainte équivalente de von Mises signée (composante VMIS_SG) calculée aux points de Gauss.

3.5.4 Opérande CORR_SIGM_MOYENNE

♦ CORR_SIGM_MOYE = / 'GOODMAN' ,
/ 'GERBER' ,

La structure est soumise à un chargement à contrainte moyenne non nulle, la contrainte moyenne correspondant à la contrainte statique.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

La prise en compte de la contrainte moyenne σ_m dans la courbe de fatigue de Wöhler peut se faire à l'aide du diagramme de Haigh [R7.04.01]. Deux corrections sont disponibles pour calculer la contrainte alternée admissible $S_{alt}^{\max}$ en fonction de la limite d'endurance S_l et de la limite à la rupture S_u du matériau :

droite de Goodman :

$$S_{alt}^{\max} = S_l \left(1 - \frac{\sigma_m}{S_u} \right)$$

parabole de Gerber :

$$S_{alt}^{\max} = S_l \left(1 - \frac{\sigma_m}{S_u} \right)^2$$

La valeur de la limite à la rupture du matériau S_u doit être introduite dans l'opérateur DEFI_MATERIAU [U4.43.01] (mot clé facteur RCCM, opérande Su). La limite d'endurance S_l correspond au premier point de la courbe de Wöhler (opérateur DEFI_MATERIAU, mot clé FATIGUE, opérande WOHLER).

3.5.5 Opérande DOMMAGE

♦ DOMMAGE = / 'WOHLER'

Pour le moment, seule la méthode de Wöhler est disponible pour les calculs en fatigue vibratoire. Cette méthode repose sur le calcul de l'amplitude de variation des contraintes et la comparaison à la courbe de fatigue de Wöhler du matériau.

La courbe de Wöhler du matériau doit être introduite dans l'opérateur DEFI_MATERIAU (mot clé FATIGUE, opérande WOHLER). Seule la limite d'endurance S_l (i.e. le premier point de la courbe) est réellement utilisé dans le calcul.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4 Grandeur et composantes introduites dans *Code_Aster*

Les valeurs calculées sont stockées aux points de Gauss ou aux nœuds suivant l'option retenue. La grandeur FACY_R (FAtigue CYclique) a été introduite dans le catalogue des grandeurs.

Pour le chargement périodique et les critères du type de plan critique cisaillement maximum

DTAUM1	**première** valeur de la demi amplitude max du cisaillement dans le plan critique
VNM1X	composante x du vecteur normal au plan critique liée à DTAUM1
VNM1Y	composante y du vecteur normal au plan critique liée à DTAUM1
VNM1Z	composante z du vecteur normal au plan critique liée à DTAUM1
SINMAX1	contrainte maximale normale au plan critique correspondant à DTAUM1
SINMOY1	contrainte moyenne normale au plan critique correspondant à DTAUM1
EPNMAX1	déformation maximale normale au plan critique correspondant à DTAUM1
EPNMOY1	déformation maximale moyenne au plan critique correspondant à DTAUM1
SIGEQ1	Contrainte équivalente au sens du critère sélectionné correspondant à DTAUM1
NBRUP1	nombre de cycles avant rupture (fonction de SIGEQ1 et d'une courbe de Wöhler)
ENDO1	endommagement associé à NBRUP1 (ENDO1=1/NBRUP1)
DTAUM2	**deuxième** valeur de la demi amplitude max du cisaillement dans le plan critique
VNM2X	composante x du vecteur normal au plan critique liée à DTAUM2
VNM2Y	composante y du vecteur normal au plan critique liée à DTAUM2
VNM2Z	composante z du vecteur normal au plan critique liée à DTAUM2
SINMAX2	contrainte maximale normale au plan critique correspondant à DTAUM2
SINMOY2	contrainte moyenne normale au plan critique correspondant à DTAUM2
EPNMAX2	déformation maximale normale au plan critique correspondant à DTAUM2
EPNMOY2	déformation maximale moyenne au plan critique correspondant à DTAUM2
SIGEQ2	Contrainte équivalente au sens du critère sélectionné correspondant à DTAUM2
NBRUP2	nombre de cycles avant rupture (fonction de SIGEQ2 et d'une courbe de Wöhler)
ENDO2	endommagement associe à NBRUP2 (ENDO2=1/NBRUP2)

Tableau 5.5-1 : Composantes spécifiques à la fatigue cyclique multiaxiale pour le chargement périodique

Pour le chargement non-périodique et les critères du type de plan critique du dommage maximum

VNM1X	composante x du vecteur normal au plan critique liée au dommage max
VNM1Y	composante y du vecteur normal au plan critique liée au dommage max
VNM1Z	composante z du vecteur normal au plan critique liée au dommage max
ENDO1	endommagement associé au bloc du de chargement
VNM2X	composante x du vecteur normal au plan critique liée au dommage max
VNM2Y	composante y du vecteur normal au plan critique liée au dommage max
VNM2Z	composante z du vecteur normal au plan critique liée au dommage max

Tableau 5.5-2 : Composantes spécifiques à la fatigue cyclique multiaxiale pour le chargement non-périodique

Pour le chargement non-périodique, s'il existe un seul plan critique du dommage maximum, VNM2X, VNM2Y, VNM2Z sont identiques aux VNM1X, VNM1Y, VNM1Z. Si plusieurs plans existent, on émet une alarme et sort les deux premiers plans.

5 Exemples

On pourra se reporter au test SZLZ105 pour ce qui concerne le dommage et le cumul de dommage, aux tests SSLV135a pour ce qui est relatif aux chargements périodiques ainsi qu'aux tests SSLV135c pour le cas où le chargement est non périodique.

Pour l'utilisation de TYPE_CALCUL = 'FATIGUE_VIBR', on pourra se reporter au cas test sdlv129a.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

5.1 Calcul de la demi amplitude de cisaillement maximal par la méthode : 'CERCLE_EXACT'

Voir le cas test SSLV135a. Ici le chargement est périodique et le dommage est calculé aux points de Gauss.

5.2 Calcul du dommage lorsque le chargement est non périodique

Voir le cas test SSLV135b. Ici le chargement n'est pas périodique, le dommage est calculé aux points nœuds sur une partie de l'ensemble du maillage : les 'FACE1', 'FACE3' et 'FACE5'.

5.3 Calcul du dommage avec le critère FATESOCI_MODI_AV

Voir le cas test SSLV135b. Ici le chargement n'est pas périodique, le dommage est calculé aux nœuds sur une partie de l'ensemble du maillage : les 'FACE1', 'FACE2' et 'FACE3'.

5.4 Calcul du dommage avec les critères en formule

critère de 'MAKATE_MODI_AC' : Voir le cas test SSLV135a.
critère de 'DANG_VAN_MODI_AC' : Voir le cas test SSLV135a.
critère de 'MATAKE_MODI_AV' : Voir le cas test SSLV135b.
critère de 'DANG_VAN_MODI_AV' : Voir le cas test SSLV135b.
critère de 'FATESOCI_MODI_AV'. : Voir le cas test SSLV135b.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)