

Manuel d'Utilisation
Fascicule U4.8- : Post-traitement et analyses dédiées
Document : U4.83.02

Opérateur *CALC_FATIGUE*

1 But

Calculer un champ de dommage de fatigue subi par une structure et déterminer le plan critique dans lequel le cisaillement est maximal.

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 et stockée dans un concept résultat de type *evol_elas*, *evol_noli* ou *dyna_trans*, on calcule un champ de grandeur qui contient le dommage subi par la structure en chaque nœud ou en chaque point de Gauss.

Pour ce faire, en chaque nœud ou en chaque point de Gauss, *CALC_FATIGUE* :

- lit dans la structure de données résultat la contrainte équivalente de von Mises signée (*VMIS_SG*) ou le second invariant signé (*INVA_2SG*),
- extrait par une méthode de comptage de cycles (méthode RAINFLOW) les cycles élémentaires de chargement (histoire de la contrainte équivalente ou de la déformation équivalente) subis par la structure,
- détermine le dommage élémentaire associé à chaque cycle élémentaire,
- détermine le dommage total subi par la structure par une règle de cumul linéaire en sommant les dommages élémentaires.

Plan critique et cisaillement maximal : à partir d'une histoire de contraintes calculée aux points de Gauss (*SIEF_ELGA*, ou *SIEF_ELGA_DEPL*) ou aux nœuds (*SIEF_NOEU_ELGA* ou *SIGM_NOEU_DEPL*) et stockée dans un concept résultat de type *evol_elas* ou *evol_noli*, 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.

Produit un concept de type *cham_elem_DOMMAG* ou *cham_elem_FACY_R* ou *cham_no_FACY_R*.

2 Syntaxe

```
CHAM [cham_elem*] = CALC_FATIGUE (
  ♦ TYPE_CALCUL = / 'CUMUL_DOMMAGE',
                  / 'FATIGUE_MULTI',
# 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'historique de contrainte ou de déformation
  ♦ HISTOIRE = _F(
    ♦ RESULTAT = res, / [evol_elas]
                      / [evol_noli]
                      / [dyna_trans]
    ♦ EQUI_GD = / 'VMIS_SG', [DEFAULT]
                / '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',
              / 'DANG_VAN_MODI_AC',
  ♦ METHODE = / 'CERCLE_EXACT',
# Finsi
```

Titre : Opérateur *CALC_FATIGUE*
Auteur(s) : **J. ANGLES, A.M. DONORE**

Clé : *U4.83.02-E* Date : 18/02/05
Page : 3/18

```
# Si TYPE_CHARGE = 'NON_PERIODIQUE'

♦ CRITERE      = / 'DOMM_MAXI',
                  / 'DANG_VAN_MODI_AV',

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

◇ DELTA_OSCI   = / delta,
                  / 0.,
                                     [R]
                                     [DEFAULT]

# Finsi

/ ♦ MAILLAGE    = maillage,
                                     [maillage]

/ ◇ GROUP_MA    = grma,
                                     [l_gr_maille]

/ ◇ MAILLE      = ma,
                                     [l_maille]

/ ◇ GROUP_NO    = grno,
                                     [l_gr_noeud]

/ ◇ NOEUD       = no,
                                     [l_noeud]

    ◇ COEF_PREECROU = / coef_pre,
                      / 1.0,
                                     [R]
                                     [DEFAULT]

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

# Finsi

# Finsi

# Niveau d'impression

◇ INFO      = / 1,
               / 2,
                                     [DEFAULT]

)
```

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'`.

Le tableau suivant indique les mots clés qui sont utilisables en fonction du type de calcul choisi.

TYPE_CALCUL	Mot clé	Paragraphe
'CUMUL_DOMMAGE'	OPTION	3.2
'CUMUL_DOMMAGE'	HISTOIRE	3.3
'CUMUL_DOMMAGE'	DOMMAGE	3.4
'CUMUL_DOMMAGE'	MATER	3.5
'CUMUL_DOMMAGE'	TAHERI_NAPPE	3.6
'CUMUL_DOMMAGE'	TAHERI_FONC	3.7
'FATIGUE_MULTI'	TYPE_CHARGE	3.8
'FATIGUE_MULTI'	OPTION	3.9
'FATIGUE_MULTI'	RESULTAT	3.10
'FATIGUE_MULTI'	CHAM_MATER	3.11
'FATIGUE_MULTI'	CRITERE	3.12
'FATIGUE_MULTI'	METHODE	3.13
'FATIGUE_MULTI'	PROJECTION	3.14
'FATIGUE_MULTI'	DELTA_OSCI	3.15
'FATIGUE_MULTI'	GROUP_MA / MAILLE / GROUP_NO / NOEUD	3.16
'FATIGUE_MULTI'	COEF_PREECROU	3.17
'FATIGUE_MULTI'	MAILLAGE	3.18

3.2 Mot clé 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 EQUI_ELNO_SIGM (calculable par CALC_ELEM), 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 EQUI_ELGA_SIGM (calculable par CALC_ELEM), 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 EQUI_ELNO_EPSI, 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 EQUI_ELGA_EPSI, 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 : $\varepsilon = B.u - \varepsilon_{th}$.
La structure de données résultat spécifiée sous le mot clé facteur RESULTAT doit contenir le champ de nom symbolique EQUI_ELNO_EPME (calculable par CALC_ELEM), 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 : $\varepsilon = B.u - \varepsilon_{th}$.
La structure de données résultat spécifiée sous le mot clé facteur RESULTAT doit contenir le champ de nom symbolique EQUI_ELGA_EPME, qui définit entre autre la valeur de l'invariant d'ordre 2 signé (composante INVA_2SG) calculée aux points de Gauss.

3.3 Mot clé facteur HISTOIRE

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

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

3.3.1 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 EQUI_ELNO_SIGM, EQUI_ELGA_SIGM, EQUI_ELNO_EPSI, EQUI_ELGA_EPSI, EQUI_ELNO_EPME ou EQUI_ELGA_EPME selon l'option de calcul désirée.

3.3.2 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.

3.4 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

$$\Delta\sigma = |\sigma_{\max} - \sigma_{\min}| \text{ et une contrainte alternée } S_{alt} = 1/2 \Delta\sigma).$$

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 EQUI_ELNO_SIGM ou EQUI_ELGA_SIGM (calculables par CALC_ELEM).

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.

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 $\Delta\varepsilon = |\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}|$ 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 EQUI_ELNO_EPSI, EQUI_ELGA_EPSI, EQUI_ELNO_EPME ou EQUI_ELGA_EPME (calculables par CALC_ELEM).

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'

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 EQUI_ELNO_EPSI, EQUI_ELGA_EPSI, EQUI_ELNO_EPME ou EQUI_ELGA_EPME (calculables par CALC_ELEM).

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

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 :

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

$$\frac{\Delta \varepsilon_{i+1}^*}{2} = F_{\text{FONC}} \left(\frac{\Delta \sigma_{i+1}}{2} \right)$$

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 ($N_{\text{rupt}_{i+1}}$ = 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 $(i+1)$ = $1/N_{\text{rupt}_{i+1}}$).

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'.

◆ 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 EQUI_ELNO_EPSI, EQUI_ELGA_EPSI, EQUI_ELNO_EPME ou EQUI_ELGA_EPME (calculables par CALC_ELEM).

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

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 :

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

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 ($N_{\text{rupt}_{i+1}}$ = nombre de cycles à la rupture pour le cycle $(i+1)$ = $\text{WOHLER} \left(\frac{\Delta \sigma_{i+1}}{2} \right)$ et Dom_{i+1} = dommage du cycle $(i+1)$ = $1/N_{\text{rupt}_{i+1}}$).

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.

3.5 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'.

3.6 Opérande TAHERI_NAPPE

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

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

Remarque :

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

3.7 Opérande TAHERI_FONC

Cet opérande permet de spécifier le nom d'une fonction $F_{\text{FONC}}\left(\frac{\Delta\sigma}{2}\right)$ 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.

3.8 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.

3.9 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.

3.10 Opérande RESULTAT

♦ RESULTAT = res

Nom du concept résultat contenant les champs de contraintes définissant l'histoire de chargement. Plus précisément, le concept résultat doit contenir le champ de nom symbolique SIEF_ELGA et/ou SIEL_ELGA_DEPL et/ou SIEF_NOEU_ELGA et/ou SIGM_NOEU_DEPL.

3.11 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].

3.12 Opérande CRITERE

♦ CRITERE = / 'MATAKE',
/ 'DANG_VAN_MODI_AC',
/ 'DOMM_MAXI',
/ 'DANG_VAN_MODI_AV',

Permet de spécifier le nom du critère que devra satisfaire la demi amplitude de cisaillement maximal.

Notation :

\mathbf{n}^* : normale au plan dans lequel l'amplitude de cisaillement est maximale ;

$\Delta\tau(\mathbf{n})$: amplitude de cisaillement 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 précrouissage.

Critère de MATAKE

$$\frac{\Delta\tau}{2}(\mathbf{n}^*) + a N_{\max}(\mathbf{n}^*) \leq b \quad \text{éq 3.12-1}$$

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 :

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

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 ($\sigma_m \neq 0$).

En outre, nous définissons une contrainte équivalente au sens de MATAKE, 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 de DANG_VAN_MODI_AC

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

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 :

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

avec $\Delta \sigma_1$ l'amplitude de chargement pour le cas alterné ($\sigma_m = 0$) et $\Delta \sigma_2$ 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 DOMM_MAXI

Le critère `DOMM_MAXI` 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 ce 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.

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 :

$$\sigma_{eq}^i(\mathbf{n}) = \alpha \left(c_p \frac{\text{Max}(\tau_{p1}^i(\mathbf{n}), \tau_{p2}^i(\mathbf{n})) - \text{Min}(\tau_{p1}^i(\mathbf{n}), \tau_{p2}^i(\mathbf{n}))}{2} + a \text{Max}(N_{\text{max}1}^i(\mathbf{n}), N_{\text{max}2}^i(\mathbf{n}), 0) \right), \quad \text{éq 3.12-3}$$

avec \mathbf{n} la normale du plan courant, $\tau_{p1}^i(\mathbf{n})$ et $\tau_{p2}^i(\mathbf{n})$ les valeurs des contraintes de cisaillement projetées du sous-cycle i et $N_{\text{max}1}^i(\mathbf{n})$ et $N_{\text{max}2}^i(\mathbf{n})$ les contraintes normales maximales 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 `DOMM_A` et `COEF_CISA_TRAC` 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 :

$$D(\mathbf{n}) = \sum_{i=1}^k D^i(\mathbf{n}). \quad \text{éq 3.12-4}$$

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 :

$$D(\mathbf{n}^*) = \underset{\mathbf{n}}{\text{Max}}(D(\mathbf{n})).$$

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 DOMM_MAXI. La seule différence réside dans la définition de la contrainte équivalente élémentaire où la pression hydrostatique p remplace la contrainte normale maximale

N_{\max} :

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

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].

3.13 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].

3.14 Opérande PROJECTION

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].

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

3.15 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.

3.16 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.

3.17 Opérande COEF_PREECROU

- ◇ COEF_PREECROU = / coef_pre ,
/ 1.0,
Ce coefficient sert à prendre en compte l'effet d'un éventuel précrouissage.

3.18 Opérande MAILLAGE

- ◆ MAILLAGE = maillage ,
Permet de spécifier le nom du maillage donné par l'utilisateur.

3.19 Opérande INFO

- ◇ INFO = / 1

Impression :

- 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.

4 Exemple

On pourra se reporter au test SZLZ105 pour ce qui concerne le dommage et le cumul de dommage, aux tests SSLV135a et SSLV135b pour ce qui est relatif aux chargements périodiques ainsi qu'aux tests SSLV135c et SSLV135d pour le cas où le chargement est non périodique.

4.1 Calcul de l'histoire de chargement équivalente

```
DEPL = CALC_ELEM (      reuse      =  DEPL,
                        MODELE      =  CPLAN,
                        CHAM_MATER  =  MAT,
                        OPTION      =  ( 'SIEF_ELGA_DEPL',
                                         'EPSI_ELGA_DEPL',
                                         'EQUI_ELGA_SIGM',
                                         'EQUI_ELGA_EPSI',
                                         'EQUI_ELNO_SIGM',
                                         'EQUI_ELNO_EPSI',
                                         ),
                        RESULTAT    =  DEPL
                      )
```

4.2 Définition de la courbe de Wöhler du matériau et dommage associé

```
WOHL = DEFI_FONCTION (
    NOM_PARA      =  'SIGM',
    VALE          =  ( 0. , 1000.,
                      10. , 0. , ),
    PROL_DROITE   =  'LINEAIRE',
    PROL_GAUCHE   =  'LINEAIRE',
    TITRE         =  'FONCTION DE WOHLER'
)

# Définition du matériau

MATE = DEFI_MATERIAU (FATIGUE = _F (WOHLER = WOHL ) )

# Calcul du dommage aux noeuds à partir de l'histoire de contrainte de von
Mises signée (le chargement étant homogène à des contraintes, le dommage se
calcule par interpolation sur une courbe de Wöhler du matériau).
```

```
DMG_WOHL = CALC_FATIGUE (
    TYPE_CALCUL   =  'CUMUL_DOMMAGE' ,
    OPTION        =  'DOMA_ELNO_SIGM',

    HISTOIRE      = _F ( RESULTAT = DEPL,
                        EQUI_GD   = 'VMIS_SG',
                        )

    DOMMAGE       =  'WOHLER' ,
    MATER         =  MATE ,
    INFO          =  2
)
```

4.3 Définition de la courbe de Manson_Coffin du matériau et dommage associé

```

MANS = DEFI_FONCTION (
    NOM_PARA      = 'EPSI',
    VALE          = (      0.,      1000.,
                        10.,      0.,      ),
    PROL_DROITE   = 'LINEAIRE',
    PROL_GAUCHE   = 'LINEAIRE',
    TITRE         = 'FONCTION DE MANSON COFFIN'
)

# Définition du matériau

MAT1 = DEFI_MATERIAU (FATIGUE = _F (MANSON_COFFIN = MANS ) )

# Calcul du dommage aux noeuds à partir de l'histoire de la valeur de
# l'invariant d'ordre 2 signé (le chargement étant homogène à des déformations,
# le dommage se calcule par interpolation sur une courbe de Manson_Coffin du
# matériau).

DMG_MCOF = CALC_FATIGUE (
    TYPE_CALCUL = 'CUMUL_DOMMAGE',
    OPTION      = 'DOMA_ELNO_EPSI',
    HISTOIRE    = _F( RESULTAT = DEPL,
                      EQUI_GD  = 'INVA_2_SG',
                      ),
    DOMMAGE     = 'MANSON_COFFIN',
    MATER       = MAT1,
    INFO        = 2
)

```

4.4 Définition des courbes d'écrouissage cyclique et d'écrouissage cyclique avec pré-contrainte

```

F_NAPPE = DEFI_NAPPE (
    NOM_PARA      = 'X',
    PROL_DROITE   = 'LINEAIRE',
    PROL_GAUCHE   = 'LINEAIRE',
    PARA         = (0.5, 1.),
    NOM_PARA_FONC = 'EPSI',
    DEFI_FONCTION = _F( PROL_DROITE = 'LINEAIRE',
                        PROL_GAUCHE = 'LINEAIRE',
                        VALE        = ( 0., 25.,
                                        10., 525.),
                        ),
                        _F( PROL_DROITE = 'LINEAIRE',
                        PROL_GAUCHE = 'LINEAIRE',
                        VALE        = ( 0., 50.,
                                        10., 550.)),
    TITRE         = 'NAPPE de TAHERI' )

F_FONC = DEFI_FONCTION (
    NOM_PARA      = 'SIGM',
    PROL_DROITE   = 'LINEAIRE',
    PROL_GAUCHE   = 'LINEAIRE',
    PARA         = (      0.,      0.,
                        100.,     10.),
    TITRE         = 'FONCTION de TAHERI' )

```

4.5 Calcul du dommage par les méthodes 'TAHERI_MANSON' et 'TAHERI_MIXTE'

```

MAT2 = DEFI_MATERIAU (
    FATIGUE = _F (    WOHLER = WOHL,
                    MANSON_COFFIN = MANS ) )

DMG_TMA = CALC_FATIGUE (
    TYPE_CALCUL = 'CUMUL_DOMMAGE',

    OPTION      = 'DOMA_ELNO_EPSI',

    HISTOIRE    = _F(    RESULTAT = DEPL,
                        EQUI_GD   = 'INVA_2_SG'
                    )

    DOMMAGE     = 'TAHERI_MANSON',
    MATER       = MAT2,
    TAHERI_NAPPE = F_NAPPE,
    TAHERI_FONC  = F_FONC,
    INFO        = 2
                )

DMG_TMI = CALC_FATIGUE (
    TYPE_CALCUL = 'CUMUL_DOMMAGE',

    OPTION      = 'DOMA_ELNO_EPSI',

    HISTOIRE    = _F(    RESULTAT = DEPL,
                        EQUI_GD   = 'INVA_2_SG'
                    ),

    DOMMAGE     = 'TAHERI_MIXTE',
    MATER       = MAT2,
    TAHERI_NAPPE = F_NAPPE,
    INFO        = 2
                )

```

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

Cet exemple est tiré du cas test SSLV135a. Ici le chargement est périodique et le dommage est calculé aux points de Gauss.

```

ACIER = DEFI_MATERIAU ( ELAS      = _F( E      = 200000.,
                                         NU      = .3,
                                         ALPHA   = 0. ),
    FATIGUE      = _F( WOHLER   = WHOL, ),
    CISA_PLAN_CRIT = _F( CRITERE = 'MATAKE',
                        COEF_FLEX_TORS = 1.5,
                        MATAKE_A   = 1.0,
                        MATAKE_B   = 2.0, )
                )

MAT = AFFE_MATERIAU ( MAILLAGE = CUBE,
    AFFE      = _F( TOUT      = 'OUI',
                    MATER     = ACIER,
                    TEMP_REF  = 20. )
                )

```


Titre : *Opérateur CALC_FATIGUE*
 Auteur(s) : *J. ANGLES, A.M. DONORE*

Date : *18/02/05*
 Clé : *U4.83.02-E* Page : *17/18*

```

SOL_NL = STAT_NON_LINE ( TITRE      =
                        'TEST TRACTION-COMPRESSION ALTERNEE - PLAN CRITIQUE',
                        MODELE      = TROISD,
                        CHAM_MATER = MAT,
                        EXCIT       = _F ( CHARGE      = TR_CS,
                        FONC_MULT   = COEF,
                        TYPE_CHARGE = 'FIXE_CSTE' ),
                        COMP_ELAS  = _F ( RELATION     = 'ELAS',
                        DEFORMATION = 'PETIT',
                        TOUT        = 'OUI' ),
                        INCREMENT  = _F ( LIST_INST    = LINST, ),
                        NEWTON      = _F ( MATRICE      = 'ELASTIQUE',
                        REAC_INCR   = 0 ) )

FATI_NL=CALC_FATIGUE( TYPE_CALCUL  = 'FATIGUE_MULTI',
                      OPTION        = 'DOMA_ELGA',
                      TYPE_CHARGE   = 'PERIODIQUE',
                      RESULTAT       = SOL_NL,
                      CHAM_MATER     = MAT,
                      CRITERE        = 'MATAKE',
                      COEF_PREECROU = 1.0,
                      METHODE        = 'CERCLE_EXACT'
                      )

```

4.7 Calcul du dommage lorsque le chargement est non périodique

Cet exemple est tiré du cas test SSLV135d. 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'.

```

ACIER = DEFI_MATERIAU ( ELAS      = _F( E      = 200000.,
                                         NU      = .3,
                                         ALPHA    = 0. ),
                      FATIGUE     = _F( WOHLER   = WHOL, ),
                      CISA_PLAN_CRIT = _F( CRITERE = 'DANG_VAN_MODI_AV',
                                         D_VAN_A  = 1.0,
                                         D_VAN_B  = 2.0,
                                         COEF_CISA_TRAC = 1.5 )
                      )

MAT = AFFE_MATERIAU ( MAILLAGE    = CUBE,
                     AFFE         = _F ( TOUT      = 'OUI',
                                         MATER      = ACIER,
                                         TEMP_REF   = 20. ) )

SOL_L = MECA_STATIQUE ( TITRE      =
                        'TEST TRACTION-COMPRESSION ALTERNEE - DANG_VAN_MODI_AV',
                        MODELE      = TROISD,
                        CHAM_MATER = MAT,
                        EXCIT       = _F ( CHARGE      = TR_CS,
                        FONC_MULT   = COEF ),
                        LIST_INST   = LINST,
                        )

SOL_L = CALC_ELEM( reuse    = SOL_L,
                  RESULTAT  = SOL_L,
                  OPTION     = 'SIGM_ELNO_DEPL',
                  )

SOL_L = CALC_NO( reuse    = SOL_L,
                 RESULTAT  = SOL_L,
                 OPTION     = 'SIGM_NOEU_DEPL',
                 )

```

Titre : Opérateur CALC_FATIGUE
Auteur(s) : J. ANGLES, A.M. DONORE

Date : 18/02/05
Clé : U4.83.02-E Page : 18/18

```
FATI_LNO2=CALC_FATIGUE( TYPE_CALCUL      = 'FATIGUE_MULTI',  
                        OPTION            = 'DOMA_NOEUD',  
                        TYPE_CHARGE       = 'NON_PERIODIQUE',  
                        RESULTAT          = SOL_L,  
                        CHAM_MATER        = MAT,  
                        GROUP_MA           = ( 'FACE1', 'FACE3', 'FACE5' ),  
                        MAILLAGE           = CUBE,  
                        CRITERE            = 'DANG_VAN_MODI_AV',  
                        COEF_PREECROU      = 1.0,  
                        PROJECTION         = 'DEUX_AXES',  
                        )
```