

---

## 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.

**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 uniaxial.

Produit un concept de type `cham_elem` ou `cham_no`.

## 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'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_MODI_AC',  
                 / 'DANG_VAN_MODI_AC',  
                 / 'VMIS_TRESCA',  
  
    # Si CRITERE != 'VMIS_TRESCA'
```

```

    ♦ METHODE      = / 'CERCLE_EXACT',

    # Finsi

# Finsi

# Si TYPE_CHARGE = 'NON_PERIODIQUE'

♦ CRITERE          = / 'MATAKE_MODI_AV',
                    / 'DANG_VAN_MODI_AV',
                    / 'FATESOCI_MODI_AV',
                    / 'VMIS_TRESCA',

    # Si CRITERE != 'VMIS_TRESCA'

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

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

    # Finsi

# Finsi

/ ♦ GROUP_MA       = grma, [l_gr_maille]
/ ♦ MAILLE         = ma, [l_maille]
/ ♦ GROUP_NO       = grno, [l_gr_noeud]
/ ♦ NOEUD          = no, [l_noeud]
    ♦ COEF_PREECROU= / coef_pre, [R]
                    / 1.0, [DEFAULT]

# 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,  
              / 2,  
              )  
              [DEFAULT]
```

## 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.....	8
3.3.4 Opérande TAHERI_NAPPE.....	11
3.3.5 Opérande TAHERI_FONC.....	11
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 METHODE.....	16
3.4.7 Opérande PROJECTION.....	16
3.4.8 Opérande DELTA_OSCI.....	16
3.4.9 Opérandes GROUP_MA / MAILLE / GROUP_NO / NOEUD.....	16
3.4.10 Opérande COEF_PREECROU.....	16
3.4.11 Opérande MAILLAGE.....	17
3.5 Opérandes spécifiques au calcul de type FATIGUE_VIBR .....	17
3.5.1 Principe du calcul.....	17
3.5.2 Mot clé facteur HISTOIRE .....	18
3.5.2.1 Opérande RESULTAT.....	18
3.5.2.2 Opérande MODE_MECA.....	18
3.5.2.3 Opérande NUME_MODE.....	18
3.5.2.4 Opérande FACT_PARTICI.....	18
3.5.3 Opérande OPTION.....	18
3.5.4 Opérande CORR_SIGM_MOYENNE .....	19
3.5.5 Opérande DOMMAGE .....	19
4 Exemples.....	20
4.1 Calcul de l'histoire de chargement équivalente.....	20

<a href="#">4.2 Définition de la courbe de Wöhler du matériau et dommage associé.....</a>	<a href="#">20</a>
<a href="#">4.3 Définition de la courbe de Manson_Coffin du matériau et dommage associé.....</a>	<a href="#">21</a>
<a href="#">4.4 Définition des courbes d'écrouissage cyclique et d'écrouissage cyclique avec pré-contrainte..</a>	<a href="#">21</a>
<a href="#">4.5 Calcul du dommage par les méthodes 'TAHERI_MANSON' et 'TAHERI_MIXTE'.....</a>	<a href="#">21</a>
<a href="#">4.6 Calcul de la demi amplitude de cisaillement maximal par la méthode : 'CERCLE_EXACT'.....</a>	<a href="#">22</a>
<a href="#">4.7 Calcul du dommage lorsque le chargement est non périodique.....</a>	<a href="#">23</a>
<a href="#">4.8 Calcul du dommage avec le critère FATESOCI_MODI_AV.....</a>	<a href="#">24</a>

### 3 Opérandes

### 3.1 Mot clé TYPE CALCUL

- 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 le dernier cas, on connaît 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 §17.

## 3.2 Opérandes communs à toutes les options

### 3.2.1 Opérande MATER

- ◆ MATER = mater

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

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

### 3.3 Opérands spécifiques au calcul de type CUMUL DOMMAGE

### 3.3.1 Mot clé facteur HISTOIRE

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\_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 SIEQ\_ELGA (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 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\_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 :  $\varepsilon = B \cdot u - \varepsilon_{th}$ .



- 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.

### 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  $\Delta\sigma = |\sigma_{max} - \sigma_{min}|$  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\_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 EPEQ\_ELNO, EPEQ\_ELGA, EPMQ\_ELNO ou EPMQ\_ELGA (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 EPEQ\_ELNO, EPEQ\_ELGA, EPMQ\_ELNO ou EPMQ\_ELGA (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 :

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

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  $(i+1)$ ) =  $MANSON\_COFFIN \left( \frac{\Delta \varepsilon_{i+1}^*}{2} \right)$  et  $Dom_{i+1}$  = dommage du cycle  $(i+1) = \frac{1}{Nrupt_{i+1}}$ ).

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' .

♦ 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\_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 :

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

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 :**

*| 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 Opérands 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 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 et/ou SIGM\_NOEU.

### 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

♦ CRITERE = / 'MATAKE\_MODI\_AC',  
/ 'DANG\_VAN\_MODI\_AC',  
/ 'MATAKE\_MODI\_AV',  
/ 'DANG\_VAN\_MODI\_AV',  
/ 'FATESOCI\_MODI\_AV',

/ 'VMIS\_TRESCA',

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 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  $\mathbf{n}$  ;  
 $\tau_0$  : 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 ;  
 $\sigma_y$  : limite d'élasticité.

### Critère MATAKE\_MODI\_AC

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

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

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 ( $\sigma_m \neq 0$ ).

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

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

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] :

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

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 ( $\sigma_m = 0$ )  $\Delta \sigma_2$  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  $\sigma_{eq}(\mathbf{n}^*)$  :

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

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.

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  $\tau_p = f(t)$  temps . Après avoir extrait les sous-cycles élémentaires de  $\tau_p$  avec la méthode RAINFLOW nous définissons une contrainte équivalente élémentaire pour tout sous-cycle élémentaire  $i$  :

$$\sigma_{eq}^i(\mathbf{n}) = \alpha \left( c_p \frac{\text{Max}(\tau_{p1}^i(\mathbf{n}), \tau_{p2}^i(\mathbf{n})) - \text{Min}(\tau_{p1}^i(\mathbf{n}), \tau_{p2}^i(\mathbf{n}))}{2} + a \text{Max}(N_1^i(\mathbf{n}), N_2^i(\mathbf{n}), 0) \right) \quad \text{éq 3.12-3}$$

avec  $\mathbf{n}$  la normale du plan courant,  $\tau_{p1}^i(\mathbf{n})$  et  $\tau_{p2}^i(\mathbf{n})$  s valeurs des contraintes de cisaillement projetées du sous-cycle  $i$  et  $N_1^i(\mathbf{n})$  et  $N_2^i(\mathbf{n})$  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]  $\alpha$  est un terme correctif qui permet d'utiliser une courbe de fatigue en traction-compression. Les constantes  $a$  et  $\alpha$  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 :

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

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 :

$$D(\mathbf{n}^*) = \max_{\mathbf{n}} (D(\mathbf{n}))$$

### 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 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  $N_{max}$  :

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

Les constantes  $a$  et  $\alpha$  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 elastoplastique. 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 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  $i$  :

$$\varepsilon_{eq}^i(\mathbf{n}) = \alpha c_p \left( \frac{\max(\gamma_{p1}^i(\mathbf{n}), \gamma_{p2}^i(\mathbf{n})) - \min(\gamma_{p1}^i(\mathbf{n}), \gamma_{p2}^i(\mathbf{n}))}{2} \right) \left( 1 + a \max(N_1^i(\mathbf{n}), N_2^i(\mathbf{n}), 0) \right) \quad \text{éq 3.12-5}$$

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  $D^i(\mathbf{n}) = 1/N^i(\mathbf{n})$ .

Dans l'équation [éq 3.12-5]  $\alpha$  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  $\alpha$  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  $\alpha$  (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 :

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

### 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 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].

### 3.4.7 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.

### 3.4.8 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



### 3.4.9 Opérandes GROUP MA / MAILLE / GROUP NO / NOEUD

- ### 3.4.10 Opérande COEF PREECROU

- ### 3.4.11 Opérande MAILLAGE

- ### 3.5 Opérands spécifiques au calcul de type FATIGUE VIBR

### 3.5.1 Principe du calcul

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

- Calcul de la contrainte liée au chargement statique  $\sigma_{stat}$  avec MECA\_STATIQUE ou STAT\_NON\_LINE ;
- Calcul des contraintes associées aux  $N$  modes propres considérés  $\sigma_{mod}^i$  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  $(\beta_i)_{1 \leq i \leq N}$  (correspond à l'opérande FACT\_PARTICI) :

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

où  $\omega_i$  et  $\phi_i$  sont respectivement la pulsation (connue) et le déphasage (inconnu) du mode  $i$ .  
Le coefficient  $\alpha$  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. § 19). On note  $f$  le critère que doit vérifier l'amplitude maximale de variation de la contrainte  $S_{alt}^{max}$ .  $f$  dépend de la limite d'endurance  $S_l$  et de la limite à la rupture  $S_u$  du matériau :

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

- Sur tous les nœuds ou points de Gauss du maillage (selon le choix dans OPTION) :

- Calcul de l'amplitude de variation des contraintes :  $S_{alt} = \alpha \sum_{i=1}^N \beta_i \sigma_{mod}^i$  (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  $\alpha$  correspondant à une endurance illimitée :

$$\alpha = \frac{f(\sigma_{stat}, S_l, S_u)}{\sum_{i=1}^N \beta_i \sigma_{mod}^i}$$

- Interprétation et utilisation du résultat de CALC\_FATIGUE : l'opérateur fournit le champ (aux nœuds ou au point de Gauss) des valeurs admissibles de  $\alpha$  : la valeur minimale de  $\alpha$  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  $\alpha$  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  $\tilde{u}_{mod}^i$  le déplacement au point d'intérêt associé au mode  $i$  ; l'amplitude de vibration admissible en ce point est alors :

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

#### 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).

### 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\_ELEM, 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. § 17 ).

## 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 (opérands RESULTAT et MODE\_MECA) doivent contenir le champ de nom symbolique SIEQ\_ELNO (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.

Les résultats statiques et modaux (opérands RESULTAT et MODE\_MECA) doivent contenir le champ de nom symbolique SIEQ\_ELGA (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.

### 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.

La prise en compte de la contrainte moyenne  $\sigma_m$  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.

## 4 Exemples

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.

Pour l'utilisation de TYPE\_CALCUL = 'FATIGUE\_VIBR', on pourra se reporter au cas test sdlv129a.

### 4.1 Calcul de l'histoire de chargement équivalente

```
DEPL = CALC_ELEM (      reuse      = DEPL,
                        MODELE      = CPLAN,
                        CHAM_MATER  = MAT,
                        OPTION      = ( 'SIEF_ELGA',
                                       'EPSI_ELGA',
                                       'SIEQ_ELGA',
                                       'EPEQ_ELGA',
                                       'SIEQ_ELNO',
                                       'EPEQ_ELNO',
                                       ),
                        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'historique 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_MODI_AC',  
                        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. )
)
```



```
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_MODI_AC',  
    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',  
    )
```

```
SOL_L = CALC_NO( reuse      = SOL_L,
                  RESULTAT  = SOL_L,
                  OPTION    = 'SIGM_NOEU'
                )
FATI_LNO2=CALC_FATIGUE( TYPE_CALCUL  = 'FATIGUE_MULTII',
                       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',
                )
```

## 4.8 Calcul du dommage avec le critère FATESOCI\_MODI\_AV

Cet exemple est tiré du cas test SSLV135e. 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'.

```
ACIER = DEFI_MATERIAU(
    ELAS      = _F( E      = 200000.,
                    NU     = 0.3,
                    ALPHA  = 0.0 ),
    FATIGUE    = _F( MANSO_N_COFFIN = MANCOF, ),
    CISA_PLAN_CRIT = _F( CRITERE = 'FATESOCI_MODI_AV',
                        FATSOC_A = 1.0,
                        COEF_CISA_TRAC = 1.5 )
)

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

# CALCUL AVEC STAT_NON_LINE
# -----

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

SOL_NL = CALC_ELEM( reuse      = SOL_NL,
                    RESULTAT  = SOL_NL,
                    OPTION    = ('EPSI_ELGA',
                                'SIEF_ELNO',
```

```
                                'EPSI_ELNO')
                                )

SOL_NL = CALC_NO( reuse      = SOL_NL,
                  RESULTAT = SOL_NL,
                  TOUT      = 'OUI',
                  GROUP_MA_RESU = ('FACE1', 'FACE2', 'FACE3'),
                  OPTION      = ('SIEF_NOEU', 'EPSI_NOEU')
                )

F_NLNO2A=CALC_FATIGUE(
    TYPE_CALCUL      = 'FATIGUE_MULTI',
    OPTION            = 'DOMA_NOEUD',
    TYPE_CHARGE       = 'NON_PERIODIQUE',
    RESULTAT          = SOL_NL,
    CHAM_MATER        = MAT,
    COEF_PREECROU     = 1.0,
    GROUP_MA          = ('FACE1', 'FACE2', 'FACE3'),
    MAILLAGE          = CUBE,
    TERE              = 'FATESOCI_MODI_AV',
    PROJECTION        = 'DEUX_AXES',
    )
```