SSLV135 – Critères d'amorçage en fatigue sous chargements multi-axiaux pour une structure

Résumé :

Ce cas-test a pour objectif de tester l'opérateur CALC_FATIGUE qui calcule l'endommagement pour tous les points de la structure.

La géométrie traitée ici est un cube sans défaut avec lequel on réalise un calcul mécanique élastique linéaire suivi du calcul du plan de cisaillement critique en chaque point de Gauss et en chaque nœud.

- modélisation A : critères MATAKE_MODI_AC, DANG_VAN_MODI_AC, VMIS_TRESCA, critère en formule, chargement périodique et bi-axial proportionnel ;
- modélisation B : critère MATAKE_MODI_AV, DANG_VAN_MODI_AV, FATESOCI_MODI_AV, critère en formule, chargement non-périodique et bi-axial proportionnel ;
- modélisation C : critères MATAKE_MODI_AC et DANG_VAN_MODI_AV, critère en formule, chargement multi-axiaux, non-proportionnel ;
- modélisation D : critère en formule, tester des nouvelles grandeurs, chargement uni-axial élasto-plastique et périodique.
- modélisation E : critère en formule, tester des nouvelles grandeurs (en contraintes) , chargement bi-axial élasto-plastique et non-périodique.
- modélisation F : critère en formule, tester des nouvelles grandeurs (en déformations) , chargement bi-axial élastique à amplitude variable et chargement uni-axial élasto-plastique et non-périodique.
- modélisation G : critères MATAKE_MODI_AC, DANG_VAN_MODI_AC,MATAKE_MODI_AV, DANG_VAN_MODI_AV, FATESOCI_MODI_AV. On teste le changement de la direction du plan critique sur lequel le dommage ou le cisaillement est maximum.
- modélisation H : critères en formule du type plan critique avec le mot-clé FORMULE_CRITIQUE
- modélisation I : critère en formule, identique à la modélisation F (chargement bi-axial élastique à amplitude variable) .

Les critères dans la modélisation A sont dits « à plan de cisaillement critique », ils sont adaptés aux chargements périodiques. Les critères dans la modélisation B peuvent être qualifiés de critères « à plan de dommage critique », ils

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

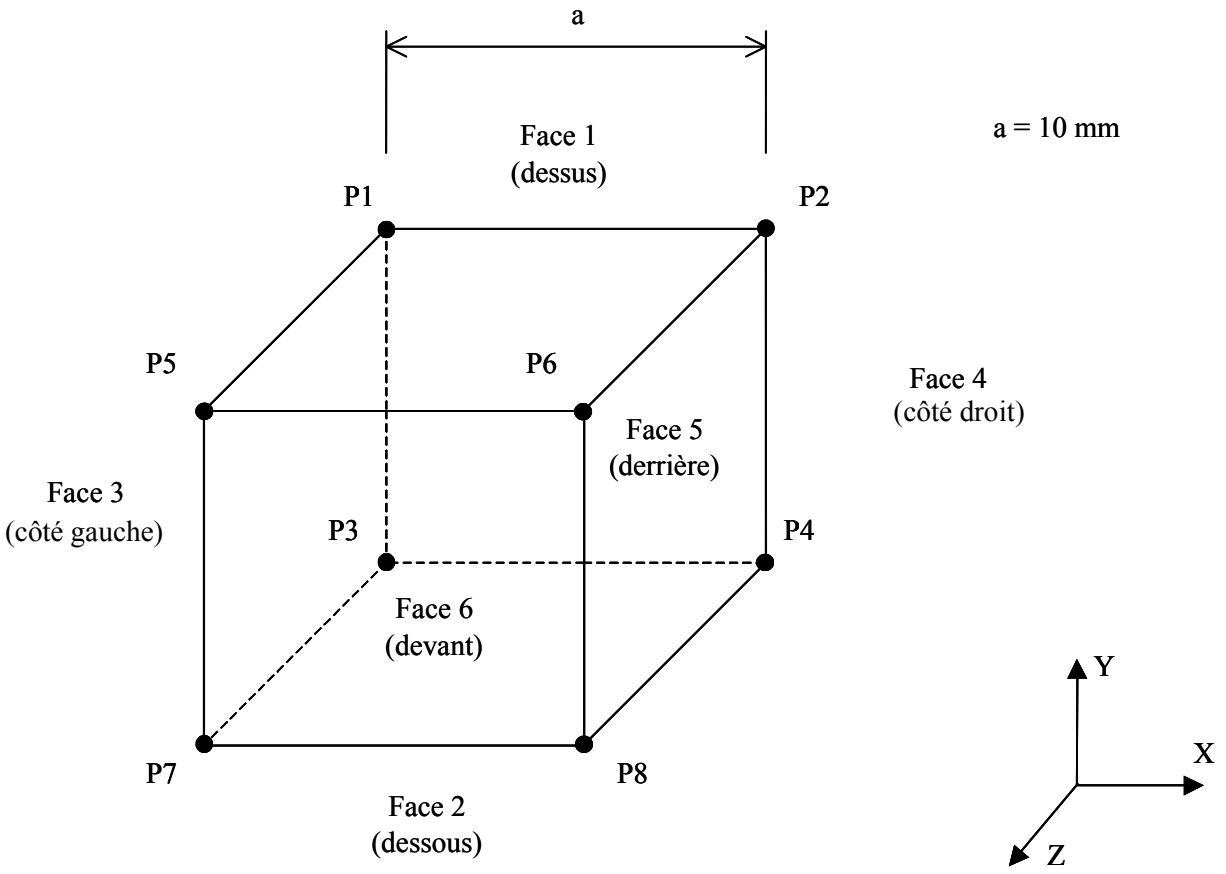
peuvent être utilisés lorsque le chargement est non périodique. Le critère VMIS_TRESCA n'est pas un critère de fatigue, il détermine la variation d'amplitude maximale du tenseur des contraintes. Les critères en formule permettant à l'utilisateur de construire des critères en fonctions des grandeurs pré-définies sont également testés. Les critères dans la modélisation H sont dits « à plan critique général », ils sont adaptés aux chargements périodiques. La modélisation I reprend le cas élastique de la modélisation F.

Remarque : les modélisations B, E et F sont dans la base de validation et non dans la base de vérification. Ils ne sont donc pas accessibles à l'extérieur d'EDF.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1 Problème de référence

1.1 Géométrie



Le cube a $10\,mm$ de côté.

1.2 Propriétés de matériaux

1.2.1 Modélisations : A, B, C, F et I

Module d'Young : $E=200000\,MPa$
Coefficient de Poisson : $\nu=0.3$

1.2.2 Modélisations D et H

Le module d'Young et le coefficient de Poisson sont identiques à ceux des autres modélisations.
Limite élastique du matériau : $\sigma_o=150.0\,MPa$
Le comportement élasto-plastique de Von Mises à écrouissage isotrope linéaire avec la pente de courbe d'écrouissage : $H=50000.0\,MPa$

1.2.3 Modélisation E

Le module d'Young et le coefficient de Poisson sont identiques à ceux des autres modélisations.
Limite élastique du matériau : $\sigma_o=900.0\,MPa$

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Le comportement élasto-plastique de Von Mises à écrouissage isotrope linéaire avec la pente de courbe d'écrouissage : $H=50000.0\ MPa$

1.2.4 Modélisation F et I

Dans cette modélisation, deux matériaux différents sont considérés. Le premier est similaire au paragraphe 1.2.1 (c'est-à-dire purement élastique), et le second est similaire au matériau utilisé dans la modélisation E (1.2.3).

1.2.5 Modélisation G

Dans cette modélisation, deux matériaux différents sont considérés.
Le premier matériau est élastique avec le module d'Young : $E=193000\ MPa$ et le coefficient de Poisson : $\nu=0.3$
Le deuxième matériau est élasto-plastique, le module d'Young et le coefficient de Poisson sont identiques au premier matériau. Limite élastique du matériau : $\sigma_o=208.0\ MPa$. Le comportement élasto-plastique de Von Mises à écrouissage isotrope linéaire avec la pente de courbe d'écrouissage : $H=50000.0\ MPa$

1.3 Courbes de Wöhler et de Manson-Coffin

Les modélisations utilisent toutes les courbes de Wöhler (c'est-à-dire une courbe en contrainte) et de Manson-Coffin (c'est-à-dire une courbe en déformation).

Voici la courbe de Wöhler (traction-compression alternée contrôlée en contrainte) :

Demi amplitude de contrainte (MPa)	138.0	152.0	165.0	180.0	200.0	250.0	295.0
Nombre de cycles	1.0E+6	5.0E+5	2.0E+5	1.0E+5	5.0E+4	2.0E+4	1.2E+4
Demi amplitude de contrainte (MPa)	305.0	340.0	430.0	540.0	690.0	930.0	1210.0
Nombre de cycles	1.0E+4	5.0E+3	2.0E+3	1.0E+3	5.0E+2	2.0E+2	1.0E+2
Demi amplitude de contrainte (MPa)	1590.0	2210.0	2900.0				
Nombre de cycles	5.0E+1	2.0E+1	1.0E+1				

Tableau 1.3-1 : Courbe de Wöhler

Voici la courbe de Manson-Coffin (traction-compression alternée contrôlée en déformation) :

Déformation	0.00226	0.0023	0.0025	0.0027	0.003	0.0035
Nombre de cycles	5.8E+6	4.6E+6	2.39284E+5	1.49535E+5	7.3544E+4	3.3821E+4
Déformation	0.006	0.0085	0.010	1.000		
Nombre de cycles	2.85E+3	1.068E+3	5.62E+2	1.0		

Tableau 1.3-2 : Courbe de Manson-Coffin

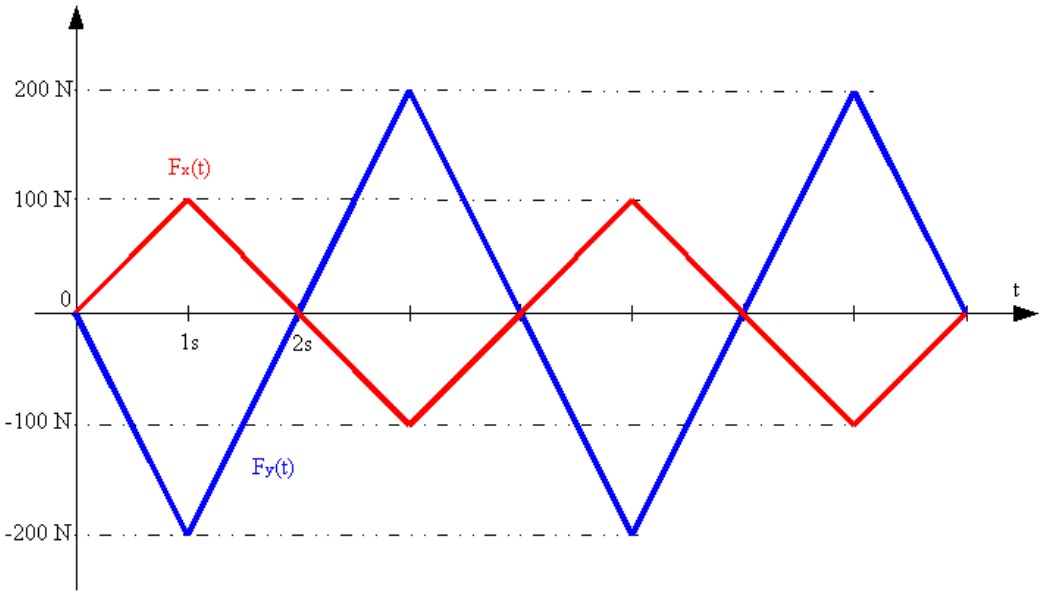
1.4 Conditions aux limites et chargements

1.4.1 Modélisations : A, B

- Les déplacements selon l'axe X de la face 3 sont bloqués ($DX=0.0$).
- Les déplacements selon l'axe Y de la face 2 sont bloqués ($DY=0.0$).
- Les déplacements du point $P3$ sont bloqués selon l'axe Z ($DZ=0.0$).
- Nous appliquons un chargement bi-axial alterné (traction-compression) selon les axes X et Y. $Fx(t)$ représente les efforts alternés appliqués sur la face 4 selon l'axe X et $Fy(t)$ représente les efforts alternés appliqués sur la face 1 selon l'axe Y.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

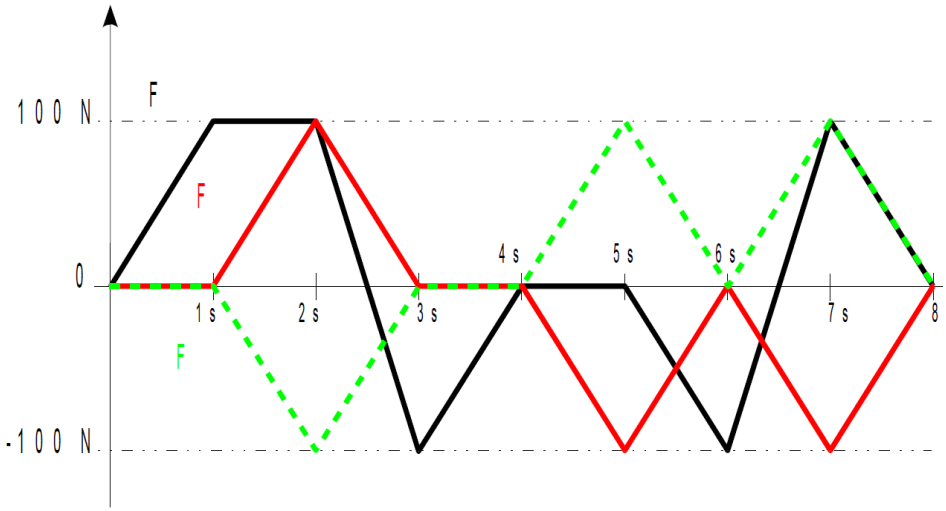
Chargement pour ces modélisations :



1.4.2 Modélisation C

- Les déplacements selon l'axe X de la face 3 sont bloqués ($DX=0.0$).
- Les déplacements selon l'axe Y de la face 3 sont bloqués ($DY=0.0$).
- Les déplacements selon l'axe Z de la face 2 sont bloqués ($DZ=0.0$).
- Nous appliquons un chargement multi-axial : traction-compression selon l'axe X, cisaillement selon les axes Y et Z. $Fx(t)$ représente les efforts appliqués sur la face 4 selon l'axe X, $Fy(t)$ représente les efforts appliqués sur la face 4 selon l'axe Y et $Fz(t)$ représente les efforts appliqués sur la face 1 selon l'axe Z.

Chargement pour cette modélisation :



1.4.3 Modélisations D et H

- Les déplacements selon l'axe X de la face 3 sont bloqués ($DX=0.0$).

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- Les déplacements selon l'axe Y de la face 3 sont bloqués ($DY=0.0$).
- Les déplacements selon l'axe Z de la face 2 sont bloqués ($DZ=0.0$).
- Dans cette modélisation, nous appliquons un chargement uni-axial périodique.

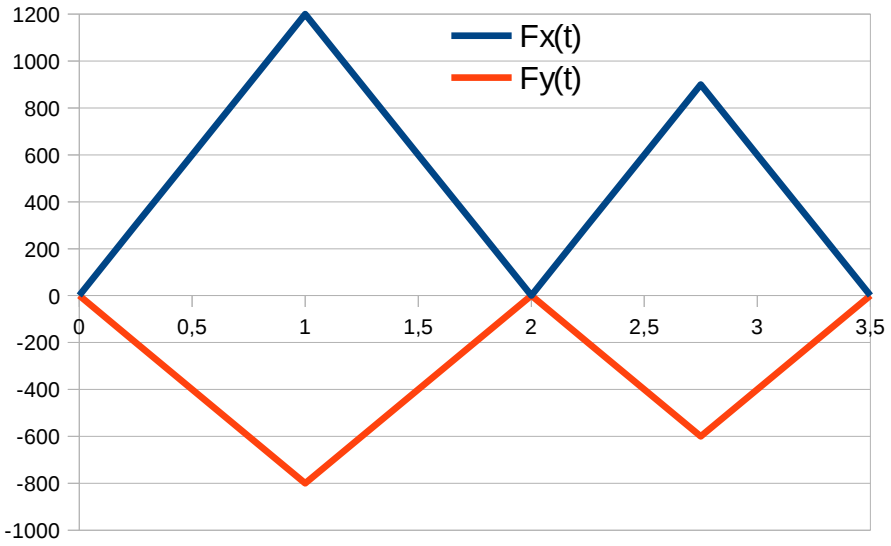
t	0	1	2	3	4	5	6
$Fx(t)$	0	200	0	-200	0	200	0

On note que cette histoire de chargement entraîne une déformation plastique dans le calcul. On note également que l'histoire de chargement monotone entre $t=0$ et $t=1$ (la partie du chargement monotone) n'est pas prise en compte dans le calcul de fatigue.

1.4.4 Modélisation E

- Les déplacements bloqués ici sont les mêmes que dans la modélisation O
- Nous appliquons ici un chargement bi-axial non-périodique.

t	0	1	2	2,75	3,5
$Fx(t)$	0	1200	0	900	0
$Fy(t)$	0	-800	0	-600	0



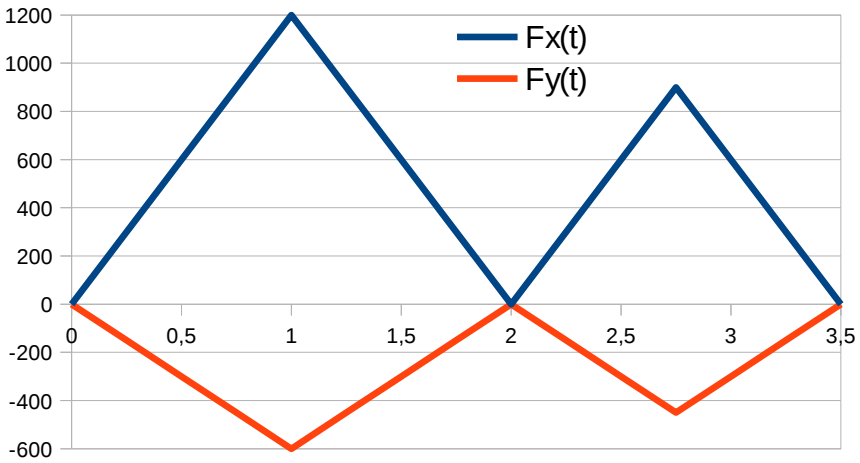
1.4.5 Modélisation F et I

- Les déplacements bloqués ici sont les mêmes que dans la modélisation O
- Dans cette modélisation, nous appliquons trois chargements distincts. Le premier est bi-axial, le deux autres sont uni-axiaux.

Premier chargement (association de `TR_CS` et de `COEF` dans le fichier de commande) :

t	0	1	2	2,75	3,5
$Fx(t)$	0	1200	0	900	0
$Fy(t)$	0	-600	0	-450	0

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)



Deuxième chargement (association de TR_CS2 et de COEF2 dans le fichier de commande) :

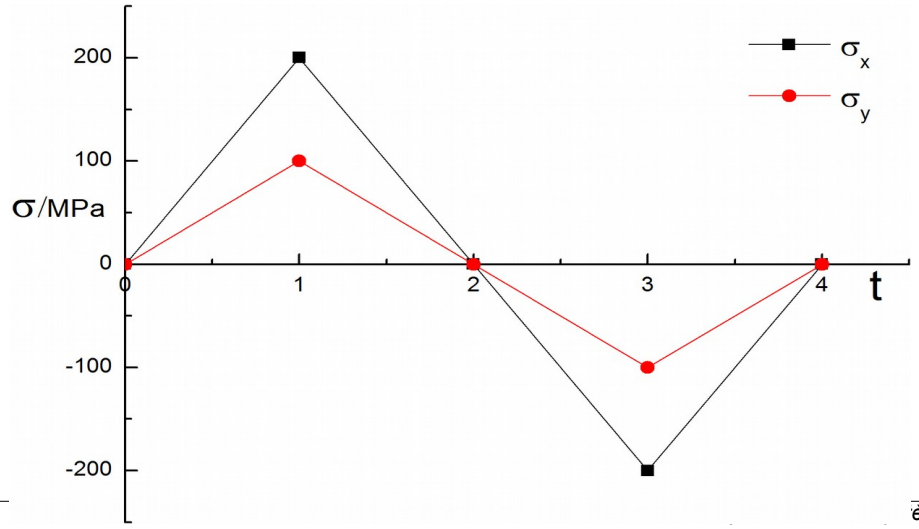
t	0	1	2,5625	3,5625	5,5625
$Fx(t)$	0	1200	-675	900	-675

Troisième chargement (association de TR_CS2 et de COEF3 dans le fichier de commande) :

t	0	1	2	3	4
$Fx(t)$	0	1800	-600	2400	-1200

1.4.6 Modélisation G

- Les déplacements bloqués ici sont les mêmes que dans la modélisation A
- Nous appliquons un chargement bi-axial alterné (traction-compression) selon les axes X et Y. σ_x représente les efforts alternés appliqués sur la face 4 selon l'axe X et σ_y représente les efforts alternés appliqués sur la face 1 selon l'axe Y.
- Pour étudier des effets de la contrainte moyenne sur l'orientation du plan critique, seuls des chargements bi-axiaux, proportionnels selon directions de X et Y sont considérés.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- Deux paramètres sont définis

$$\lambda=\frac{\sigma_{y,a}}{\sigma_{x,a}}$$

$$\alpha=\frac{\sigma_{y,m}}{\sigma_{y,a}}=\frac{\sigma_{x,m}}{\sigma_{x,a}}$$

où $\sigma_{x,a}$, $\sigma_{y,a}$ représentent des amplitudes des contraintes selon X et Y, respectivement. $\sigma_{x,m}$ et $\sigma_{y,m}$ représentent les valeurs des contraintes moyennes selon X et Y directions, respectivement. On prend $\sigma_{x,a}=200\,MPa$, $\lambda=1$ et α varie de -1 à 10 avec un intervalle de 0,5.

1.5 Conditions initiales

Sans objet pour une analyse statique.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul utilisée pour la solution de référence

Dans le cas d'un chargement bi-axial alterné où les contraintes appliquées sont telles que : $\sigma_x = \lambda \sigma_y$, avec $|\lambda| > 1$ et $\lambda < 0$, on montre [bib1] que la demie amplitude de cisaillement maximal $\Delta\tau/2 = \left(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y\right)/4$, où $\Delta\sigma_x/2$ et $\Delta\sigma_y/2$ représentent les demies amplitudes de contraintes appliquées selon les axes x et y . De plus, il y a deux plans critiques dans lesquels le cisaillement est maximal :

2.2 Résultats de référence pour la modélisation A

Voir les références [bib1] et [R7.04.04].

Demie amplitude de cisaillement maximal :

$\mathbf{n}_1$	$\mathbf{n}_2$
$\Delta\sigma_x/2$ (MPa)	$\Delta\sigma_y/2$ (MPa)	$\Delta\tau/2$ (MPa)
100	200	150

Remarque :

La demi amplitude de cisaillement maximal est identique pour les deux plans critiques.

Vecteurs normaux aux deux plans critiques :

	n_1	n_2
Composante x	$-1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$
Composante y	$1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$
Composante z	0	0

Contraintes maximales normales sur les plans des normales n_1 et n_2 :

$$N_{\max}(n_1) = 50\ MPa \text{ et } N_{\max}(n_2) = 50\ MPa .$$

Pression hydrostatique maximale, indépendante vis à vis des plans de normales n_1 et n_2 :

$$P = 33.33333\ MPa .$$

Contraintes moyennes normales sur les plans des normales n_1 et n_2 :

$$N_m(n_1) = 0\ MPa \text{ et } N_m(n_2) = 0\ MPa .$$

Déformations maximales normales sur les plans des normales n_1 et n_2 :

$$\varepsilon_{\max}(n_1) = 1.75\ 10^{-4} \text{ et } \varepsilon_{\max}(n_2) = 1.75\ 10^{-4}$$

Déformations moyennes normales sur les plans des normales n_1 et n_2 :

$$\varepsilon_m(n_1) = 0 \text{ et } \varepsilon_m(n_2) = 0 .$$

Critère `MATAKE_MODI_AC`

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

$$\frac{\Delta\tau(n_i)}{2}+a\ N_{\max}(n_i)\leq b\ ,\ \ i=1,2$$

où $a=1$ et $b=2$.

Contraintes équivalentes au sens de MATAKE sur les plans des normales n_1 et n_2 :

$$\sigma_{eq}(n_i)=\left(\frac{\Delta\tau(n_i)}{2}+a\ N_{\max}(n_i)\right)\frac{f}{t}\ ,\ \ i=1,2$$

où f et t représentent, respectivement, la limite d'endurance en flexion alternée et la limite d'endurance en torsion alternée. Ici f/t est égal à $1,5$. Par conséquent nous avons :

$$\sigma_{eq}(n_1)=300\ MPa \text{ et } \sigma_{eq}(n_2)=300\ MPa\ .$$

Nombres de cycles à la rupture sur les plans des normales n_1 et n_2 :

À partir de la courbe de Wöhler, cf. [Tableau 1.2-1], et des contraintes équivalentes au sens de MATAKE, nous obtenons :

$$Nb_{cr}(n_1)=Nb_{cr}(n_2)=10946\ cycles\ .$$

Endommagement sur les plans des normales n_1 et n_2 :

$$ENDO(n_1)=ENDO(n_2)=9.13565\ 10^{-5}\ .$$

Critère de Dang Van adapté aux chargements périodiques : DANG_VAN_MODI_AC

$$\frac{\Delta\tau(n_i)}{2}+a\ P\leq b\ ,\ \ i=1,2$$

où $a=1$ et $b=2$.

Contraintes équivalentes au sens de DANG VAN sur les plans des normales $\mathbf{n}_1$ et $\mathbf{n}_2$:

$$\sigma_{eq}(n_i)=\left(\frac{\Delta\tau(n_i)}{2}+a\ P\right)\frac{c}{t}\ ,\ \ i=1,2$$

où c et t représentent, respectivement, la limite d'endurance en cisaillement alterné et la limite d'endurance en traction-compression alternée. Ici c/t est égal à $1,5$. Par conséquent nous avons :

$$\sigma_{eq}(n_1)=275\ MPa \text{ et } \sigma_{eq}(n_2)=275\ MPa\ .$$

Nombres de cycles à la rupture sur les plans des normales n_1 et n_2
À partir de la courbe de Wöhler, cf. [Tableau 1.2-1], et des contraintes équivalentes au sens de DANG VAN, nous obtenons :

$$Nb_{cr}(n_1)=Nb_{cr}(n_2)=14903\ cycles\ .$$

Endommagement sur les plans des normales n_1 et n_2 :

$$ENDO(n_1)=ENDO(n_2)=6.709959\ 10^{-5}\ .$$

Pour l'option COURBE_GRD_VIE = 'FORM_VIE' et FORMULE_VIE = WHOL_F où la courbe de vie est fournie par une formule, les résultats de référence sont identiques à ceux appelés avec les noms sauf ceux de NBRUPT et ENDO comme on utilise une courbe de vie différente.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- la courbe WHOL_F de formule (grandeur_équivalente = $4098.3\times(NBRUP^{-0.2693})$) est d'abord fournie par une fonction tabulée pour calculer des valeurs de référence de NBRUPT et ENDO.
- la courbe MANCO2 de formule (grandeur_équivalente = $0.2\times(NBRUP^{-0.1619})$) est d'abord fournie par une fonction tabulée pour calculer des valeurs de référence de NBRUPT et ENDO.

2.3 Résultats de référence pour la modélisation B

Critère de MATAKE adapté aux chargements non périodiques : MATAKE_MODI_AV
Pour ce critère il n'y a pas de résultats analytiques.

Critère de Dang Van adapté aux chargements non périodiques : DANG_VAN_MODI_AV
Pour ce critère il n'y a pas de résultats analytiques.
Voir les références [bib2] et [R7.04.04].

Demie amplitude de contrainte :

$\Delta\sigma_x/2$ (MPa)	$\Delta\sigma_y/2$ (MPa)
100	200

Critère de FATEMI et SOCIE adapté aux chargements non périodiques : FATESOCI_MODI_AV
Pour ce critère il n'y a pas de résultats analytiques.
Voir les références [bib3] et [R7.04.04].

Demie amplitude de contrainte :

$\Delta\sigma_x/2$ (MPa)	$\Delta\sigma_y/2$ (MPa)
100	200

Critère de VON MISES et de TRESCA appliqués à la recherche de la variation maximale d'un tenseur de contrainte. Le chargement peut être périodique ou non : VMIS_TRESCA

Voir la référence [R7.04.04].

Demie amplitude de contrainte :

$\Delta\sigma_x/2$ (MPa)	$\Delta\sigma_y/2$ (MPa)
100	200

Critère de Von Mises :

Dans l'espace des contraintes à six dimensions :

$$\sigma_s=\sqrt{\frac{1}{2}\left[\left(\sigma_{xx}-\sigma_{yy}\right)^2+\left(\sigma_{yy}-\sigma_{zz}\right)^2+\left(\sigma_{zz}-\sigma_{xx}\right)^2+6\left(\sigma_{xy}^2+\sigma_{xz}^2+\sigma_{yz}^2\right)\right]},$$

avec $\sigma_{xx}=200\ MPa$, $\sigma_{yy}=-400\ MPa$ et $\sigma_{zz}=\sigma_{xy}=\sigma_{xz}=\sigma_{yz}=0$, on obtient :

σ_s (MPa)
529.15026221292

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Critère de Tresca :

Dans l'espace des contraintes principales à trois dimensions :

$$\sigma_s = \underset{i \neq j}{Sup}\left(|\sigma_i - \sigma_j|\right) ,$$

avec $\sigma_{xx} = 200\ MPa$, $\sigma_{yy} = -400\ MPa$ et $\sigma_{zz} = \sigma_{xy} = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0$, on obtient :

$$\frac{\sigma_s\ (\ MPa\ )}{600}$$

2.4 Résultats de référence pour la modélisation C

Il n'y a pas de résultat de référence pour la modélisation C, uniquement des tests de non-régression Cette modélisation a pour unique objectif de couvrir le code source.

2.5 Résultats de référence pour la modélisation D

On commence par un calcul de la contrainte, la déformation totale et la déformation plastique avec la commande CALC_CHAMP. Les résultats sont listés dans le Tableau suivant en sachant que les autres composantes sont égales à zéro.

Les résultats sont obtenus avec la nœud $N1$.

t	σ_{xx}	ϵ_{xx}^{tot}	ϵ_{yy}^{tot}	ϵ_{zz}^{tot}	ϵ_{xx}^{p}	ϵ_{yy}^{p}	ϵ_{zz}^{p}
0.00E+00	*0.00E+00*	*0.00E+00*	*0.00E+00*	*0.00E+00*	*0.00E+00*	*0.00E+00*	*0.00E+00*
2.50E-01	*5.00E+01*	*2.50E-04*	*-7.50E-05*	*-7.50E-05*	*-1.48E-20*	*-7.40E-20*	*-5.98E-20*
5.00E-01	*1.00E+02*	*5.00E-04*	*-1.50E-04*	*-1.50E-04*	*-4.57E-19*	*2.71E-19*	*2.84E-20*
7.50E-01	*1.50E+02*	*7.50E-04*	*-2.25E-04*	*-2.25E-04*	*-2.29E-19*	*2.15E-19*	*-2.71E-20*
1.00E+00	2.00E+02	1.75E-03	-6.75E-04	-6.75E-04	7.50E-04	-3.75E-04	-3.75E-04
1.25E+00	1.50E+02	1.50E-03	-6.00E-04	-6.00E-04	7.50E-04	-3.75E-04	-3.75E-04
1.50E+00	1.00E+02	1.25E-03	-5.25E-04	-5.25E-04	7.50E-04	-3.75E-04	-3.75E-04
1.75E+00	5.00E+01	1.00E-03	-4.50E-04	-4.50E-04	7.50E-04	-3.75E-04	-3.75E-04
2.00E+00	1.98E-08	7.50E-04	-3.75E-04	-3.75E-04	7.50E-04	-3.75E-04	-3.75E-04
2.25E+00	-5.00E+01	5.00E-04	-3.00E-04	-3.00E-04	7.50E-04	-3.75E-04	-3.75E-04
2.50E+00	-1.00E+02	2.50E-04	-2.25E-04	-2.25E-04	7.50E-04	-3.75E-04	-3.75E-04
2.75E+00	-1.50E+02	-7.50E-04	2.25E-04	2.25E-04	-7.14E-13	7.02E-13	1.17E-14
3.00E+00	-2.00E+02	-1.75E-03	6.75E-04	6.75E-04	-7.50E-04	3.75E-04	3.75E-04
3.25E+00	-1.50E+02	-1.50E-03	6.00E-04	6.00E-04	-7.50E-04	3.75E-04	3.75E-04
3.50E+00	-1.00E+02	-1.25E-03	5.25E-04	5.25E-04	-7.50E-04	3.75E-04	3.75E-04
3.75E+00	-5.00E+01	-1.00E-03	4.50E-04	4.50E-04	-7.50E-04	3.75E-04	3.75E-04
4.00E+00	3.26E-09	-7.50E-04	3.75E-04	3.75E-04	-7.50E-04	3.75E-04	3.75E-04
4.25E+00	5.00E+01	-5.00E-04	3.00E-04	3.00E-04	-7.50E-04	3.75E-04	3.75E-04
4.50E+00	1.00E+02	-2.50E-04	2.25E-04	2.25E-04	-7.50E-04	3.75E-04	3.75E-04
4.75E+00	1.50E+02	7.50E-04	-2.25E-04	-2.25E-04	6.51E-12	-2.64E-12	-3.87E-12
5.00E+00	2.00E+02	1.75E-03	-6.75E-04	-6.75E-04	7.50E-04	-3.75E-04	-3.75E-04

Définissons tout d'abord certaines grandeurs :

- le déviateur du tenseur des contraintes : $\boldsymbol{s} = \sigma - \frac{1}{3} tr(\sigma).\boldsymbol{I}$ où I est la matrice identité
- le déviateur du tenseur des déformations : $\boldsymbol{e} = \epsilon - \frac{1}{3} tr(\epsilon).\boldsymbol{I}$ où I est la matrice identité

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

On souligne que les résultats dans intervalle du temps entre 0 et 1 seconde sont pour la partie monotone du chargement et ne sont pas prise en compte dans le calcul des grandeurs pour le comportement cyclique.

Ensuite, voici les solutions de références pour :

'DEPSPE' : demi-amplitude de la déformation plastique équivalente :

$$\frac{\Delta\varepsilon_{eq}^{p}}{2}=\frac{1}{2}max_{t1}max_{t2}\sqrt{\frac{2}{3}(\boldsymbol{\epsilon}^{p}(t_1)-\boldsymbol{\epsilon}^{p}(t_2)):(\boldsymbol{\epsilon}^{p}(t_1)-\boldsymbol{\epsilon}^{p}(t_2))}=7.5\mathrm{E}-4$$

'EPSPR1' : demi-amplitude de la première déformation principale (avec la prise en compte du signe) :

$$\frac{\epsilon_{max}^{1}-\epsilon_{min}^{1}}{2}=7.625\mathrm{E}-04$$

'SIGNM1' :contrainte normale maximale sur le plan de la déformation principale:

$$max_t(\boldsymbol{\sigma}(t).\boldsymbol{n}_1(t).\boldsymbol{n}_1(t))=200\,MPa$$

'APHYDR' : demi- amplitude de la pression hydrostatique (P_a)

$$P_a=\frac{P_{max}-P_{min}}{2}=66.6666\,MPa$$

'DENDIS' : densité d'énergie dissipée :

$$W_{cy}=\int_{cylce}\boldsymbol{\sigma}:\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{p}dt=0.45$$

'DENDIE' : densité d'énergie des distorsions élastiques :

$$W_e=\int_{cylce}\langle\boldsymbol{s}:\dot{\boldsymbol{e}}^{e}\rangle dt=0.173333$$

'DSIGEQ' : demi-amplitude de la contrainte équivalente :

$$\frac{\Delta\sigma_{eq}}{2}=\frac{1}{2}max_{t1}max_{t2}\sqrt{\frac{3}{2}(\boldsymbol{s}(t_1)-\boldsymbol{s}(t_2)):(\boldsymbol{s}(t_1)-\boldsymbol{s}(t_2))}=200\,MPa$$

'SIGPR1' : demi-amplitude de la première contrainte principale (avec la prise en compte du signe) :

$$\frac{\sigma_{max}^{1}-\sigma_{min}^{1}}{2}=100\,MPa$$

'EPSNM1' : déformation normale maximale sur le plan de la contrainte principale :

$$max_t(\boldsymbol{\epsilon}(t).\boldsymbol{n}_1(t).\boldsymbol{n}_1(t))=1.75\mathrm{E}-3$$

'INVA2S' : demi-amplitude du deuxième invariant de la déformation :

$$J_2(\Delta\epsilon)=\frac{1}{2}max_{t1}max_{t2}\sqrt{\frac{2}{3}(\boldsymbol{e}(t_1)-\boldsymbol{e}(t_2)):(\boldsymbol{e}(t_1)-\boldsymbol{e}(t_2))}=1.616666\mathrm{E}-3$$

'DSITRE' : demi-amplitude de la demi-contrainte Tresca :

$$\frac{\sigma_{max}^{Tresca}-\sigma_{min}^{Tresca}}{4}=50\,MPa$$

'DEPTRE' : demi-amplitude de la demi-déformation Tresca :

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

$$\frac{\epsilon_{max}^{Tresca}-\epsilon_{min}^{Tresca}}{4}=6.0625\mathrm{E}-4$$

'EPSPAC' : déformation plastique accumulé :

$$p=3.67423\mathrm{E}-3$$

'DEPSEE' : demi-amplitude de la déformation elastique équivalente :

$$\frac{\Delta\varepsilon_{eq}^{p}}{2}=\frac{1}{2}max_{t1}max_{t2}\sqrt{\frac{2}{3}(\boldsymbol{\epsilon}^{e}(t_1)-\boldsymbol{\epsilon}^{e}(t_2)):(\boldsymbol{\epsilon}^{e}(t_1)-\boldsymbol{\epsilon}^{e}(t_2))}=0.00086666666$$

2.6 Résultats de référence pour la modélisation E

Les résultats sont obtenus avec le nœud $N1$.

t	σ_{xx}	σ_{yy}	ϵ_{xx}^{tot}	ϵ_{yy}^{tot}	ϵ_{zz}^{tot}	ϵ_{xx}^{p}	ϵ_{yy}^{p}	ϵ_{zz}^{p}
0.00E+0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2.50E-1	3.00E+02	-2.00E+02	1.80E-03	-1.45E-03	-1.50E-04	-6.73E-19	-2.69E-18	2.84E-19
5.00E-1	6.00E+02	-4.00E+02	3.60E-03	-2.90E-03	-3.00E-04	-4.71E-19	-4.39E-18	2.61E-19
7.50E-1	9.00E+02	-6.00E+02	1.10E-02	-9.26E-03	-1.15E-03	5.61E-03	-4.91E-03	-7.01E-04
1.00E+0	1.20E+03	-8.00E+02	1.88E-02	-1.60E-02	-2.05E-03	1.16E-02	-1.02E-02	-1.45E-03
1.25E+0	9.00E+02	-6.00E+02	1.70E-02	-1.45E-02	-1.90E-03	1 .1 6 E-0 2	- 1. 02E-02	- 1. 4 5E-03
1.50E+0	6.00E+02	-4.00E+02	1.52E-02	-1.31E-02	-1.75E-03	1. 1 6E-02	-1.02E-02	- 1. 4 5E-03
1.75E+0	3.00E+02	-2.00E+02	1.34E-02	-1.16E-02	-1.60E-03	1. 1 6E-02	-1.02E-02	- 1. 4 5E-03
2.00E+0	2.30E-13	-3.07E-13	1.16E-02	-1.02E-02	-1.45E-03	1. 1 6E-02	-1.02E-02	- 1. 4 5E-03
2.25E+0	3.00E+02	-2.00E+02	1.34E-02	-1.16E-02	-1.60E-03	1. 1 6E-02	-1.02E-02	- 1. 4 5E-03
2.50E+0	6.00E+02	-4.00E+02	1.52E-02	-1.31E-02	-1.75E-03	1. 1 6E-02	-1.02E-02	- 1. 4 5E-03
2.75E+0	9.00E+02	-6.00E+02	1.70E-02	-1.45E-02	-1.90E-03	1. 1 6E-02	-1.02E-02	- 1. 4 5E-03
3.00E+0	6.00E+02	-4.00E+02	1.52E-02	-1.31E-02	-1.75E-03	1. 1 6E-02	-1.02E-02	- 1. 4 5E-03
3.25E+0	3.00E+02	-2.00E+02	1.34E-02	-1.16E-02	-1.60E-03	1. 1 6E-02	-1.02E-02	- 1. 4 5E-03
3.50E+0	-4.35E-14	-8.66E-13	1.16E-02	-1.02E-02	-1.45E-03	1. 1 6E-02	-1.02E-02	- 1. 4 5E-03

On souligne que les résultats dans intervalle du temps entre 0 et 1 seconde sont pour la partie monotone du chargement et ne sont pas prise en compte dans le calcul des grandeurs pour le comportement cyclique.

Pour les solutions de références nous avons calculé l'endommagement (via ENDO1) avec les différentes grandeurs disponibles pour un chargement non périodique :

'SIPR1_1' : première contrainte principale du premier sommet du sous cycle ($\sigma_1(1)$) et
'SIPR1_2' : première contrainte principale du deuxième sommet du sous cycle ($\sigma_1(2)$) :

On utilise la demi-amplitude de la contrainte du sommet du premier cycle, à savoir $600\,MPa$ et la demi-amplitude de la contrainte du sommet du deuxième cycle, à savoir $450\,Mpa$ puis on ajoute les endommagements associés à ces deux amplitudes.
On évalue ici le critère suivante : $\frac{|SIPR1-SIPR2|}{2}$

- avec la formule de Basquin : $\text{grandeur équivalente}=4098.3\times(NBRUP^{-0.2693})$
  on trouve $NBRUP1=1255$ et pour l'endommagement : $D1=7.968963\mathrm{E}-04$ puis $NBRUP2=3652$ et pour l'endommagement : $D2=2.738186E-04$ soit un endommagement total égal à : $D=1.0707149\mathrm{E}-03$

- avec une interpolation de la courbe de Wöhler :

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

on trouve $NBRUP1=742$ et pour l'endommagement : $D=1.347073\mathrm{E}-03$. On trouve $NBRUP2=1742$ et pour l'endommagement : $D=5.741842\mathrm{E}-04$ soit un endommagement total égal à : $D=1.9212575\mathrm{E}-03$

'SITN1_1' : contrainte normale sur le plan associé avec $\epsilon_1^{tot}(1)$ du premier sommet du sous-cycle et
'SITN1_2' : contrainte normale sur le plan associé avec $\epsilon_1^{tot}(2)$ du deuxième sommet du sous-cycle :

On utilise la demi-amplitude de la contrainte associée $\epsilon_1^{tot}(1)$, à savoir $600\,MPa$ et la demi-amplitude de la contrainte associée $\epsilon_1^{tot}(2)$, à savoir $450\,MPa$ puis on ajoute les endommagements associés à ces deux amplitudes.
On évalue ici le critère suivante : $\frac{|SITN1-SITN2|}{2}$

- avec la formule de Basquin : $\text{grandeur équivalente}=4098.3\times(NBRUP^{-0.2693})$
  on trouve $NBRUP1=1255$ et pour l'endommagement : $D1=7.968963\mathrm{E}-04$ puis $NBRUP2=3652$ et pour l'endommagement : $D2=2.738186E-04$ soit un endommagement total égal à : $D=1.0707149\mathrm{E}-03$
- avec une interpolation de la courbe de Wöhler :
  on trouve $NBRUP1=742$ et pour l'endommagement : $D=1.347073\mathrm{E}-03$ on trouve $NBRUP2=1742$ et pour l'endommagement : $D=5.741842\mathrm{E}-04$ soit un endommagement total égal à : $D=1.9212575\mathrm{E}-03$

'SIPN1_1' : contrainte normale sur le plan associé avec $\epsilon_1^{p}(1)$ du premier sommet du sous-cycle et
'SIPN1_2' : contrainte normale sur le plan associé avec $\epsilon_1^{p}(2)$ du deuxième sommet du sous-cycle :

On utilise la valeur la demi-amplitude de la contrainte associée $\epsilon_1^{p}(1)$, à savoir $600\,Mp$ a et la demi-amplitude de la contrainte associée $\epsilon_1^{p}(2)$, à savoir $450\,Mpa$
On évalue ici le critère suivante : $\frac{SIPN1-SIPN2}{2}$

- avec la formule de Basquin : $\text{grandeur_equivalente}=4098.3\times(NBRUP^{-0.2693})$
  on trouve $NBRUP1=1255$ et pour l'endommagement : $D1=7.968963\mathrm{E}-04$ puis $NBRUP2=3652$ et pour l'endommagement : $D2=2.738186E-04$ soit un endommagement total égal à : $D=1.0707149\mathrm{E}-03$
- avec une interpolation de la courbe de Wöhler :
  on trouve $NBRUP1=742$ et pour l'endommagement : $D=1.347073\mathrm{E}-03$ on trouve $NBRUP2=1742$ et pour l'endommagement : $D=5.741842\mathrm{E}-04$ soit un endommagement total égal à : $D=1.9212575\mathrm{E}-03$

'SIGEQ_1' : contrainte équivalente du premier sommet du sous-cycle $\sigma_{eq}(1)$ et
' SIGEQ_2 ' : contrainte équivalente du deuxième sommet du sous-cycle $\sigma_{eq}(2)$:

On calcule la contrainte équivalente pour SIGEQ_1 :

$$\frac{\Delta\sigma_{eq}}{2}=\frac{1}{2}max_{t1}max_{t2}\sqrt{\frac{3}{2}(\boldsymbol{s}(t_1)-\boldsymbol{s}(t_2)):(\boldsymbol{s}(t_1)-\boldsymbol{s}(t_2))}=871.78\,MPa$$

puis pour SIGEQ_2 :

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

$$\frac{\Delta\sigma_{eq}}{2}=\frac{1}{2}max_{t1}max_{t2}\sqrt{\frac{3}{2}(\boldsymbol{s}(t_1)-\boldsymbol{s}(t_2)):(\boldsymbol{s}(t_1)-\boldsymbol{s}(t_2))}=653.83\,MPa$$

Et on évalue ici le critère suivante : $\frac{SIGEQ1-SIGEQ2}{2}$

- avec la formule de Basquin : $\text{grandeur_equivalente}=4098.3\times(NBRUP^{-0.2693})$ on trouve $NBRUP1=31$ 3 et pour l'endommagement : $D1=3.1908789\,E-03$ puis $NBRUP2=912$ et pour l'endommagement : $D2=1.0964061\,E-03$ soit un endommagement total égal à : $D=4.287285\,E-03$

- avec une interpolation de la courbe de Wöhler : on trouve $NBRUP1=244$ et pour l'endommagement : $D=4.1\text{E}-03$ on trouve $NBRUP2=582$ et pour l'endommagement : $D=1.7175686\text{E}-03$ soit un endommagement total égal à : $D=5.8176\,E-03$

2.7 Résultats de référence pour la modélisation F

Les résultats sont obtenus avec le nœud $N1$.

- **Résultats obtenu avec SOL_NL :**

t	σ_{xx}	σ_{yy}	ϵ_{xx}^{tot}	ϵ_{yy}^{tot}	ϵ_{zz}^{tot}
0.00E+0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2.50E-1	3.00E+02	-1.50E+02	1.725E-03	-1.20E-03	-2.25E-04
5.00E-1	6.00E+02	-3.00E+02	3.45E-03	-2.40E-03	-4.50E-04
7.50E-1	9.00E+02	-4.50E+02	5.175E-03	-3.60E-03	-6.75E-04
1.00E+0	1.20E+03	-6.00E+02	6.90E-03	-4.80E-03	-9.00E-04
1.25E+0	9.00E+02	-4.50E+02	5.175E-03	-3.60E-03	-6.75E-04
1.50E+0	6.00E+02	-3.00E+02	3.45E-03	-2.40E-03	-4.50E-04
1.75E+0	3.00E+02	-1.50E+02	1.725E-03	-1.20E-03	-2.25E-04
2.00E+0	8.82E-26	8.82E-26	-7,92E-33	- 1 . 39 E- 32	-1.85E-32
2.25E+0	3.00E+02	-1.50E+02	1.725E-03	-1.20E-03	-2.25E-04
2.50E+0	6.00E+02	-3.00E+02	3.45E-03	-2.40E-03	-4.50E-04
2.75E+0	9.00E+02	- 4.5 0E+ 02	5 .1 75 E-0 3	- 3 . 60 E-0 3	-6.75E-04
3.00E+0	6.00E+02	-3.00E+02	3.45E-03	-2.40E-03	-4.50E-04
3.25E+0	3.00E+02	-1.50E+02	1.725E-03	-1.20E-03	-2.25E-04
3.50E+0	7.88E-14	-5.15E-13	1.26E-18	-2.60E-18	3.52E-19

'EPSN1_1' : déformation normale sur le plan associé avec $\sigma_1(1)$ du premier sommet du sous-cycle et
' EPSN 1_ 2 ' : déformation normale sur le plan associé avec $\sigma_1(2)$ du deuxième sommet du sous-cycle :

On utilise la demi-déformation totale la plus importante rencontrée lors du premier sous cycle, soit ici 0.00345 et la demi-déformation totale la plus importante rencontrée lors du deuxième sous cycle : 0.0025875 .

Et on évalue ici le critère suivante : $\frac{|EPSN1-EPSN2|}{2}$

- avec la formule de Manson : $\text{grandeur_equivalente}=0{,}022524751\,x\,(NBRUP^{-0{,}1619})$ on trouve $NBRUP1=107892$ et pour l'endommagement : $D1=9.268535\,E-06$ on trouve $NBRUP2=637811$ et pour l'endommagement : $D2=1.5678624479\,E-06$ soit un endommagement total égal à : $D=1.08363973\,E-05$

- avec une interpolation de la courbe de Manson-Coffin :

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

on trouve $NBRUP1=3636$ 4 et pour l'endommagement : $D1=2.74994\,E-05$ on trouve $NBRUP2=193932$ et pour l'endommagement : D2 = 5.156443564 E-06 soit un endommagement total égal à : $D=3.2655868578\,E-05$

'ETPR1_1' : première déformation totale principale du premier sommet du sous-cycle $\epsilon_1^{tot}(1)$ et
'ETPR1_2' : première déformation totale principale du deuxième sommet du sous-cycle $\epsilon_1^{tot}(2)$:

On utilise la demi-déformation totale la plus importante rencontrée lors du premier sous cycle, soit ici 0.00345 et la demi-déformation totale la plus importante rencontrée lors du deuxième sous cycle : 0.0025875 .
Et on évalue ici le critère suivante : $\frac{|ETPR1-ETPR2|}{2}$

- avec la formule de Manson : $\text{grandeur_equivalente}=0.022524751\text{x}(NBRUP^{-0.1619})$
  on trouve $NBRUP1=107892$ et pour l'endommagement : $D1=9.268535\,E-06$ on trouve $NBRUP2=637811$ et pour l'endommagement : $D2=1.5678624479\,E-06$ soit un endommagement total égal à : $D=1.08363973\,E-05$

- avec une interpolation de la courbe de Manson-Coffin :
on trouve $NBRUP1=36364$ et pour l'endommagement : $D1=2.74994\,E-05$ on trouve $NBRUP2=193932$ et pour l'endommagement : $D2=5.156443564\,E-06$ soit un endommagement total égal à : $D=3.2655868578\,E-05$

'ETEQ_1' : déformation totale équivalente du premier sommet du sous-cycle $\epsilon_{eq}^{tot}(1)$ et
'ETEQ_2' : déformation totale équivalente du deuxième sommet du sous-cycle $\epsilon_{eq}^{tot}(2)$

On calcule la déformation totale équivalente pour le premier sous-cycle avec la formule : $\epsilon_{eq}=\sqrt{\frac{2}{3}e:e}$ et on trouve $\frac{1}{2}\epsilon_{eq}^{tot}(1)=0.0034394767$. Pour le deuxième sous-cycle : $\frac{1}{2}\epsilon_{eq}^{tot}(2)=0.0025796$

- avec la formule de Manson : $\text{grandeur_equivalente}=0.022524751\times(NBRUP^{-0.1619})$
  on trouve $NBRUP1=109947$ et pour l'endommagement : $D1=9.09528647\,E-06$ on trouve $NBRUP2=649960$ et pour l'endommagement : $D2=1.5385558\,E-06$ soit un endommagement total égal à : $D=1.0633842276096\,E-05$

- avec une interpolation de la courbe de Manson-Coffin :
  on trouve $NBRUP1=36929$ et pour l'endommagement : $D1=2.707933\,E-05$ on trouve $NBRUP2=197585$ et pour l'endommagement : $D2=5.061111575\,E-06$ soit un endommagement total égal à : $D=3.214044324622\,E-05$

- **Résultats obtenu avec SOL_NL2 :**

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

t	σ_{xx}	ϵ_{xx}^{tot}	ϵ_{yy}^{tot}	ϵ_{zz}^{tot}
0.00E+0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
5.00E-1	6.00E+02	3.00E-03	-9.00E-04	-9.00E-04
1.00E+0	1.20E+03	1.05E-02	-4.05E-03	-4.05E-03
1.50E+0	6.00E+02	7.50E-03	-3.15E-03	-3.15E-03
2.00E+0	-9 . 12E-1 3	4.50E-03	-2.25E-03	-2.25E-03
2.5625E+0	-6.75E+02	-1.91E-13	-6.75E-04	-6.75E-04
3.0625E+0	1.125E+02	3.9375E-03	-1.86E-03	-1.86E-03
3.5625E+0	9.00E+02	7.875E-03	-3.0375E-03	-3.0375E-03
4.0625E+0	1.125E+02	3.9375E-03	- 1.86 E-03	- 1.86 E-03
4.5625E+0	-6.75E+02	-1.91E-13	- 6.75 E-0 4	-6.75E-04

'EPSN1_1' : déformation normale sur le plan associé avec $\sigma_1(1)$ du premier sommet du sous-cycle et
'EPSN1_2' : déformation normale sur le plan associé avec $\sigma_1(2)$ du deuxième sommet du sous-cycle :

On utilise la demi-déformation totale la plus importante rencontrée lors du premier sous cycle, soit ici 0.00525 et la demie déformation totale la plus importante rencontrée lors du deuxième sous cycle : 0.0039375 .
Et on évalue ici le critère suivante : $\frac{|EPSN1-EPSN2|}{2}$

- avec la formule de Manson : $\text{grandeur_equivalente}=0.022524751\times(NBRUP^{-0.1619})$
  on trouve $NBRUP1=8067$ et pour l'endommagement : $D1=1.239547E-04$ on trouve $NBRUP2=47691$ et pour l'endommagement : $D2=2.0968145E-05$ soit un endommagement total égal à : $D=1.449229E-04$

- avec une interpolation de la courbe de Manson-Coffin :
  on trouve $NBRUP1=5260$ et pour l'endommagement : $D1=1.901065E-04$ on trouve $NBRUP2=19698$ et pour l'endommagement : $D2=5.0767E-05$ soit un endommagement total égal à : $D=2.408735E-04$

'ETPR1_1' : première déformation totale principale du premier sommet du sous-cycle $\epsilon_1^{tot}(1)$ et
'ETPR1_2 ' : première déformation totale principale du deuxième sommet du sous-cycle $\epsilon_1^{tot}(2)$:

On utilise la demi-déformation totale la plus importante rencontrée lors du premier sous cycle, soit ici 0.00345 et la demi-déformation totale la plus importante rencontrée lors du deuxième sous cycle : 0.0025875 .
Et on évalue ici le critère suivante : $\frac{|ETPR1-ETPR2|}{2}$

- avec la formule de Manson : $\text{grandeur_equivalente}=0.022524751\text{x}(NBRUP^{-0.1619})$
  on trouve $NBRUP1=8067$ et pour l'endommagement : $D1=1.239547E-04$ on trouve $NBRUP2=47691$ et pour l'endommagement : $D2=2.0968145E-05$ soit un endommagement total égal à : $D=1.449229E-04$

- avec une interpolation de la courbe de Manson-Coffin :
  on trouve $NBRUP1=5260$ et pour l'endommagement : $D1=1.901065E-04$ on trouve $NBRUP2=19698$ et pour l'endommagement : $D2=5.0767E-05$ soit un endommagement total égal à : $D=2.408735E-04$

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

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

'ETEQ_2' : déformation totale équivalente du deuxième sommet du sous-cycle $\epsilon_{eq}^{tot}(1)$

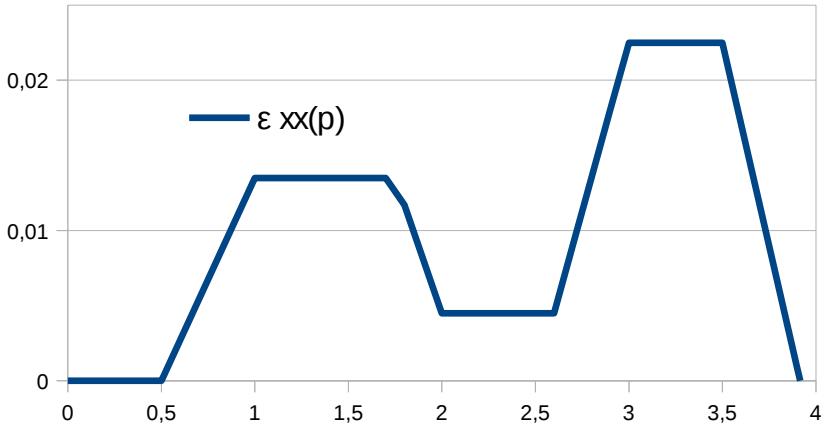
On calcule la déformation totale équivalente pour le premier sous-cycle avec la formule : $\epsilon_{eq}=\sqrt{\frac{2}{3}\boldsymbol{e}:\boldsymbol{e}}$ et on trouve $\frac{1}{2}\epsilon_{eq}^{tot}(1)=0.004625$. Pour le deuxième sous-cycle, on trouve $\frac{1}{2}\epsilon_{eq}^{tot}(2)=0.0034125$

- avec la formule de Manson : $\text{grandeur_equivalente}=0.022524751\times(NBRUP^{-0.1619})$ on trouve $NBRUP1=17650$ et pour l'endommagement : $D1=5.6657\,E-05$ on trouve $NBRUP2=115427$ et pour l'endommagement : $D2=8.66351\,E-06$ soit un endommagement total égal à : $D=6.53204991\,E-05$
- avec une interpolation de la courbe de Manson-Coffin : on trouve $NBRUP1=9411$ et pour l'endommagement : $D1=1.062557\,E-04$ on trouve $NBRUP2=38423$ et pour l'endommagement : $D2=2.60258665\,E-05$ soit un endommagement total égal à : $D=1.322816\,E-04$

- **Résultats obtenu avec SOL_NL3 :**

t	σ_{xx}	ϵ_{xx}^{tot}	ϵ_{yy}^{tot}	ϵ_{zz}^{tot}	ϵ_{xx}^{p}	ϵ_{yy}^{p}	ϵ_{zz}^{p}
0.00E+0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
5.00E-1	9.00E+02	4.50E-03	-1.35E-03	-1.35E-03	1.51E-18	1.09E-18	-7.51E-19
1.00E+0	1.80E+03	2.25E-02	-9.45E-03	-9.45E-03	1.35E-02	-6.75E-03	-6.75E-03
1.50E+0	6.00E+02	1.65E-02	-7.65E-03	-7.65E-03	1.35E-02	-6.75E-03	-6.75E-03
2.00E+0	-6.00E+02	1.50E-03	-1.35E-03	-1.35E-03	4.50E-03	- 2 . 25 E-0	- 2 . 25 E-0
2.50E+0	9.00E+02	9.00E-03	-3.60E-03	-3.60E-03	4 . 50 E-0 3	3	3
3.00E+0	2.40E+03	3.45E-02	-1.485E-02	-1.485E-02	2 . 25 E-02	-2.25E-03	-2.25E-03
3.50E+0	6.00E+02	2.55E-02	-1.215E-02	-1.215E-02	2 . 25 E-02	-1.125E-02	-1.125E-02
3.91667E+0	-9.00E+02	-4.50E-03	1.35 E-03	1.35E-03	-5.55 E-11	-1.125E-02	-1.125E-02
						2.69E-11	2 . 86 E- 11

Pour ce faire une meilleure idée de ce qui nous intéresse ici, à savoir ϵ_{xx}^{p} puisque les valeurs maximales de la déformation plastique sont suivant la direction xx , voici l'évolution de ϵ_{xx}^{p} en fonction du temps :



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

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

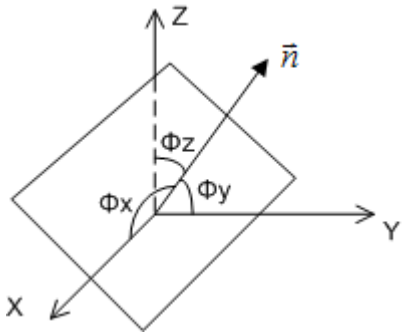
'EPPR1_2' : première déformation plastique principale du deuxième sommet du sous-cycle $\epsilon_1^p(2)$:
On évalue ici le critère suivante : $\frac{|EPPR1-EPPR2|}{2}$

Attention, ici la valeur de ϵ_{xx}^p n'est pas nulle à la fin du premier sous cycle, donc pour $\frac{EPPR1}{2}$ on obtient : $\frac{0.0135-0.0045}{2}=0.0045$. Pour $\frac{EPPR2}{2}$, on obtient plus directement : $0{,}01125$.

- avec la formule de Manson : $\text{grandeur_equivalente}=0.022524751\times(NBRUP^{-0.1619})$
  on trouve $NBRUP1=20905$ et pour l'endommagement : $D1=4.7836\,E-05$ on trouve $NBRUP2=73$ et pour l'endommagement : $D2=1.37307\,E-02$ soit un endommagement total égal à : $D=1.377855\,E-02$
- avec une interpolation de la courbe de Manson-Coffin :
  on trouve $NBRUP1=10672$ et pour l'endommagement : $D1=9.37\,E-05$ on trouve $NBRUP2=478$ et pour l'endommagement : $D2=2.092\,1444\,E-03$ soit un endommagement total égal à : $D=2.185844\,E-03$

2.8 Résultats de référence pour la modélisation G

Les solutions analytiques de l'orientation du plan critique se trouvent dans le [bib4]. L'orientation du plan critique est définie par des angles (ϕ_x , ϕ_y , ϕ_z) entre le vecteur normal du plan critique et des axes comme le montre la figure au-dessus.



On note que pour les critères DANG_VAN _MODI_AC et de MATAKE_MODI_AC , le plan critique est le plan du maximum cisaillement. Pour les critères de DANG_VAN_MODI_AV , de MATAKE_MODI_AC et de FATESOCI_MODI_AV le plan critique est le plan du maximum dommage.

Avec les conditions du chargement listés dans la Section 1.4.6, les solutions analytiques de référence pour cette modélisation sont les suivantes

- Critère de DANG_VAN _MODI_AC
  L'angle entre le vecteur normale du plan critique et l'axe Z est 45 degrés.
- Critère de MATAKE_MODI_AC
  L'angle entre le vecteur normale du plan critique et l'axe Z est 45 degrés.
- Critère de DANG_VAN_MODI_AV
  L'angle entre le vecteur normale du plan critique et l'axe Z est 45 degrés.
- Critère de MATAKE_MODI_AV
  L'angle entre la vecteur normale du plan critique et l'axe Z en fonction de α est

$$\phi_z=\arccos\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{1-\sqrt{1-\frac{1}{a^2+2a^2\alpha+a^2\alpha^2+1}}}\right)$$

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

où a est un propriété matérial obtenu par le paramètre MATAKE_A et $a=0.05$ est utilisé dans ce cas-test.

- Critère de FATESOCI_MODI_AV
  L'angle entre le vecteur normale du plan critique et l'axe Z en fonction de α est

$$\phi_z=\arccos\left(\frac{\sqrt{2}}{4}\sqrt{5+A_1-\sqrt{1+A_1^2+8}}\right)$$

avec $A_1=\frac{2S_y}{a\sigma_{x,a}(1+\alpha)}$. La limite d'élasticité $S_y=208\,MPa$ et $a=0.05$. Donc, le paramètre de FATSOC_A est $a/S_y=0.00024$

2.9 Résultats de référence pour la modélisation H

Dans cette modélisation, les résultats de référence sont analytiques et donnés dans le tableau ci-dessous.

Définissons tout d'abord certaines grandeurs :

- le déviateur du tenseur des contraintes : $\boldsymbol{s}=\boldsymbol{\sigma}-\frac{1}{3}tr(\boldsymbol{\sigma}).\boldsymbol{I}$ où I est la matrice identité
- le déviateur du tenseur des déformations : $\boldsymbol{e}=\boldsymbol{\epsilon}-\frac{1}{3}tr(\boldsymbol{\epsilon}).\boldsymbol{I}$ où I est la matrice identité

On souligne que les résultats dans intervalle du temps entre 0 et 1 seconde sont pour la partie monotone du chargement et ne sont pas prise en compte dans le calcul des grandeurs pour le comportement cyclique.

Il est noté qu'il existe deux types de déformations de cisaillement : le type d'ingénierie γ_{ij} ***(*** $i\neq j$ ***) et le type tensoriel*** ϵ_{ij} ***(*** $i\neq j$ ***). Noter que*** $\gamma_{ij}=2\,\epsilon_{ij}$ ***. Pour 'DGAMCR', 'MGAMCR', 'MGAMPC', on a utilisé les déformations du type d'ingénierie*** γ_{ij} ***.***

Grandeurs	'SIGEQ1'	'ENDO1'	'NBRUP1'	'VNM1X', 'VNM1Y', 'VNM1Z'
'DTAUCR'	100 MPa	1.028E-6	9.73E5	(0.707, -0.707), 0.707, 0
'DGAMCR'	9.73E5	1.583E-4	6.3163E3	(0.707, -0.707), 0.707, 0
'DSINCR'	200	1.348E-5	7.418E4	(-1,1), 0.0174, 0
'DEPNCR'	1.75E-3	2.11E-5	4.74E4	(-1, 1), 0.0174, 0
'MTAUCR'	100 MPa	1.028E-6	9.73E5	(0.707, -0.707), 0.707, 0
'MGAMCR'	9.73E5	1.583E-4	6.3163E3	(0.707, -0.707), 0.707, 0
'MSINCR'	200	1.348E-5	7.418E4	(-1,1), 0.0174, 0
'MEPNCR'	1.75E-3	2.11E-5	4.74E4	(-1, 1), 0.0174, 0
'DGAMPC'	1.125E-3	1.3782E-6	7.256E5	(0.707, -0.707), 0.707, 0
'DEPNPC'	0.75E-3	1.126E-7	8.88E6	(-1,1), 0.0174, 0
'MGAMPC'	1.125E-3	1.3782E-6	7.256E5	(0.707, -0.707), 0.707, 0
'MEPNPC'	0.75E-3	1.126E-7	8.88E6	(-1,1), 0.0174, 0

2.10 Résultats de référence pour la modélisation I

Voir résultats de la modélisation F (2.7).

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2.11 Références bibliographiques

1. ANGLES J. « Critères multiaxiaux d'amorçage en fatigue à grand nombre d cycles, plan critique, DANG VAN », Projet FATMAV, Note EDF HT-64/03/015A, 2003

2. ANGLES J., PAPACONSTANTINOU T. « Critères multiaxiaux d'amorçage en fatigue à grand nombre d cycles sous chargement non périodique », Projet FATMAV, Note EDF HT-64/04/006A, 2004

3. ANGLES J. « Synthèse sur les critères d'amorçage en fatigue multiaxiale à grand nombre d cycles développés dans *Code_Aster* », Projet Fatigue Thermique, Note EDF HT-64/05/019A, 2005

4. LEI B., TRAN V.-X. « Report on the 2nd semi-anual meeting for the collaborative PhD project between EDF R&D and Tsinghua University (July 2012 – January 2013) », Compte Rendu CR-AMA-13.021

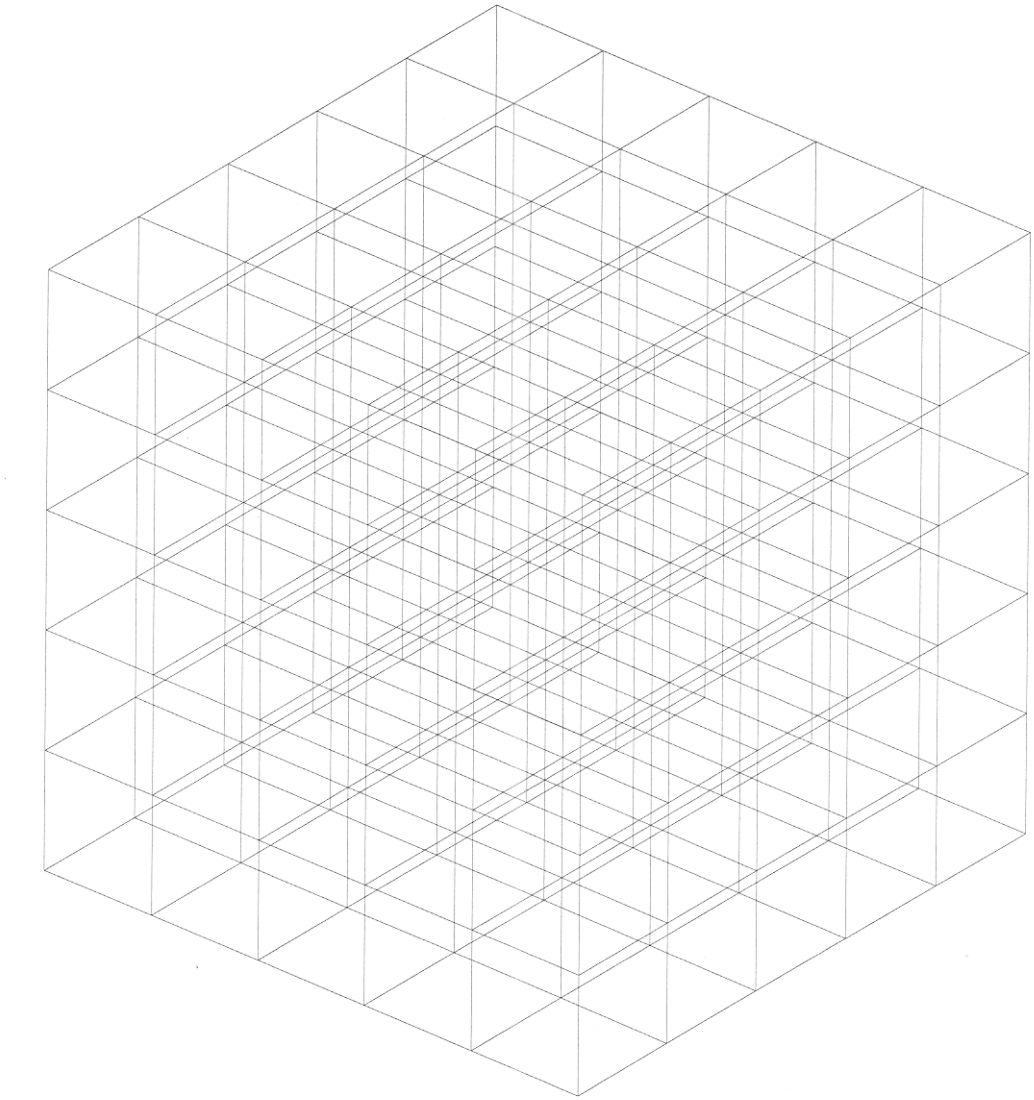
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

Ce cas-test teste des critères MATAKE_MODI_AC, DANG_VAN_MODI_AC, VMIS_TRESCA, critère en formule pour le chargement périodique et bi-axial proportionnel;

3.2 Caractéristiques du maillage



Modélisation 3D : 125 éléments de volume quadratiques : HEXA8.

Figure du maillage du cube

Le maillage du cube a été obtenu à partir de la version 2000 du mailleur GIBI.

Nombre de nœuds : 216
Nombre de mailles : 465

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3.3 Grandeurs testées et résultats

- **Critère 'MATAKE_MODI_AC' et critère en formule associé :**

Pour les résultats au nœud $N1$ et à la maille $M60$ (point Gauss 3)

Test des contraintes à l'issu de STAT_NON_LINE :

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
σ_{xx} **au nœud** $N1$	'ANALYTIQUE'	-100	1.0E-10
σ_{yy} **au nœud** $N1$	'ANALYTIQUE'	200	1.0E-10
σ_{xx} **à la maille** $M60$ **(point Gauss 3)**	'ANALYTIQUE'	-100	1.0E-10
σ_{yy} **à la maille** $M60$ **(point Gauss 3)**	'ANALYTIQUE'	200	1.0E-10

L'option COURBE_GRD_VIE = 'WOHLER' et
L'option COURBE_GRD_VIE = 'FORM_VIE' et FORMULE_VIE = WHOL:

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
$\Delta\tau(n_1)$	'ANALYTIQUE'	1 . 500000E + 02	1.0E-10
composante x de n_1	'ANALYTIQUE'	-7.071068E – 01	1.0E-10
composante y de n_1	'ANALYTIQUE'	7.071068E – 01	1.0E-10
composante z de n_1	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10
$N_{\max}(n_1)$	'ANALYTIQUE'	5.000000E+01	1.0E-10
$N_m(n_1)$	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10
$\varepsilon_{\max}(n_1)$	'ANALYTIQUE'	1.750000E – 04	1.0E-10
$\varepsilon_m(n_1)$	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10
$\sigma_{eq}(n_1)$	'ANALYTIQUE'	3.000000E+02	1.0E-10
$Nb_{cr}(n_1)$	'ANALYTIQUE'	1.094600E+04	1.0E-10
$ENDO(n_1)$	'ANALYTIQUE'	9.135647E- 05	1.0E-10
$\Delta\tau(n_2)$	'ANALYTIQUE'	1 . 500000E + 02	1.0E-10
composante x de n_2	'ANALYTIQUE'	7.071068E – 01	1.0E-10
composante y de n_2	'ANALYTIQUE'	7.071068E – 01	1.0E-10
composante z de n_2	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10
$N_{\max}(n_2)$	'ANALYTIQUE'	5.000000E+01	1.0E-10

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

$N_m(n_2)$	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10
$\varepsilon_{\max}(n_2)$	'ANALYTIQUE'	1.750000E – 04	1.0E-10
$\varepsilon_m(n_2)$	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10
$\sigma_{eq}(n_2)$	'ANALYTIQUE'	3.000000E+02	1.0E-10
$Nb_{cr}(n_2)$	'ANALYTIQUE'	1.094600E+04	1.0E-10
$ENDO(n_2)$	'ANALYTIQUE'	9.135647E – 05	1.0E-10

L'option COURBE_GRD_VIE = 'FORM_VIE' et FORMULE_VIE = WHOL_F:

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
$\Delta\tau(n_1)$	'ANALYTIQUE'	1 . 500000E + 02	1.0E-10
composante x de n_1	'ANALYTIQUE'	– 7.071068E – 01	1.0E-10
composante y de n_1	'ANALYTIQUE'	7.071068E – 01	1.0E-10
composante z de n_1	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10
$N_{\max}(n_1)$	'ANALYTIQUE'	5.000000E+01	1.0E-10
$N_m(n_1)$	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10
$\varepsilon_{\max}(n_1)$	'ANALYTIQUE'	1.750000E – 04	1.0E-10
$\varepsilon_m(n_1)$	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10
$\sigma_{eq}(n_1)$	'ANALYTIQUE'	3.000000E+02	1.0E-10
$Nb_{cr}(n_1)$	'ANALYTIQUE'	1.094600E+04	4.0E-03
$ENDO(n_1)$	'ANALYTIQUE'	1.6519E+04	4.0E-03
$\Delta\tau(n_2)$	'ANALYTIQUE'	6.05356E-05	1.0E-10
composante x de n_2	'ANALYTIQUE'	7.071068E – 01	1.0E-10
composante y de n_2	'ANALYTIQUE'	7.071068E – 01	1.0E-10
composante z de n_2	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10
$N_{\max}(n_2)$	'ANALYTIQUE'	5.000000E+01	1.0E-10
$N_m(n_2)$	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10
$\varepsilon_{\max}(n_2)$	'ANALYTIQUE'	1.750000E – 04	1.0E-10
$\varepsilon_m(n_2)$	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

$\sigma_{eq}(n_2)$	'ANALYTIQUE'	3.000000E+02	1.0E-10
$Nb_{cr}(n_2)$	'ANALYTIQUE'	1.6519E+04	4.0E-03
$ENDO(n_2)$	'ANALYTIQUE'	6.05356E-05	4.0E-03

- **Critère `'DANG_VAN_MODI_AC'` et critère en formule associé :**

Pour les résultats **au nœud** $N1$ et à la **maille** $M60$ **(point Gauss 3)**
L'option `COURBE_GRD_VIE = 'WOHLER'` et
L'option `COURBE_GRD_VIE = 'FORM_VIE'` et `FORMULE_VIE = 'WHOL'` :

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
$\Delta\tau(n_1)$	'ANALYTIQUE'	1 . 500000E + 02	1.0E-10
composante x de n_1	'ANALYTIQUE'	7.071068E – 01	1.0E-10
composante y de n_1	'ANALYTIQUE'	7.071068E – 01	1.0E-10
composante z de n_1	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10
$N_{\max}(n_1)$	'ANALYTIQUE'	5.000000E+01	1.0E-10
$N_m(n_1)$	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10
$\varepsilon_{\max}(n_1)$	'ANALYTIQUE'	1.750000E – 04	1.0E-10
$\varepsilon_m(n_1)$	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10
$\sigma_{eq}(n_1)$	'ANALYTIQUE'	2.750000E+02	1.0E-10
$Nb_{cr}(n_1)$	'ANALYTIQUE'	1.490300E+04	1.0E-10
$ENDO(n_1)$	'ANALYTIQUE'	6.709959E – 05	1.0E-10
$\Delta\tau(n_2)$	'ANALYTIQUE'	1 . 500000E + 02	1.0E-10
composante x de n_2	'ANALYTIQUE'	– 7.071068E – 01	1.0E-10
composante y de n_2	'ANALYTIQUE'	7.071068E – 01	1.0E-10
composante z de n_2	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10
$N_{\max}(n_2)$	'ANALYTIQUE'	5.000000E+01	1.0E-10
$N_m(n_2)$	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10
$\varepsilon_{\max}(n_2)$	'ANALYTIQUE'	1.750000E – 04	1.0E-10
$\varepsilon_m(n_2)$	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10
$\sigma_{eq}(n_2)$	'ANALYTIQUE'	2.750000E+02	1.0E-10
$Nb_{cr}(n_2)$	'ANALYTIQUE'	1.490300E+04	1.0E-10

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

$ENDO(n_2)$	'ANALYTIQUE'	6.709959E – 05	1.0E-10

L'option COURBE_GRD_VIE = 'FORM_VIE' et FORMULE_VIE = WHOL_F:

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
$\Delta\tau(n_1)$	'ANALYTIQUE'	1 . 500000E + 02	1.0E-10
composante x de n_1	'ANALYTIQUE'	7.071068E – 01	1.0E-10
composante y de n_1	'ANALYTIQUE'	7.071068E – 01	1.0E-10
composante z de n_1	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10
$N_{\max}(n_1)$	'ANALYTIQUE'	5.000000E+01	1.0E-10
$N_m(n_1)$	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10
$\varepsilon_{\max}(n_1)$	'ANALYTIQUE'	1.750000E – 04	1.0E-10
$\varepsilon_m(n_1)$	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10
$\sigma_{eq}(n_1)$	'ANALYTIQUE'	2.750000E+02	1.0E-10
$Nb_{cr}(n_1)$	'ANALYTIQUE'	2.2822E+04	5.0E-03
$ENDO(n_1)$	'ANALYTIQUE'	4.381737E-05	5.0E-03
$\Delta\tau(n_2)$	'ANALYTIQUE'	1 . 500000E + 02	1.0E-10
composante x de n_2	'ANALYTIQUE'	– 7.071068E – 01	1.0E-10
composante y de n_2	'ANALYTIQUE'	7.071068E – 01	1.0E-10
composante z de n_2	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10
$N_{\max}(n_2)$	'ANALYTIQUE'	5.000000E+01	1.0E-10
$N_m(n_2)$	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10
$\varepsilon_{\max}(n_2)$	'ANALYTIQUE'	1.750000E – 04	1.0E-10
$\varepsilon_m(n_2)$	'ANALYTIQUE'	0.0	1.0E-10
$\sigma_{eq}(n_2)$	'ANALYTIQUE'	2.750000E+02	1.0E-10
$Nb_{cr}(n_2)$	'ANALYTIQUE'	2.2822E+04	5.0E-03
$ENDO(n_2)$	'ANALYTIQUE'	4.381737E-05	5.0E-03

- **Critère ' VMIS_TRESCA '**

Pour nœuds :N1 ;N206 ; Maille : M60 (Point de Gauss : 3)

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
σ_{xx} (Instant : 3)	'ANALYTIQUE'	– 1.00000E+02	1.0E-10

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

σ_{yy} (Instant : 3)	'ANALYTIQUE'	2.00000E+02	1.0E-10
σ_s (VMIS)	'ANALYTIQUE'	529.15026E+02	1.0E-10
σ_s (TRESCA)	'ANALYTIQUE'	600.00000E+02	1.0E-10

Pour nœuds :N1 ;N206 ; Maille : M60 (Point de Gauss : 7)

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
σ_{xx} (Instant : 3)	'ANALYTIQUE'	– 1.00000E+02	1.0E-10
σ_{yy} (Instant : 3)	'ANALYTIQUE'	2.00000E+02	1.0E-10
σ_s (VMIS)	'ANALYTIQUE'	529.15026E+02	1.0E-10
σ_s (TRESCA)	'ANALYTIQUE'	600.00000E+02	1.0E-10

- **Critère en formule retrouvant ' VMIS_TRESCA '**

Résultats **au nœud** *N1* et à la **maille** *M60* **(point Gauss 3 et 7)**

Identification	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
σ_s (VMIS)	'ANALYTIQUE'	529.15026E+02	1.0E-10

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

Ce cas-teste test des critères MATAKE_MODI_AV, DANG_VAN_MODI_AV, FATESOCI_MODI_AV, critère en formule pour le chargement non-périodique et bi-axial et proportionnel ;

4.2 Caractéristiques du maillage

Identique à la modélisation A.

4.3 Grandeurs testées et résultats

- **Critère 'MATAKE_MODI_AV' et critère en formule associé**

Pour les résultats **au nœud** $N206$ et à la **maille** $M60$ **(point Gauss 3)**
L'option COURBE_GRD_VIE='WOHLER' et l
L'option COURBE_GRD_VIE = 'FORM_VIE' et FORMULE_VIE = WHOL:

Identification	Type de référence	Valeur de référence
composante x de n_1 et n_2	'AUTRE_ASTER'	-0.38268343236509 0.38268343236509
composante y de n_1 et n_2	'AUTRE_ASTER'	0.92718385456679 0.92387953251129
composante z de n_1 et n_2	'AUTRE_ASTER'	0.0000000000000E+00
$ENDO(n_1)$	'AUTRE_ASTER'	7.0532362250863E-04

Dans le tableau ci-dessus, les composantes x et y de n_1 et n_2 ont deux valeurs parce qu'il existe deux vecteurs qui correspondent à la même valeur d'endommagement $ENDO(n_1)$ = $ENDO(n_2)$.

L'option COURBE_GRD_VIE= 'FORM_VIE' et FORMULE_VIE = WHOL_F:

Identification	Type de référence	Valeur de référence
composante x de n_1 et n_2	'AUTRE_ASTER'	-0.38268343236509 0.38268343236509
composante y de n_1 et n_2	'AUTRE_ASTER'	0.92718385456679 0.92387953251129
composante z de n_1 et n_2	'AUTRE_ASTER'	0.0000000000000E+00
$ENDO(n_1)$	'AUTRE_ASTER'	3.3180845213285E-04

Dans le tableau ci-dessus, les composantes x et y de n_1 et n_2 ont deux valeurs parce qu'il existe deux vecteurs qui correspondent à la même valeur d'endommagement $ENDO(n_1)$ = $ENDO(n_2)$.

- **Critère 'DANG_VAN_MODI_AV' et critère en formule associé**

Pour les résultats **au nœud** $N206$ et à la **maille** $M60$ **(point Gauss 3)**
L'option COURBE_GRD_VIE='WOHLER' et
L'option COURBE_GRD_VIE='FORM_VIE' et FORMULE_VIE = WHOL:

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Identification	Type de référence	Valeur de référence
composante x de n_1 et n_2	'AUTRE_ASTER'	-7.0710678118655E-01 7.0710678118655E-01
composante y de n_1 et n_2	'AUTRE_ASTER'	7.0710678118655E-01
composante z de n_1 et n_2	'AUTRE_ASTER'	0.0000000000000E+00
$ENDO(n_1)$	'AUTRE_ASTER'	1.3419917535855E-04

Dans le tableau ci-dessus, les composantes x et y de n_1 et n_2 ont deux valeurs parce qu'il existe deux vecteurs qui correspondent à la même valeur d'endommagement $ENDO(n_1)$ = $ENDO(n_2)$.

L'option COURBE_GRD_VIE= 'FORM_VIE' et FORMULE_VIE = WHOL_F :

Identification	Type de référence	Valeur de référence
composante x de n_1 et n_2	'AUTRE_ASTER'	-7.0710678118655E-01 7.0710678118655E-01
composante y de n_1 et n_2	'AUTRE_ASTER'	7.0710678118655E-01
composante z de n_1 et n_2	'AUTRE_ASTER'	0.0000000000000E+00
$ENDO(n_1)$	'AUTRE_ASTER'	8.7960237413997E-05

Dans le tableau ci-dessus, les composantes x et y de n_1 et n_2 ont deux valeurs parce qu'il existe deux vecteurs qui correspondent à la même valeur d'endommagement $ENDO(n_1)$ = $ENDO(n_2)$.

- **Critère 'FATESOCI_MODI_AV' et critère en formule associé :**

Pour les résultats **au nœud** $N1$ et à la **maille** $M60$ **(point Gauss 3)**
L'option COURBE_GRD_VIE='WOHLER' et
L'option COURBE_GRD_VIE='FORM_VIE' et FORMULE_VIE = MANCO1:

Identification	Type de référence	Valeur de référence
composante x de n_1 et n_2	'AUTRE_ASTER'	-0.43051109680829 0.43051109680830
composante y de n_1 et n_2	'AUTRE_ASTER'	0.90258528434986
composante z de n_1 et n_2	'AUTRE_ASTER'	0
$ENDO(n_1)$	'AUTRE_ASTER'	0.43649132038876

Dans le tableau ci-dessus, la composante x de n_1 et n_2 a deux valeurs parce qu'il existe deux vecteurs qui correspondent à la même valeur d'endommagement $ENDO(n_1)$ = $ENDO(n_2)$.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

5 Modélisation C

5.1 Caractéristiques de la modélisation

Le critère en formule permet de retrouver les critères 'MATAKE_MODI_AC' et 'DANG_VAN_MODI_AV' et des critère en formule associés pour le chargement multi-axiaux.

5.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est identique à celui de la modélisation A.

5.3 Grandeurs testées et résultats

Pour chargement périodique :
Pour les résultats à la **maille** $M60$ **(point Gauss 3)** pour l'option COURBE_GRD_VIE = 'WOHLER' et pour l'option COURBE_GRD_VIE = 'FORM_VIE' et FORMULE_VIE = WHOL:

Identification	Type de référence	Valeur de référence
$\Delta\tau(n_1)$	'NON_REGRESSION'	1 . 330171E + 02
composante x de n_1	'NON_REGRESSION'	6.972459E – 02
composante y de n_1	'NON_REGRESSION'	9.969556E – 01
composante z de n_1	'NON_REGRESSION'	– 3.489950E – 02
$N_{\max}(n_1)$	'NON_REGRESSION'	2.357226E+00
$N_m(n_1)$	'NON_REGRESSION'	2.220625E – 14
$\varepsilon_{\max}(n_1)$	'NON_REGRESSION'	0.000000 E + 00
$\varepsilon_m(n_1)$	'NON_REGRESSION'	– 3.627373E – 05
$\sigma_{eq}(n_1)$	'NON_REGRESSION'	2.348841E+02
$Nb_{cr}(n_1)$	'NON_REGRESSION'	2.583800E+04
$ENDO(n_1)$	'NON_REGRESSION'	3.870305E – 05
$\Delta\tau(n_2)$	'NON_REGRESSION'	1.330158E + 02
composante x de n_2	'NON_REGRESSION'	– 9.901402E – 01
composante y de n_2	'NON_REGRESSION'	6.906669E – 02
composante z de n_2	'NON_REGRESSION'	1.218693E – 01
$N_{\max}(n_2)$	'NON_REGRESSION'	1.264927E+02
$N_m(n_2)$	'NON_REGRESSION'	1.581158E +0 1
$\varepsilon_{\max}(n_2)$	'NON_REGRESSION'	6.474850E – 04

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

$\varepsilon_m(n_2)$	'NON_REGRESSION'	8.093563E – 05
$\sigma_{eq}(n_2)$	'NON_REGRESSION'	3.892627E+02
$Nb_{cr}(n_2)$	'NON_REGRESSION'	3.323100E+04
$ENDO(n_2)$	'NON_REGRESSION'	3.009210E – 05

Pour les résultats à la **maille** $M60$ **(point Gauss 3)** pour l'option COURBE_GRD_VIE = 'FORM_VIE' et FORMULE_VIE = WHOL_F:

Identification	Type de référence	Valeur de référence
$\Delta\tau(n_1)$	'NON_REGRESSION'	1 . 330171E + 02
composante x de n_1	'NON_REGRESSION'	6.972459E – 02
composante y de n_1	'NON_REGRESSION'	9.969556E – 01
composante z de n_1	'NON_REGRESSION'	– 3.489950E – 02
$N_{\max}(n_1)$	'NON_REGRESSION'	2.357226E+00
$N_m(n_1)$	'NON_REGRESSION'	2.220625E – 14
$\varepsilon_{\max}(n_1)$	'NON_REGRESSION'	0.000000 E + 00
$\varepsilon_m(n_1)$	'NON_REGRESSION'	– 3.627373E – 05
$\sigma_{eq}(n_1)$	'NON_REGRESSION'	2.348841E+02
$Nb_{cr}(n_1)$	'NON_REGRESSION'	5.1477E+04
$ENDO(n_1)$	'NON_REGRESSION'	1.9426163934314E-05
$\Delta\tau(n_2)$	'NON_REGRESSION'	1.330158E + 02
composante x de n_2	'NON_REGRESSION'	– 9.901402E – 01
composante y de n_2	'NON_REGRESSION'	6.906669E – 02
composante z de n_2	'NON_REGRESSION'	1.218693E – 01
$N_{\max}(n_2)$	'NON_REGRESSION'	1.264927E+02
$N_m(n_2)$	'NON_REGRESSION'	1.581158E +0 1
$\varepsilon_{\max}(n_2)$	'NON_REGRESSION'	6.474850E – 04
$\varepsilon_m(n_2)$	'NON_REGRESSION'	8.093563E – 05
$\sigma_{eq}(n_2)$	'NON_REGRESSION'	3.892627E+02
$Nb_{cr}(n_2)$	'NON_REGRESSION'	5.1477E+04
$ENDO(n_2)$	'NON_REGRESSION'	1.9426163934314E-05

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Pour les résultats **au nœud** $N214$ pour l'option COURBE_GRD_VIE='WOHLER' et pour l'option COURBE_GRD_VIE = 'FORM_VIE' et FORMULE_VIE = WHOL:

Identification	Type de référence	Valeur de référence
$\Delta\tau(n_1)$	'NON_REGRESSION'	1.1557902030140E+02
composante x de n_1	'NON_REGRESSION'	3.8280107156988E-01
composante y de n_1	'NON_REGRESSION'	8.4447216637038E-01
composante z de n_1	'NON_REGRESSION'	3.7460659341591E-01
$N_{\max}(n_1)$	'NON_REGRESSION'	7.3701737537055E+01
$N_m(n_1)$	'NON_REGRESSION'	-6.6290480086559E+00
$\varepsilon_{\max}(n_1)$	'NON_REGRESSION'	0.
$\varepsilon_m(n_1)$	'NON_REGRESSION'	-4.2254262706848E-05
$\sigma_{eq}(n_1)$	'NON_REGRESSION'	2.8392113675768E+02
$Nb_{cr}(n_1)$	'NON_REGRESSION'	1.3505000000000E+04
$ENDO(n_1)$	'NON_REGRESSION'	7.4047664409136E-05
$\Delta\tau(n_2)$	'NON_REGRESSION'	1.1520977056656E+02
composante x de n_2	'NON_REGRESSION'	-9.1924333354254E-01
composante y de n_2	'NON_REGRESSION'	3.9019564505737E-01
composante z de n_2	'NON_REGRESSION'	5.2335956242944E-02
$N_{\max}(n_2)$	'NON_REGRESSION'	1.1296755026397E+02
$N_m(n_2)$	'NON_REGRESSION'	6.8110853707598E+00
$\varepsilon_{\max}(n_2)$	'NON_REGRESSION'	3.6085283407484E-04
$\varepsilon_m(n_2)$	'NON_REGRESSION'	4.5106604259354E-05
$\sigma_{eq}(n_2)$	'NON_REGRESSION'	3.4226598124581E+02
$Nb_{cr}(n_2)$	'NON_REGRESSION'	4.8720000000000E+03
$ENDO(n_2)$	'NON_REGRESSION'	2.0525129321838E-04

Pour les résultats **au nœud** $N214$ pour l'option COURBE_GRD_VIE='FORM_VIE' et FORMULE_VIE = WHOL_F:

Identification	Type de référence	Valeur de référence

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

$\Delta\tau(n_1)$	'NON_REGRESSION'	1.1557902030140E+02
composante x de n_1	'NON_REGRESSION'	3.8280107156988E-01
composante y de n_1	'NON_REGRESSION'	8.4447216637038E-01
composante z de n_1	'NON_REGRESSION'	3.7460659341591E-01
$N_{\max}(n_1)$	'NON_REGRESSION'	7.3701737537055E+01
$N_m(n_1)$	'NON_REGRESSION'	-6.6290480086559E+00
$\varepsilon_{\max}(n_1)$	'NON_REGRESSION'	0.
$\varepsilon_m(n_1)$	'NON_REGRESSION'	-4.2254262706848E-05
$\sigma_{eq}(n_1)$	'NON_REGRESSION'	2.8392113675768E+02
$Nb_{cr}(n_1)$	'NON_REGRESSION'	2.0270E+04
$ENDO(n_1)$	'NON_REGRESSION'	4.933357265479E-05
$\Delta\tau(n_2)$	'NON_REGRESSION'	1.1520977056656E+02
composante x de n_2	'NON_REGRESSION'	-9.1924333354254E-01
composante y de n_2	'NON_REGRESSION'	3.9019564505737E-01
composante z de n_2	'NON_REGRESSION'	5.2335956242944E-02
$N_{\max}(n_2)$	'NON_REGRESSION'	1.1296755026397E+02
$N_m(n_2)$	'NON_REGRESSION'	6.8110853707598E+00
$\varepsilon_{\max}(n_2)$	'NON_REGRESSION'	3.6085283407484E-04
$\varepsilon_m(n_2)$	'NON_REGRESSION'	4.5106604259354E-05
$\sigma_{eq}(n_2)$	'NON_REGRESSION'	3.4226598124581E+02
$Nb_{cr}(n_2)$	'NON_REGRESSION'	1.01240E+04
$ENDO(n_2)$	'NON_REGRESSION'	9.8775850589871E-05

Pour chargement non-périodique :

Pour les résultats **au nœud** *N214* pour l'option COURBE_GRD_VIE='WOHLER' et pour l'option COURBE_GRD_VIE='FORM_VIE' et FORMULE_VIE = WHOL:

Identification	Type de référence	Valeur de référence
composante x de n_1	'NON_REGRESSION'	3.8280107156988E-01
composante y de n_1	'NON_REGRESSION'	8.4447216637038E-01
composante z de n_1	'NON_REGRESSION'	3.7460659341591E-01

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

$ENDO(n_1)$	'NON_REGRESSION'	9.2779623136707E-05

Pour les résultats **au nœud** $N206$ et à la **maille** $M60$ **(point Gauss 3)** pour l'option COURBE_GRD_VIE= 'FORM_VIE' et FORMULE_VIE = WHOL_F:

Identification	Type de référence	Valeur de référence
composante x de n_1	'NON_REGRESSION'	3.8280107156988E-01
composante y de n_1	'NON_REGRESSION'	8.4447216637038E-01
composante z de n_1	'NON_REGRESSION'	3.7460659341591E-01
$ENDO(n_1)$	'NON_REGRESSION'	6.1692384350833E-05

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

6 Modélisation D

6.1 Caractéristiques de la modélisation

Les fonctionnalités testées sont de nouvelles grandeurs (qui ne font pas partie des critères existant déjà testé dans les autres modélisations). Seule l'option CRITERE='FORMULE_CRITERE' de la commande CALC_FATIGUE et la courbe de vie appelée par le nom 'WOHLER' sont utilisées.

On note que le comportement est élasto-plastique et le chargement est uniaxial et périodique.

6.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est identique à celui de la modélisation A.

6.3 Grandeurs testées et résultats

Pour les résultats **au nœud** $N1$ et à la **maille** $M60$:

Identification	Type de référence	Valeur de référence
'DEPSPE'	'ANALYTIQUE'	7.5E-4
'EPSPR1'	'ANALYTIQUE'	7.625E-4
'SIGNM1'	'ANALYTIQUE'	200
'APHYDR'	'ANALYTIQUE'	66.6666
'DENDIS'	'ANALYTIQUE'	0.45
'DENDIE'	'ANALYTIQUE'	0.173333
'DSIGEQ'	'ANALYTIQUE'	200
'EPSNM1'	'ANALYTIQUE'	1.75E-3
'INVA2S'	'ANALYTIQUE'	1.616666E-3
'DSITRE'	'ANALYTIQUE'	50
'DEPTRE'	'ANALYTIQUE'	6.0625E-4
'DEPTRE'	'ANALYTIQUE'	3.67423E-3
'DEPSEE'	'ANALYTIQUE'	0.00086666666

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

7 Modélisation E

7.1 Caractéristiques de la modélisation

Les fonctionnalités testées sont de nouvelles grandeurs.
On note que le comportement est élasto-plastique et le chargement est bi-axial et non-périodique.

7.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est identique à celui de la modélisation A.

7.3 Grandeurs testées et résultats

La valeur de référence correspond à l'endommagement (ENDO1) et les résultats ont été obtenus **au nœud** $N1$ et à la **maille** $M60$ via la **formule de Basquin** :

Identification	Type de référence	Valeur de référence
Critères		
$\frac{\lvert SIPR1-SIPR2\rvert}{2}$	'ANALYTIQUE'	1.0707149E-03
$\frac{\lvert SITN1-SITN2\rvert}{2}$	'ANALYTIQUE'	1.0707149E-03
$\frac{SIPN1-SIPN2}{2}$	'ANALYTIQUE'	1.0707149E-03
$\frac{SIGEQ1-SIGEQ2}{2}$	'ANALYTIQUE'	4.287285E-03

La valeur de référence correspond toujours à l'endommagement (ENDO1) et les résultats ont été obtenus **au nœud** $N1$ et à la **maille** $M60$ avec une **interpolation** de la courbe de Wöhler :

Identification	Type de référence	Valeur de référence
Critères		
$\frac{\lvert SIPR1-SIPR2\rvert}{2}$	'ANALYTIQUE'	1.9212572E-03
$\frac{\lvert SITN1-SITN2\rvert}{2}$	'ANALYTIQUE'	1.9212572E-03
$\frac{SIPN1-SIPN2}{2}$	'ANALYTIQUE'	1.9212572E-03
$\frac{SIGEQ1-SIGEQ2}{2}$	'ANALYTIQUE'	5.8175699E-03

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

8 Modélisation F

8.1 Caractéristiques de la modélisation

Les fonctionnalités testées sont de nouvelles grandeurs.
On note que différents comportements et chargement sont testés : élastique, bi-axial et non-périodique puis élasto-plastique, uni-axial et non-périodique.

8.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est identique à celui de la modélisation A.

8.3 Grandeurs testées et résultats

- Résultat obtenu avec le premier chargement (**SOL_NL**) :
La valeur de référence correspond à l'endommagement (ENDO1) et les résultats ont été obtenus **au nœud** $N1$ et à la **maille** $M60$ via la **formule de Basquin** :

Identification	Type de référence	Valeur de référence
Critères		
$\frac{\lvert EPSN1-EPSN2\rvert}{2}$	'ANALYTIQUE'	1.08363973E-05
$\frac{\lvert ETPR1-ETPR2\rvert}{2}$	'ANALYTIQUE'	1.0 8363973 E-0 5
$\frac{\lvert ETEQ1-ETEQ2\rvert}{2}$	'ANALYTIQUE'	1.06338423E-05

La valeur de référence correspond toujours à l'endommagement (ENDO1) et les résultats ont été obtenus **au nœud** $N1$ et à la **maille** $M60$ avec une **interpolation** de la courbe de Wöhler :

Identification	Type de référence	Valeur de référence
Critères		
$\frac{\lvert EPSN1-EPSN2\rvert}{2}$	'ANALYTIQUE'	3.26558686E-05
$\frac{\lvert ETPR1-ETPR2\rvert}{2}$	'ANALYTIQUE'	3.26558686E-05
$\frac{\lvert ETEQ1-ETEQ2\rvert}{2}$	'ANALYTIQUE'	3.21404432E-05

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- Résultat obtenu avec le deuxième chargement (**SOL_NL2**) :
  La valeur de référence correspond à l'endommagement (ENDO1) et les résultats ont été obtenus **au nœud** $N1$ et à la **maille** $M60$ via la **formule de Basquin** :

Identification	Type de référence	Valeur de référence
Critères		
$\frac{\lvert EPSN1-EPSN2\rvert}{2}$	'ANALYTIQUE'	1.449229E-04
$\frac{\lvert ETPR1-ETPR2\rvert}{2}$	'ANALYTIQUE'	1. 449229 E-0 4
$\frac{\lvert ETEQ1-ETEQ2\rvert}{2}$	'ANALYTIQUE'	6.5320499E-05

La valeur de référence correspond toujours à l'endommagement (ENDO1) et les résultats ont été obtenus **au nœud** $N1$ et à la **maille** $M60$ avec une **interpolation** de la courbe de Wöhler :

Identification	Type de référence	Valeur de référence
Critères		
$\frac{\lvert EPSN1-EPSN2\rvert}{2}$	'ANALYTIQUE'	2.408735E-04
$\frac{\lvert ETPR1-ETPR2\rvert}{2}$	'ANALYTIQUE'	2.408735 E-0 4
$\frac{\lvert ETEQ1-ETEQ2\rvert}{2}$	'ANALYTIQUE'	1.322816E-04

- Résultat obtenu avec le troisième chargement (**SOL_NL3**) :
  La valeur de référence correspond à l'endommagement (ENDO1) et les résultats ont été obtenus **au nœud** $N1$ et à la **maille** $M60$ via la **formule de Basquin** :

Identification	Type de référence	Valeur de référence
Critères		
$\frac{\lvert EPPR1-EPPR2\rvert}{2}$	'ANALYTIQUE'	1.377855E-02

La valeur de référence correspond toujours à l'endommagement (ENDO1) et les résultats ont été obtenus **au nœud** $N1$ et à la **maille** $M60$ avec une **interpolation** de la courbe de Wöhler :

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

9 Modélisation G

9.1 Caractéristiques de la modélisation

Les fonctionnalités testées sont de nouvelles grandeurs.
On note que différents comportements et chargement sont testés : un matériau élastique et un matériau élasto-plastique.

9.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est identique à celui de la modélisation A.

9.3 Grandeurs testées et résultats

- **Critères de DANG_VAN _MODI_AC, de MATAKE_MODI_AC, de DANG_VAN_MODI_AV**
  Pour les résultats de ϕ_z au nœud $N1$ pour un matériau élastique.

Valeur de α	Type de référence	Valeur de référence
−1, -0.5, 0..10	'ANALYTIQUE'	45

Pour les résultats de ϕ_z au nœud $N1$ pour un matériau élastoplastique.

Valeur de α	Type de référence	Valeur de référence
0, 1, 2, 3, 4	'ANALYTIQUE'	45

- Critère de **MATAKE_MODI_AV**

Valeur de α	Type de référence	Valeur de référence
−1	'ANALYTIQUE'	45
−0.5	'ANALYTIQUE'	45,72
0	'ANALYTIQUE'	46,43
0,5	'ANALYTIQUE'	47,14
1	'ANALYTIQUE'	47,86
1,5	'ANALYTIQUE'	48,56
2	'ANALYTIQUE'	49,27
2,5	'ANALYTIQUE'	49,96
3	'ANALYTIQUE'	50,65
3,5	'ANALYTIQUE'	51,34
4	'ANALYTIQUE'	52,02
4,5	'ANALYTIQUE'	52,69
5	'ANALYTIQUE'	53,35
5,5	'ANALYTIQUE'	54
6	'ANALYTIQUE'	54,65

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

6,5	'ANALYTIQUE'	55,28
7	'ANALYTIQUE'	55,9
7,5	'ANALYTIQUE'	56,51
8	'ANALYTIQUE'	57,11
8,5	'ANALYTIQUE'	57,7
9	'ANALYTIQUE'	58,28
9,5	'ANALYTIQUE'	58,85
10	'ANALYTIQUE'	59,41

Pour les résultats de ϕ_z **au nœud** $N1$ pour un matériau élasto-plastique.

Valeur de α	Type de référence	Valeur de référence
0	'ANALYTIQUE'	46,43
1	'ANALYTIQUE'	47,86
2	'ANALYTIQUE'	49,27
3	'ANALYTIQUE'	50,65
4	'ANALYTIQUE'	52,02

- **Critère de FATESOCI_MODI_AV**

Pour les résultats de ϕ_z **au nœud** $N1$ pour un matériau élastique.

Valeur de α	Type de référence	Valeur de référence
−1	'ANALYTIQUE'	45
−0.5	'ANALYTIQUE'	45,34
0	'ANALYTIQUE'	45,67
0,5	'ANALYTIQUE'	45,99
1	'ANALYTIQUE'	46,31
1,5	'ANALYTIQUE'	46,61
2	'ANALYTIQUE'	46,91
2,5	'ANALYTIQUE'	47,2
3	'ANALYTIQUE'	47,48
3,5	'ANALYTIQUE'	47,75
4	'ANALYTIQUE'	48,01
4,5	'ANALYTIQUE'	48,27
5	'ANALYTIQUE'	48,51
5,5	'ANALYTIQUE'	48,75
6	'ANALYTIQUE'	48,98
6,5	'ANALYTIQUE'	49,2

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

7	'ANALYTIQUE'	49,42
7,5	'ANALYTIQUE'	49,63
8	'ANALYTIQUE'	49,83
8,5	'ANALYTIQUE'	50,03
9	'ANALYTIQUE'	50,22
9,5	'ANALYTIQUE'	50,4
10	'ANALYTIQUE'	50,58

Pour les résultats de ϕ_z **au nœud** $N1$ pour un matériau élasto-plastique.

Valeur de α	Type de référence	Valeur de référence
0	'ANALYTIQUE'	45,67
1	'ANALYTIQUE'	46,31
2	'ANALYTIQUE'	46,91
3	'ANALYTIQUE'	47,48
4	'ANALYTIQUE'	48,01

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

10 Modélisation H

10.1 Caractéristiques de la modélisation

Les fonctionnalités testées sont de nouvelles grandeurs et le mot-clé FORMULE_CRITIQUE. Seule l'option CRITERE='FORMULE_CRITERE' de la commande CALC_FATIGUE et les courbes de vie appelées par les formules sont utilisées.

On note que le comportement est élasto-plastique et le chargement est uni-axial et périodique.

10.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est identique à celui de la modélisation A.

10.3 Grandeurs testées et résultats

Pour les résultats **au nœud** $N1$ et à la **maille** $M60$:

Identification	Type de référence	Valeur de références
FORMULE_CRITIQUE = 'DTAUCR' ou 'MTAUCR'		
'SIGEQ1'	'ANALYTIQUE'	100 MPa
'ENDO1'	'ANALYTIQUE'	1.028E-6
'NBRUP1'	'ANALYTIQUE'	9.73E5
'VNM1X', 'VNM1Y', 'VNM1Z'	'ANALYTIQUE'	(0.707, -0.707), 0.707, 0
FORMULE_CRITIQUE = 'DGAMCR' ou 'MGAMCR'		
'SIGEQ1'	'ANALYTIQUE'	9.73E5
'ENDO1'	'ANALYTIQUE'	1.583E-4
'NBRUP1'	'ANALYTIQUE'	6.3163E3
'VNM1X', 'VNM1Y', 'VNM1Z'	'ANALYTIQUE'	(0.707, -0.707), 0.707, 0
FORMULE_CRITIQUE = 'DSINCR' ou 'MSINCR'		
'SIGEQ1'	'ANALYTIQUE'	200
'ENDO1'	'ANALYTIQUE'	1.348E-5
'NBRUP1'	'ANALYTIQUE'	7.418E4
'VNM1X', 'VNM1Y', 'VNM1Z'	'ANALYTIQUE'	(-1,1), 0.0174, 0
FORMULE_CRITIQUE = 'DEPNCR' ou 'MEPNCR'		
'SIGEQ1'	'ANALYTIQUE'	1.75E-3
'ENDO1'	'ANALYTIQUE'	2.11E-5
'NBRUP1'	'ANALYTIQUE'	4.74E4
'VNM1X', 'VNM1Y', 'VNM1Z'	'ANALYTIQUE'	(-1, 1), 0.0174, 0

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

FORMULE_CRITIQUE = 'DGAMPC' ou 'MGAMPC'		
'SIGEQ1'	'ANALYTIQUE'	1.125E-3
'ENDO1'	'ANALYTIQUE'	1.3782E-6
'NBRUP1'	'ANALYTIQUE'	7.256E5
'VNM1X', 'VNM1Y', 'VNM1Z'	'ANALYTIQUE'	(0.707, -0.707), 0.707, 0
FORMULE_CRITIQUE = 'DEPNPC' ou 'MEPNPC'		
'SIGEQ1'	'ANALYTIQUE'	0.75E-3
'ENDO1'	'ANALYTIQUE'	1.126E-7
'NBRUP1'	'ANALYTIQUE'	8.88E6
'VNM1X', 'VNM1Y', 'VNM1Z'	'ANALYTIQUE'	(-1,1), 0.0174, 0

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

11 Modélisation I

Voir Modélisation F (partie 8).

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

12 Synthèse des résultats

Les résultats obtenus sont en parfait accord avec la solution de référence pour la modélisation A. La modélisation B n'a pas de solutions de référence associées aux critères. La modélisation C n'a pas de solution de référence, il s'agit d'un test de non-régression.

Les résultats des modélisations D, E, F, G, H et I s'accordent avec les résultats analytiques.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)