

SSNP118 - Validation des éléments de joint et d'interface en 2D plan et 3D

Résumé :

Validation des éléments de joint et d'interface. Comparaison des résultats avec la solution analytique.

Joint : 2D plan (maille QUAD4) et 3D (maille HEXA8 ou PENTA6) avec les lois de comportement cohésives : CZM_LIN_REG et CZM_EXP_REG et un pilotage par prédiction élastique PRED_ELAS.

Interface : 2D plan (maille QUAD8) et 3D (maille HEXA20 ou PENTA15) avec les lois de comportement cohésives : CZM_OUV_MIX, CZM_TAC_MIX, CZM_FAT_MIX et CZM_TRA_MIX ainsi que le pilotage par prédiction élastique PRED_ELAS pour les deux premières.

Formulation XFEM : 2D plan avec la loi de comportement cohésive : CZM_TAC_MIX,

Modélisation *A* : PLAN_JOINT avec CZM_EXP_REG

Modélisation *B* : 3D_JOINT maille HEXA8 avec CZM_EXP_REG

Modélisation *C* : 3D_JOINT maille PENTA6 avec CZM_EXP_REG

Modélisation *D* : PLAN_JOINT avec CZM_LIN_REG

Modélisation *E* : 3D_JOINT maille HEXA8 avec CZM_LIN_REG

Modélisation *F* : 3D_JOINT maille PENTA6 avec CZM_LIN_REG

Modélisation *G* : PLAN_INTERFACE_S avec CZM_OUV_MIX et CZM_TAC_MIX

Modélisation *H* : 3D_INTERFACE_S, maille HEXA20 avec CZM_OUV_MIX et CZM_TAC_MIX

Modélisation *I* : 3D_INTERFACE_S, maille PENTA15 avec CZM_OUV_MIX et CZM_TAC_MIX

Modélisation *J* : PLAN_INTERFACE_S avec CZM_FAT_MIX

Modélisation *K* : 3D_INTERFACE_S, maille HEXA20 avec CZM_FAT_MIX

Modélisation *L* : 3D_INTERFACE_S, maille PENTA15 avec CZM_FAT_MIX

Modélisation *M* : PLAN_INTERFACE_S avec CZM_TRA_MIX

Modélisation *N* : 3D_INTERFACE_S, maille HEXA20 avec CZM_TRA_MIX

Modélisation *O* : 3D_INTERFACE_S, maille PENTA15 avec CZM_TRA_MIX

Modélisation *P* : formulation XFEM , maille QUAD8 avec CZM_TAC_MIX

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

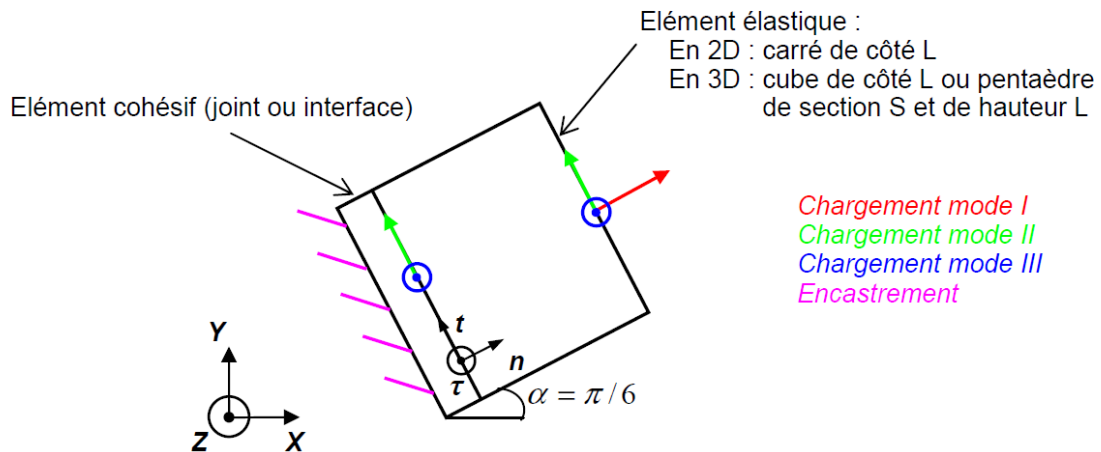


Figure 1 : Représentation du système de deux éléments dans le plan (X, Y) . On choisit $L = 1 \text{ mm}$.

1.1.1 Géométrie : cas X-FEM

Dans les modélisations en formulation XFEM, il n'y a plus dans le modèle d'élément cohésif de joint ou d'interface, mais la loi cohésive est définie sur l'interface à l'aide de la commande `DEFI_CONTACT`, comme on le ferait pour une loi de contact. Par conséquent, le carré est maillé avec quelques éléments et la ligne de discontinuité est introduite au milieu du carré, de façon non conforme : elle coupe des éléments ici élastiques.

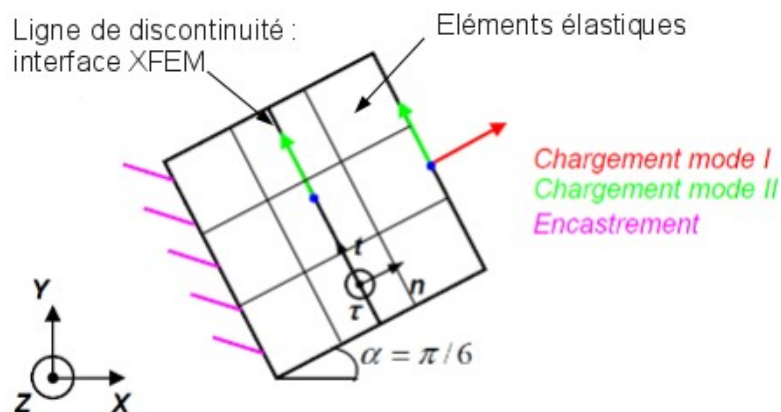


Figure 2 : Modélisation X-FEM dans le plan (X, Y) . On choisit $L = 1 \text{ mm}$.

1.2 Propriétés du matériau

1.2.1 Loïs cohésives

1.2.1.1 Matériau RUPT_FRAG

Cube : élastique

Module d'Young: $E = 0.5 \text{ MPa}$ (sauf pour les modélisations J, K et L où on prend $E = 100 \text{ MPa}$, ce choix est purement pratique)

Coefficient de Poisson $\nu = 0$

Élément de joint : lois CZM_EXP_REG, CZM_LIN_REG

Élément d'interface : lois CZM_OUV_MIX, CZM_TAC_MIX, CZM_FAT_MIX

Densité d'énergie de $G_c = 0.9 \text{ N/mm}$ (mot clé : GC)
surface critique :

contrainte critique : $\sigma_c = 1.1 \text{ MPa}$ (mot clé : SIGM_C)

Élément de joint :

pénalisation de l'adhérence $\text{PENA_ADHERENCE} = 10^{-3} \text{ mm}$ (mot clé : PENA_ADHERENCE)

(petit paramètre de régularisation de l'énergie en 0, voir [R7.02.11])

pénalisation du contact $\text{PENA_CONTACT} = 1$ (valeur par défaut) (mot clé : PENA_CONTACT)

Élément d'interface :

Pénalisation de lagrangien $\text{PENA_LAGR} = 100$ (valeur par défaut) (mot clé : PENA_LAGR)

Rigidité du glissement $\text{RIGI_GLIS} = 10$ (valeur par défaut) (mot clé : RIGI_GLIS)

NB : Les données matériaux n'ont bien entendu pas vocation à représenter un matériau en particulier. Elles sont uniquement destinées à des tests numériques de validation.

1.2.1.2 Matériau RUPT_DUCT

Cube : élastique

Module d'Young: $E = 10^6 \text{ MPa}$ (ce choix est purement pratique)

Coefficient de Poisson $\nu = 0$

Élément d'interface : loi CZM_TRA_MIX

Densité d'énergie de $G_c = 0.9 \text{ N/mm}$ (mot clé : GC)
surface critique :

contrainte critique : $\sigma_c = 9 \text{ MPa}$ (mot clé : SIGM_C)

Coefficient de forme 0.0625 (mot clé : COEF_EXTR)

extrinsèque
Coefficient de forme 0.3125 (mot clé : COEF_PLAS)

plateau plastique
Pénalisation de lagrangien $\text{PENA_LAGR} = 100$ (valeur par défaut) (mot clé : PENA_LAGR)

Rigidité du glissement $\text{RIGI_GLIS} = 10$ (valeur par défaut) (mot clé : RIGI_GLIS)

NB : Les données matériaux n'ont bien entendu pas vocation à représenter un matériau en particulier. Elles sont uniquement destinées à des tests numériques de validation.

1.3 Conditions aux limites et chargements

Encastrement : Les déplacements imposés sont nuls sur la face de l'élément cohésif opposée à l'élément élastique.

En mode I : Un déplacement imposé U est appliqué sur la face de l'élément élastique opposée au joint (voir figure 1).

$$DX = 2.16506351 \quad DY = 1.250 \quad DZ = 0$$

En mode II : Le déplacement imposé U est appliqué sur tous les nœuds de l'élément volumique.

$$DX = -1.250 \quad DY = 2.16506350946110 \quad DZ = 0$$

En mode III : Le déplacement imposé U est appliqué sur tous les nœuds de l'élément volumique.

$$DX = 0.0 \quad DY = 0.0 \quad DZ = 2.5$$

Pour les lois `CZM_OUV_MIX`, `CZM_TAC_MIX`, on utilise les mêmes vecteurs normalisés à 1.

Pour la loi de fatigue `CZM_FAT_MIX` (en mode *I* uniquement) on utilise les mêmes vecteurs normalisés à 0,094. Cette valeur correspond à l'amplitude du chargement car celui-ci est multiplié par une fonction cyclique, nulle en zéro, qui vaut 1 aux instants impairs et 0 aux instants pairs.

Pour la loi ductile `CZM_TRA_MIX` (en mode *I* uniquement) on utilise les mêmes vecteurs normalisés à 1. On applique un chargement cyclique pour tester tous les états de la loi mais également un chargement monotone. On réalise les tests avec le premier chargement.

1.3.1 Chargement : cas X-FEM

Encastrement : Les déplacements imposés sont nuls sur la face gauche du carré.

En mode I : Un déplacement imposé U est appliqué sur la face droite du carré (voir figure 2).

$$DX = 2.16506351 \quad DY = 1.250 \quad DZ = 0$$

2 Solution de référence

2.1 Cas général

Dans cette partie, on détaille la solution analytique en mode I pur dans sa forme 3D. Pour les calculs 2D plan, la solution est identique, la composante du saut et du vecteur contrainte suivant τ n'interviennent pas, et il suffit de remplacer la surface S par la longueur L dans la solution. Pour les chargements en mode de cisaillement, l'élément élastique n'intervient pas. On effectue uniquement un test sur la loi de comportement tangentielle. Pour les lois cohésives on impose un saut de déplacement et on vérifie la contrainte cohésive obtenue.

2.2 En mode I pur

On présente la solution analytique de la réponse globale du système écrite dans le repère local (n, t, τ) . On applique un chargement colinéaire à la normale : $U = U n$, l'élément cohésif s'ouvre en mode I pur et les contraintes tangentielles ainsi que les sauts tangentiels restent nuls. On se ramène donc à un problème scalaire. On note $\sigma = n \cdot \sigma \cdot n$ l'unique composante non nulle du tenseur des contraintes de l'élément élastique dans le repère local. On présente la solution de la réponse globale pour les lois cohésives :

● CZM_EXP_REG

La relation de comportement cohésive est donnée par (voir doc [R7.02.11]) :

$$\vec{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_n \\ \sigma_t \\ \sigma_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_c \cdot e^{-\frac{\sigma_c}{G_c} \delta_n} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

avec δ_n le saut de déplacement normal. La loi élastique de l'élément volumique donne :

$$\sigma = E \varepsilon = F / S$$

où ε est la déformation élastique et où F est la force correspondant au déplacement imposé à la surface S . Dans le cas de figure où la contrainte seuil dans l'élément cohésif n'est pas atteinte, la solution est élastique, la réponse globale est linéaire, elle s'exprime de la manière suivante :

$$U(F) = \frac{FL}{SE}$$

Lorsque le seuil de rupture est atteint, le saut dans l'élément cohésif n'est plus nul, la réponse n'est plus linéaire. L'équilibre du système est donné par :

$$\sigma = \sigma_n$$

De plus, dans ce cas simple de chargement, le déplacement imposé est égal à la somme du saut de déplacement et du déplacement lié à la déformation ε de l'élément élastique :

$$U = \delta_n + L \varepsilon$$

On en déduit la relation entre la force et le déplacement imposé :

$$U(F) = -\frac{G_c}{\sigma_c} \log\left(\frac{F}{S \sigma_c}\right) + \frac{FL}{SE}$$

Remarque : suivant les données matériau on peut ne pas avoir un retour arrière de la réponse globale que l'on capte avec le pilotage du chargement.

- **CZM_LIN_REG, CZM_OUV_MIX, CZM_TAC_MIX, CZM_FAT_MIX**

La relation de comportement cohésive est donnée par :

$$\vec{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_n \\ \sigma_t \\ \sigma_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_c \left(1 - \delta_n \frac{\sigma_c}{2G_c}\right) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

On adopte le même raisonnement qu'avec la loi exponentielle, la solution analytique de la réponse globale s'exprime de la manière suivante :

$$U(F) = \frac{F}{S} \left(\frac{L}{E} - \frac{2G_c}{\sigma_c^2} \right) + 2 \frac{G_c}{\sigma_c}$$

Remarque : pour la loi **CZM_FAT_MIX** la réponse globale précédente n'est valable que si le chargement est monotone. Dans la plupart des cas celui-ci est cyclique puisque cette loi est destinée à la fatigue. On propose de se reporter à la documentation [R7.02.11] des lois cohésives pour plus d'informations.

2.3 En mode II et III pur

On teste uniquement la loi de comportement (voir doc [R7.02.11] et [R7.02.13]) :

- **CZM_EXP_REG**

$$\sigma_T = \sigma_c \cdot e^{-\frac{\sigma_c}{G_c} \delta_T} \quad T \text{ désignant respectivement } t \text{ en mode II et } \tau \text{ en mode III}$$

- **CZM_LIN_REG, CZM_OUV_MIX, CZM_TAC_MIX**

$$\sigma_T = \sigma_c \left(1 - \delta_T \frac{\sigma_c}{2G_c} \right), \quad T \text{ désignant respectivement } t \text{ en mode II et } \tau \text{ en mode III}$$

3 Modélisation A

Validation du joint 2D avec la loi cohésive CZM_EXP_REG

3.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation en déformations planes D_PLAN pour l'élément élastique.

Modélisation plan pour l'élément de joint (mot clé PLAN_JOINT).

3.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 6

L'élément élastique est un QUAD4.

L'élément de joint est un QUAD4 dégénéré (nœuds confondus).

3.3 Résultats de la modélisation A

Le pilotage du chargement est testé en mode *I*. En effet, on se place dans le cas de figure où la réponse globale possède un retour arrière (voir note interne H-T64-2007-03420-FR pour plus détails sur ce point).

Mode *I*

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
DX sur Nœud 2	2.16506D-08	0.10
SIXX	4.49911D-02	0.10
SIGN	1.56379D-01	0.10
SITX	0.D+00	0.10

Mode *II*

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
SIGN	0.D+00	0.10
SITX	1.56379D-01	0.10

4 Modélisation B

Validation du joint 3D HEXA8 avec la loi cohésive CZM_EXP_REG

4.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 3D pour l'élément élastique.
Modélisation 3D_JOINT pour l'élément de joint

4.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 12
L'élément élastique est un HEXA8.
L'élément de joint est un HEXA8 dégénéré (nœuds confondus).

4.3 Grandeurs testées et résultats

La remarque sur le pilotage évoquée pour la modélisation A vaut également pour cette modélisation.

Mode I

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
DX sur Nœud 2	2.16506D-08	0.10
SIXX	4.49911D-02	0.10
SIGN	1.56379D-01	0.10
SITX	0.D+00	0.10
SITY	0.D+00	

Mode II

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
SIGN	0.D+00	0.10
SITX	1.56379D-01	0.10
SITY	0.D+00	0.10

Mode III

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
SIGN	0.D+00	0.10
SITX	0.D+00	0.10
SITY	1.56379D-01	0.10

5 Modélisation C

Validation du joint 3D PENTA6 avec la loi cohésive CZM_EXP_REG

5.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 3D pour l'élément élastique.

Modélisation 3D_JOINT pour l'élément de joint

5.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 9

L'élément élastique est un PENTA6.

L'élément de joint est un PENTA6 dégénéré (nœuds confondus).

5.3 Grandeurs testées et résultats

La remarque sur le pilotage évoquée pour la modélisation A vaut également pour cette modélisation.

Mode I

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
DX sur Nœud 2	2.16506D-08	0.10
SIXX	4.49911D-02	0.10
SIGN	1.56379D-01	0.10
SITX	0.D+00	0.10
SITY	0.D+00	0.10

Mode II

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
SIGN	0.D+00	0.10
SITX	1.56379D-01	0.10
SITY	0.D+00	0.10

Mode III

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
SIGN	0.D+00	0.10
SITX	0.D+00	0.10
SITY	1.56379D-01	0.10

6 Modélisation D

Validation du joint 2D avec la loi cohésive CZM_LIN_REG

6.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation en déformations planes D_PLAN pour l'élément élastique.
Modélisation plan pour l'élément de joint (mot clé PLAN_JOINT).

6.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 6
L'élément élastique est un QUAD4.
L'élément de joint est un QUAD4 dégénéré (nœuds confondus).

6.3 Grandeurs testées et résultats

La remarque sur le pilotage évoquée pour la modélisation A vaut également pour cette modélisation.

Mode I

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
DX sur Nœud 2	2.16506D-08	0.10
SIXX	9.27629539D-02	0.10
SIGN	5.4887555D-01	0.10
SITX	0.D+00	0.10

Mode II

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
SIGN	0.D+00	0.10
SITX	4.3314872D-01	0.10

7 Modélisation E

Validation du joint 3D HEXA8 avec la loi cohésive CZM_LIN_REG

7.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 3D pour l'élément élastique.

Modélisation 3D_JOINT pour l'élément de joint

7.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 12

L'élément élastique est un HEXA8.

L'élément de joint est un HEXA8 dégénéré (nœuds confondus).

7.3 Grandeurs testées et résultats

La remarque sur le pilotage évoquée pour la modélisation A vaut également pour cette modélisation.

Mode I

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
DX sur Nœud 2	2.16506D-08	0.10
SIXX	9.27629539D-02	0.10
SIGN	5.4887555D-01	0.10
SITX	0.D+00	0.10
SITY	0.D+00	0.10

Mode II

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
SIGN	0.D+00	0.10
SITX	4.3314616D-01	0.10
SITY	0.D+00	0.10

Mode III

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
SIGN	0.D+00	0.10
SITX	0.D+00	0.10
SITY	2.931186D-01	0.10

8 Modélisation F

Validation du joint 3D PENTA6 avec la loi cohésive CZM_LIN_REG

8.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 3D pour l'élément élastique.
Modélisation 3D_JOINT pour l'élément de joint

8.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 9
L'élément élastique est un PENTA6.
L'élément de joint est un PENTA6 dégénéré (nœuds confondus).

8.3 Grandeurs testées et résultats

La remarque sur le pilotage évoquée pour la modélisation A vaut également pour cette modélisation.

Mode I

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
DX sur Nœud 2	2.16506D-08	0.10
SIXX	9.27629539D-02	0.10
SIGN	5.4887555D-01	0.10
SITX	0.D+00	0.10
SITY	0.D+00	0.10

Mode II

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
SIGN	0.D+00	0.10
SITX	4.3314616D-01	0.10
SITY	0.D+00	0.10

Mode III

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
SIGN	0.D+00	0.10
SITX	0.D+00	0.10
SITY	2.931186D-01	0.10

9 Modélisation G

Validation de l'élément d'interface `HEXA8` avec les lois cohésives `CZM_OUV_MIX` et `CZM_TAC_MIX` en mode d'ouverture.

9.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation `D_PLAN` pour l'élément élastique.

Modélisation `PLAN_INTERFACE_S` pour l'élément d'interface

9.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 12

L'élément élastique est un `HEXA8`.

L'élément d'interface est un `HEXA8` dégénéré (nœuds confondus).

9.3 Grandeurs testées et résultats

La remarque sur le pilotage évoquée pour la modélisation A vaut également pour cette modélisation.

Les résultats sont identiques en mode *I* pour les deux lois, nous ne présentons que ceux obtenus avec `CZM_OUV_MIX` :

Mode *I*

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
DX sur Nœud 2	2.16506D-08	0.10
SIXX	7.37899D-01	0.10
SIGN	3.47849D-01	0.10
SITX	0.D+00	0.10
V1	2.6729D-01	0.10
V4	7.00003D-01	0.10

10 Modélisation H

Validation de l'élément d'interface HEXA20 avec les lois cohésives CZM_OUV_MIX et CZM_TAC_MIX en mode d'ouverture.

10.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 3D pour l'élément élastique.

Modélisation 3D_INTERFACE_S pour l'élément d'interface

10.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 32

L'élément élastique est un HEXA20.

L'élément d'interface est un HEXA20 dégénéré (nœuds confondus).

10.3 Grandeurs testées et résultats

La remarque sur le pilotage évoquée pour la modélisation A vaut également pour cette modélisation. Les résultats sont identiques en mode I pour les deux lois, nous ne présentons que ceux obtenus avec CZM_OUV_MIX :

Mode I

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
DX sur Nœud 2	2.16506D-08	0.10
SIXX	7.37899D-01	0.10
SIGN	3.47849D-01	0.10
SITX	0.D+00	0.10
V1	2.6729D-01	0.10
V4	7.00003D-01	0.10

11 Modélisation I

Validation de l'élément d'interface PENTA15 avec les lois cohésives CZM_OUV_MIX et CZM_TAC_MIX en mode d'ouverture.

11.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 3D pour l'élément élastique.

Modélisation 3D_INTERFACE_S pour l'élément d'interface

11.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 24

L'élément élastique est un PENTA15.

L'élément d'interface est un PENTA15 dégénéré (nœuds confondus).

11.3 Grandeurs testées et résultats

La remarque sur le pilotage évoquée pour la modélisation A vaut également pour cette modélisation. Les résultats sont identiques en mode I pour les deux lois, nous ne présentons que ceux obtenus avec CZM_OUV_MIX :

Mode I

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
DX sur Nœud 2	2.16506D-08	0.10
SIXX	7.37899D-01	0.10
SIGN	3.47849D-01	0.10
SITX	0.D+00	0.10
V1	2.6729D-01	0.10
V4	7.00003D-01	0.10

12 Modélisation J

Validation de l'élément d'interface HEXA8 avec la loi cohésive pour la fatigue CZM_FAT_MIX en mode d'ouverture. Le chargement ici est cyclique (voir 5) en dents de scie. Les instants impairs sont les sommets et les instants pairs correspondent aux creux.

12.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation D_PLAN pour l'élément élastique.

Modélisation PLAN_INTERFACE_S pour l'élément d'interface

12.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 12

L'élément élastique est un HEXA8.

L'élément d'interface est un HEXA8 dégénéré (nœuds confondus).

12.3 Grandeurs testées et résultats

La remarque sur le pilotage évoquée pour la modélisation A vaut également pour cette modélisation.

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
SIXX inst. 3	6.05826	0.10
SIGN (SIEF_ELGA) inst. 9	1.45221	0.10
SIGN (DEPL) inst. 9	1.45221	0.10
SITX (SIEF_ELGA) inst. 7	0.0	0.10
V1 inst. 3	2.04959E-02	0.10
V4 inst. 3	1.94457E-01	0.10

Remarques :

-Le SIXX est testé sur l'élément volumique élastique, les autres tests sont réalisés sur l'élément d'interface.

-On teste la contrainte normale sur un point de gauss : SIGN (SIEF_ELGA) ainsi que le multiplicateur de Lagrange sur un nœud milieu : SIGN (DEPL).

13 Modélisation K

Validation de l'élément d'interface HEXA20 avec la loi cohésive pour la fatigue CZM_FAT_MIX en mode d'ouverture. Le chargement ici est cyclique (voir 5) en dents de scie. Les instants impairs sont les sommets et les instants pairs correspondent aux creux.

13.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 3D pour l'élément élastique.

Modélisation 3D_INTERFACE_S pour l'élément d'interface

13.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 32

L'élément élastique est un HEXA20.

L'élément d'interface est un HEXA20 dégénéré (nœuds confondus).

13.3 Grandeurs testées et résultats

La remarque sur le pilotage évoquée pour la modélisation A vaut également pour cette modélisation. Les grandeurs testées et les résultats sont identiques à ceux réalisés en 2D (voir modélisation J paragraphe 12.3).

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
SIXX inst. 3	6.05826	0.10
SIGN (SIEF_ELGA) inst. 9	1.45221	0.10
SIGN (DEPL) inst. 9	1.45221	0.10
SITX (SIEF_ELGA) inst. 7	0.0	0.10
V1 inst. 3	2.04959E-02	0.10
V4 inst. 3	1.94457E-01	0.10

14 Modélisation L

Validation de l'élément d'interface PENTA15 avec la loi cohésive pour la fatigue CZM_FAT_MIX en mode d'ouverture. Le chargement ici est cyclique (voir 5) en dents de scie. Les instants impairs sont les sommets et les instants pairs correspondent aux creux.

14.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 3D pour l'élément élastique.

Modélisation 3D_INTERFACE_S pour l'élément d'interface

14.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 24

L'élément élastique est un PENTA15.

L'élément d'interface est un PENTA15 dégénéré (nœuds confondus).

14.3 Grandeurs testées et résultats

La remarque sur le pilotage évoquée pour la modélisation A vaut également pour cette modélisation. Les grandeurs testées et les résultats sont identiques à ceux réalisés en 2D (voir modélisation J paragraphe 12.3).

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
SIXX inst. 3	6.05826	0.10
SIGN (SIEF_ELGA) inst. 9	1.45221	0.10
SIGN (DEPL) inst. 9	1.45221	0.10
SITX (SIEF_ELGA) inst. 7	0.0	0.10
V1 inst. 3	2.04959E-02	0.10
V4 inst. 3	1.94457E-01	0.10

15 Modélisation M

Validation de l'élément d'interface `HEXA8` avec la loi cohésive pour la fatigue `CZM_TRA_MIX` en mode d'ouverture. Le chargement ici est cyclique pour parcourir tous les états de la loi.

15.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation `D_PLAN` pour l'élément élastique.

Modélisation `PLAN_INTERFACE_S` pour l'élément d'interface

15.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 12

L'élément élastique est un `HEXA8`.

L'élément d'interface est un `HEXA8` dégénéré (nœuds confondus).

15.3 Grandeurs testées et résultats

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
Réponse globale F inst 9.6	1.03932	0.10
Réponse globale U inst 9.6	0.06235	0.10
<code>SIGN (SIEF_ELGA)</code> inst. 9	9	0.10
<code>SIGN (DEPL)</code> inst. 9	9	0.10
<code>SITX</code> inst. 9.6	0.0	0.10
V1 inst. 2.5 (contact)	0.01	0.10
V4 inst. 2.5 (contact)	0	0.10
V1 inst. 5.4 (plateau)	0.017991	0.10
V4 inst. 5.4 (plateau)	0.079910	0.10
V1 inst. 7.4 (décharge)	0.029991	0.10
V4 inst. 7.4 (décharge)	0.199910	0.10
V1 inst. 12.6 (endo)	0.108662	0.10
V4 inst. 12.6 (endo)	0.869312	0.10
V1 inst. 23 (rupture)	0.16	0.10
V4 inst. 23 (rupture)	1	0.10

On teste la contrainte normale sur un point de gauss : `SIGN (SIEF_ELGA)` ainsi que le multiplicateur de Lagrange sur un nœud milieu : `SIGN (DEPL)`.

16 Modélisation N

Validation de l'élément d'interface `HEXA20` avec la loi cohésive pour la fatigue `CZM_TRA_MIX` en mode d'ouverture. Le chargement ici est cyclique pour parcourir tous les états de la loi.

16.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation `3D` pour l'élément élastique.

Modélisation `3D_INTERFACE_S` pour l'élément d'interface

16.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 32

L'élément élastique est un `HEXA20`.

L'élément d'interface est un `HEXA20` dégénéré (nœuds confondus).

16.3 Grandeurs testées et résultats

Les grandeurs testées et les résultats sont identiques à ceux réalisés en `2D` (voir modélisation *M*).

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
<code>SIGN (SIEF_ELGA)</code> inst. 9	9	0.10
<code>SIGN (DEPL)</code> inst. 9	9	0.10
<code>SITY</code> inst. 9.6	0.0	0.10
<code>V1</code> inst. 2.5 (contact)	0.01	0.10
<code>V4</code> inst. 2.5 (contact)	0	0.10
<code>V1</code> inst. 5.4 (plateau)	0.017991	0.10
<code>V4</code> inst. 5.4 (plateau)	0.079910	0.10
<code>V1</code> inst. 7.4 (décharge)	0.029991	0.10
<code>V4</code> inst. 7.4 (décharge)	0.199910	0.10
<code>V1</code> inst. 12.6 (endo)	0.108662	0.10
<code>V4</code> inst. 12.6 (endo)	0.869312	0.10
<code>V1</code> inst. 23 (rupture)	0.16	0.10
<code>V4</code> inst. 23 (rupture)	1	0.10

On teste la contrainte normale sur un point de gauss : `SIGN (SIEF_ELGA)` ainsi que le multiplicateur de Lagrange sur un nœud milieu : `SIGN (DEPL)`.

À la différence du `2D`, on teste `SITY` plutôt que `SITX`

17 Modélisation O

Validation de l'élément d'interface PENTA15 avec la loi cohésive pour la fatigue CZM_TRA_MIX en mode d'ouverture. Le chargement ici est cyclique pour parcourir tous les états de la loi.

17.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 3D pour l'élément élastique.

Modélisation 3D_INTERFACE_S pour l'élément d'interface

17.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 24

L'élément élastique est un PENTA15.

L'élément d'interface est un PENTA15 dégénéré (nœuds confondus).

17.3 Grandeurs testées et résultats

Les grandeurs testées et les résultats sont identiques à ceux réalisés en 2D (voir modélisation M).

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
SIGN (SIEF_ELGA) inst. 9	9	0.10
SIGN (DEPL) inst. 9	9	0.10
SITY inst. 9.6	0.0	0.10
V1 inst. 2.5 (contact)	0.01	0.10
V4 inst. 2.5 (contact)	0	0.10
V1 inst. 5.4 (plateau)	0.017991	0.10
V4 inst. 5.4 (plateau)	0.079910	0.10
V1 inst. 7.4 (décharge)	0.029991	0.10
V4 inst. 7.4 (décharge)	0.199910	0.10
V1 inst. 12.6 (endo)	0.108662	0.10
V4 inst. 12.6 (endo)	0.869312	0.10
V1 inst. 23 (rupture)	0.16	0.10
V4 inst. 23 (rupture)	1	0.10

On teste la contrainte normale sur un point de gauss : SIGN (SIEF_ELGA) ainsi que le multiplicateur de Lagrange sur un nœud milieu : SIGN (DEPL).

À la différence du 2D on teste SITY plutôt que SITX.

18 Modélisation P

Validation de l'implémentation de la loi `CZM_TAC_MIX` en formulation X-FEM. On teste le mode d'ouverture. Cette modélisation est une adaptation à X-FEM de la modélisation `G`.

18.1 Caractéristiques de la modélisation

La ligne de discontinuité est modélisée par une interface X-FEM, qui est introduite dans le modèle par l'opérateur `DEFI_FISS_XFEM`, avec `TYPE_DISCONTINUITE='INTERFACE'`. Cette ligne traverse le bloc de part en part. Elle se trouve à une distance `0,4` du bord gauche et traverse les éléments (voir fig.2). On dit que l'interface est non conforme.

Les éléments de contact sont introduits par la discrétisation `CONTACT='P2P1'` dans l'opérateur `MODI_MODELE_XFEM`.

La loi cohésive est ensuite définie dans l'opérateur `DEFI_CONTACT`, par les mot-clé `ALGO_CONT='CZM'` et `RELATION='CZM_TAC_MIX'`.

Les éléments surfaciques sont de type `D_PLAN`.

18.2 Caractéristiques du maillage

Le carré est discrétisé à raison de 4 éléments par côté. Par conséquent :

Nombre d'éléments, de type `HEXA8` : 16

Nombre de nœuds : 65.

18.3 Grandeurs testées et résultats

La remarque sur le pilotage évoquée pour la modélisation A vaut également pour cette modélisation. N'ayant plus d'éléments d'interface à proprement parler dans le modèle, on remplace les tests sur `SIGN` et `SIGTX` par des tests sur les multiplicateurs de contact X-FEM `LAGS_C` et `LAGS_F1` respectivement.

Mode I

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
<code>ETA_PILO</code>	8.29181D-01	0.10
<code>DX</code> sur nœud 2	2.16506D-08	0.10
<code>SIXX</code> sur maille 32	7.37899D-01	0.10
<code>LAGS_C</code> sur noeud 9	3.47849D-01	0.10
<code>LAGS_F1</code> sur noeud 9	0.D+00	0.10

19 Synthèse des résultats

Les résultats numériques sont en accord avec la solution analytique. Ces tests permettent de valider les éléments de joint, les éléments d'interface en 2D et 3D , dans les différents modes d'ouverture et XFEM 2D en ouverture.