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_EXP_MIX, CZM_TAC_MIX, CZM_FAT_MIX et CZM_TRA_MIX ainsi que le pilotage par prédiction élastique PRED_ELAS pour les trois premières.

Formulation XFEM : 2D plan avec les lois de comportement cohésives : CZM_TAC_MIX, CZM_OUV_MIX, CZM_LIN_MIX.

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

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_OUV_MIX puis CZM_TAC_MIX

Modélisation Q : PLAN_INTERFACE_S avec CZM_EXP_MIX
Modélisation R : 3D_INTERFACE_S, maille HEXA20 avec CZM_EXP_MIX
Modélisation S : 3D_INTERFACE_S, maille PENTA15 avec CZM_EXP_MIX

Modélisation T : formulation XFEM, maille QUAD4 avec CZM_LIN_MIX, C_PLAN
Modélisation U : formulation XFEM, maille QUAD4 avec CZM_LIN_MIX, D_PLAN

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

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

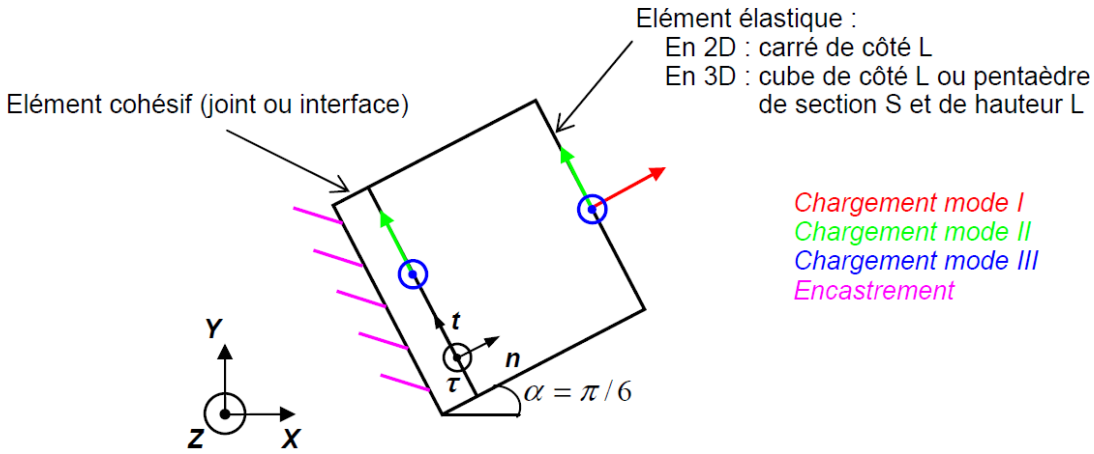


Figure 1 : Représentation du système de deux éléments dans le plan (X, Y). On choisit $L = 1\,mm$.

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.

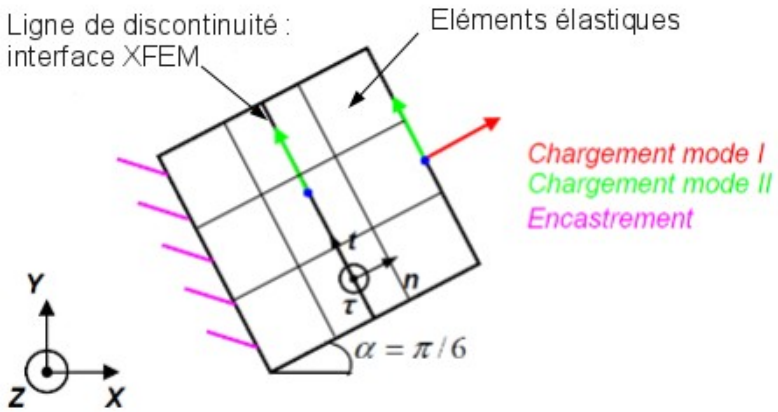


Figure 2 : Modélisation X-FEM dans le plan (X, Y). On choisit $L = 1\,mm$.

1.2 Propriétés du matériau

1.2.1 Lois cohésives

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

1.2.1.1 Matériau RUPT_FRAG

Cube *:* élastique
Module d'Young: $E=0.5\,MPa$ (sauf pour les modélisations J, K et L où on prend $E=100\,MPa$, ce choix est purement pratique)
Coefficient de Poisson $\nu=0$

Elément de joint : lois CZM_EXP_REG, CZM_LIN_REG
Elément d'interface : lois CZM_OUV_MIX, CZM_EXP_MIX,CZM_TAC_MIX, CZM_FAT_MIX
Loi mixte pour éléments finis linéaires : loi CZM_LIN_MIX

Densité d'énergie de surface critique :	$G_c=0.9\,N/mm$	(mot clé : GC)
contrainte critique :	$\sigma_c=1.1\,MPa$	(mot clé : SIGM_C)

Elément de joint :

pénalisation de l'adhérence (petit paramètre de régularisation de l'énergie en 0, voir [R7.02.11])	PENA_ADHERENCE = $10^{-3}\,mm$	(mot clé : PENA_ADHERENCE)
pénalisation du contact	PENA_CONTACT = 1 (valeur par défaut)	(mot clé : PENA_CONTACT)

Elément d'interface :

Pénalisation de lagrangien	PENA_LAGR= 100 (valeur par défaut)	(mot clé : PENA_LAGR)
Rigidité du glissement	RIGI_GLIS= 10 (valeur par défaut)	(mot clé : RIGI_GLIS)

Loi mixte pour éléments finis linéaires :

Pénalisation de lagrangien	PENA_LAGR= 10	(mot clé : PENA_LAGR)

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: $E=10^6\,MPa$ (ce choix est purement pratique)
Coefficient de Poisson $\nu=0$

Elément d'interface : loi CZM_TRA_MIX

Densité d'énergie de surface critique :	$G_c=0.9\,N/mm$	(mot clé : GC)
contrainte critique :	$\sigma_c=9\,MPa$	(mot clé : SIGM_C)
Coefficient de forme extrinsèque	0.0625	(mot clé : COEF_EXTR)
Coefficient de forme plateau plastique	0.3125	(mot clé : COEF_PLAS)
Pénalisation de lagrangien	PENA_LAGR= 100 (valeur par défaut)	(mot clé : PENA_LAGR)
Rigidité du glissement	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.

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

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 DY = 1.250 DZ = 0

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

DX = -1.250 DY = 2.16506350946110 DZ = 0

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

DX = 0.0 DY = 0.0 DZ = 2.5

Pour les lois CZM_OUV_MIX, CZM_EXP_MIX et 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 DY = 1.250 DZ = 0

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

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 $(\boldsymbol{n},\boldsymbol{t},\tau)$. On applique un chargement colinéaire à la normale : $\boldsymbol{U}=U\,\boldsymbol{n}$, 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 $\sigma=\boldsymbol{n}.\boldsymbol{\sigma}.\boldsymbol{n}$ l'unique composante non nulle du tenseur des contrainte de l'élément élastique dans le repère local. On présente la solution de la réponse globale pour les lois cohésives :

- **CZM_EXP_REG, CZM_EXP_MIX**

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 :

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

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

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.
- le pilotage des éléments d'interface s'effectue sur le pourcentage d'énergie dissipé.

- **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 chargemement 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.

- **CZM_LIN_MIX**

La déformation étant uniforme dans le bloc, de la même façon que précédemment, nous pouvons relier le déplacement imposé U sur la face au saut de déplacement à travers l'élément cohésif par $U=[\![u]\!]+L\epsilon$, la déformation ϵ étant donnée par $\epsilon=\frac{\sigma}{E}$. La contrainte étant uniforme dans le bloc, elle est donnée par la loi cohésive comme $\sigma=\sigma_c\left(1-[\![u]\!]\frac{\sigma_c}{2G_c}\right)$. En combinant ces expressions, on obtient :

$$U=[\![u]\!]+L\frac{\sigma_c}{E}\left(1-[\![u]\!]\frac{\sigma_c}{2G_c}\right)$$

Dans ce test, nous validons la bonne implémentation du pilotage du chargement dans ce test, en plus de valider la bonne implémentation de la loi cohésive. De façon générale, lorsque l'on utilise le pilotage du chargement, l'incrément de déplacement Δu est lié au pas de temps Δt par la relation (voir documentation [R5.03.80]) :

$$f(\Delta u)=\frac{\Delta t}{\text{COEF_MULT}}$$

où :
– f est la fonction de pilotage, qui dépend de la quantité de l'on cherche à contrôler,
– COEF_MULT est la valeur renseignée sous le mot-clé du même nom, sous le mot-clé facteur PILOTAGE de la commande STAT_NON_LINE.

Plus particulièrement pour la loi cohésive CZM_LIN_MIX, la fonction de pilotage est :

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

$f(\Delta u)=\frac{[\![u]\!]}{w_c}$ où $w_c=\frac{2G_c}{\sigma_c}$ est le saut de déplacement critique.

Pour récaptuler, l'incrément de saut de déplacement $[\![\Delta u]\!]$ appliqué lors d'un pas de temps Δt s'écrit :

$$[\![\Delta u]\!]=\frac{\Delta t}{\text{COEF_MULT}}\frac{2G_c}{\sigma_c}$$

Pour ce test $\text{COEF_MULT}=10$. La charge de référence à piloter est définie par un déplacement imposé $U_0=2.5$. Le paramètre ETA_PILO donnant l'intensité de la charge sera donc donné par $\text{ETA_PILO}=\frac{U}{U_0}$.

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**

$\sigma_T=\sigma_c.e^{-\frac{\sigma_c}{G_c}.\delta_T}$ T désignant respectivement t en mode II et τ en mode III

- **CZM_LIN_REG, CZM_OUV_MIX, CZM_TAC_MIX**

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

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

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

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

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 (%)
SIG N	0.D+00	0.10
SITX	0.D+00	0.10
SITY	1.56379D-01	0.10

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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.
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

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

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

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

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

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

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).

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

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

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

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

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

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
SIGN (SIEF_ELGA) inst. 9	9	0.10
SIGN (DEPL) inst. 9	9	0.10
SITX 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).

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

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 $2\mathrm{D}$ (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 $2\mathrm{D}$, on teste SITY plutôt que SITX

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

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 $2\mathrm{D}$ (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 $2\mathrm{D}$ on teste SITY plutôt que SITX.

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

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='STANDARD' 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 (%)
ETA_PILO	8.29181D-01	0.10
DX sur nœud 2	2.16506D-08	0.10
SIXX sur maille 32	7.37899D-01	0.10
LAGS_C sur noeud 9	3.47849D-01	0.10
LAGS_F1 sur noeud 9	0.D+00	0.10

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

19 Modélisation Q

Validation de l'élément d'interface HEXA8 avec les lois cohésives CZM_EXP_MIX en mode d'ouverture.

19.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation D_PLAN pour l'élément élastique.
Modélisation PLAN_INTERFACE_S pour l'élément d'interface

19.2 Caractéristiques du maillage

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

19.3 Grandeurs testées et résultats

La remarque sur le pilotage évoquée pour la modélisation A vaut également pour cette modélisation.
On vérifie l'expression analytique du déplacement en fonction de la force imposée ainsi que les contraintes et les variables internes qui en découlent pour un pourcentage d'énergie dissipée de 0.3

Mode I

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
DX sur Nœud 2	1.5D-00	0.10
SIXX	4.89D-01	0.10
SIGN	6.52D-01	0.10
SITX	0.D+00	0.10
V1	4.276D-01	0.10
V4	7.D-01	0.10

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

20 Modélisation R

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

20.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 3D pour l'élément élastique.
Modélisation 3D_INTERFACE_S pour l'élément d'interface

20.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 32
L'élément élastique est un HEXA20.
L'élément d'interface est un HEXA20 dégénéré (nœuds confondus).

20.3 Grandeurs testées et résultats

La remarque sur le pilotage évoquée pour la modélisation A vaut également pour cette modélisation.
On vérifie l'expression analytique du déplacement en fonction de la force imposée ainsi que les contraintes et les variables internes qui en découlent, pour un pourcentage d'énergie dissipée de 0.3

Mode I

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
DX sur Nœud 2	1.5D-00	0.10
SIXX	4.89D-01	0.10
SIGN	6.52D-01	0.10
SITX	0.D+00	0.10
V1	4.276D-01	0.10
V4	7.D-01	0.10

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

21 Modélisation S

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

21.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 3D pour l'élément élastique.
Modélisation 3D_INTERFACE_S pour l'élément d'interface

21.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 24
L'élément élastique est un PENTA15.
L'élément d'interface est un PENTA15 dégénéré (nœuds confondus).

21.3 Grandeurs testées et résultats

La remarque sur le pilotage évoquée pour la modélisation A vaut également pour cette modélisation.
On vérifie l'expression analytique du déplacement en fonction de la force imposée ainsi que les contraintes et les variables internes qui en découlent pour un pourcentage d'énergie dissipée de 0.3

Mode I

Grandeur testée	Référence	Tolérance (%)
DX sur Nœud 2	1.5D-00	0.10
SIXX	4.89D-01	0.10
SIGN	6.52D-01	0.10
SITX	0.D+00	0.10
V1	4.276D-01	0.10
V4	7.D-01	0.10

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

22 Modélisation T

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

22.1 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 de $0,4\,mm$ 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='MORTAR' 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_LIN_MIX'.
Les éléments surfaciques sont de type C_PLAN.

22.2 Caractéristiques du maillage

Le carré est discrétisé à raison de 4 éléments par côté. Par conséquent :
Nombre d'éléments, de type HEXA4 : 16
Nombre de nœuds : 65.

22.3 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	Pas de temps	Référence	Tolérance (%)
DX sur nœud 2	4	1.71003596	0.10
ETA_PILO	4	7.898168291D-01	0.10
SIXX sur maille 32	2	6.599934D-01	0.10
LAGS_C sur noeud 9	9	1.099989D-01	0.10
LAGS_F1 sur noeud 9	8	0.D+00	0.10

L'obtention de ces valeurs se fait d'après les explications de la partie 2.2.

Le saut de déplacement à un instant t est : $[\![u]\!]=\frac{t}{\text{COEF_MULT}}\frac{2G_c}{\sigma_c}$. Ainsi, $[\![u]\!]=0.163636\ t$ (en mm).

On peut alors obtenir la norme du déplacement appliqué par $U=[\![u]\!]+L\frac{\sigma_c}{E}\left(1-[\![u]\!]\frac{\sigma_c}{2G_c}\right)$. Pour $t=4$, on obtient $U=1.97\,mm$, d'où $\text{DX}=U\cos\left(\frac{\pi}{6}\right)=1.71\,mm$ et $\text{ETA_PILO}=\frac{U}{U_0}=0.78\,mm$

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

A partir de $[\![u]\!]$, on obtient la contrainte par $\sigma=\sigma_c\left(1-[\![u]\!]\frac{\sigma_c}{2G_c}\right)$. Pour $t=9$, $\sigma=0.11\,Mpa$, ce qui, compte-tenu du chargement en mode I pur, peut être testé par le multiplicateur de lagrange LAGS_C. Pour $t=2$, on trouve $\sigma=0.88\,Mpa$, et on a $\sigma_{xx}=\sigma\cos^2(\frac{\pi}{6})=0.66\,MPa$, qui est la valeur testée.

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

23 Modélisation U

Validation de l'implémentation de la loi CZM_LIN_MIX en formulation X-FEM. On teste le mode d'ouverture. Cette modélisation est identique à la modélisation T, mais en déformations planes (D_PLAN) au lieu de contraintes planes (C_PLAN).

23.1 Caractéristiques de la modélisation

Strictement identiques à la modélisation T, sauf que les éléments surfaciques sont de type D_PLAN.

23.2 Caractéristiques du maillage

Le carré est discrétisé à raison de 4 éléments par côté. Par conséquent :
Nombre d'éléments, de type HEXA4 : 16
Nombre de nœuds : 65.

23.3 Grandeurs testées et résultats

Les grandeurs testées sont rigoureusement les mêmes que dans la modélisation T, et sont donc obtenues par les mêmes calculs, d'après les explications de la partie 2.2.

Mode I

Grandeur testée	Pas de temps	Référence	Tolérance (%)
DX sur nœud 2	4	1.71003596	0.10
ETA_PILO	4	7.898168291D-01	0.10
SIXX sur maille 32	2	6.599934D-01	0.10
LAGS_C sur noeud 9	9	1.099989D-01	0.10
LAGS_F1 sur noeud 9	8	0.D+00	0.10

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

24 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.

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