SSNV182 – Bloc avec interface en contact frottant avec X-FEM

Résumé

Ce test a pour but de valider la prise en compte du contact sur les lèvres de la fissure, en se limitant au cas où la fissure traverse complètement la structure. Le contact est pris en compte par la méthode continue [bib1] adaptée au cadre de la méthode X-FEM [bib2]. Deux algorithmes de contact sont testés : la méthode du Lagrangien augmenté et la méthode pénalisée [bib2].

Ce test met en jeu un bloc parallélépipédique en compression modélisé en $2D$ et $3D$. L'interface le traversant est représentée par une level-set dans le cadre de la méthode X-FEM. On prend en compte plusieurs positions angulaires de l'interface : l'interface suit les faces des éléments ($\theta=0°$) et l'interface coupe les éléments ($\theta=26.56°$ en $3D$ et $\theta=30°$ en $2D$). En prenant un coefficient de frottement de Coulomb suffisamment élevé pour qu'il y ait adhérence, on retrouve la solution du même problème sans interface. Les modélisations d, e et f permettent de valider la méthode également en $2D$.

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

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

La structure est un parallélépipède droit à base carrée et sain. Les dimensions du bloc (voir [Figure -1.1-a]) sont : $LX=5\,m$, $LY=20\,m$ et $LZ=20\,m$. Il ne comporte aucune fissure.

L'interface est introduite par des fonctions de niveaux (level sets) directement dans le fichier de commandes à l'aide de l'opérateur DEFI_FISS_XFEM [U4.82.08]. L'interface est présente au milieu de la structure par le biais de sa représentation par les level sets. La level set normale (LSN) permet de définir une interface plane faisant un angle θ avec le plan Oxy par l'équation suivante :

$$LSN=Z-(aY+b) \qquad \textbf{éq 1.1-1}$$

où a est la pente de l'interface, soit $a=-\tan(\theta)$ et $b=\frac{LZ}{2}-a\frac{LY}{2}$.

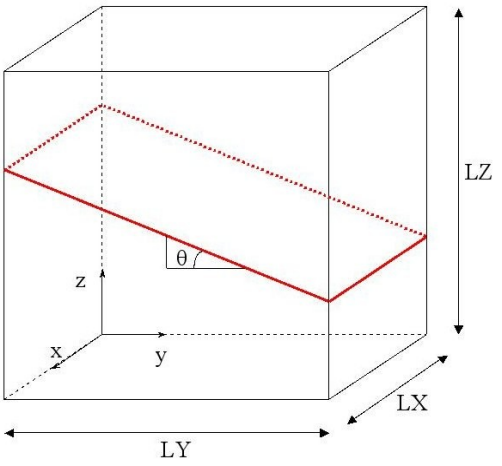


Figure -1.1-a : Géométrie du barreau et positionnement de l'interface

En $2D$, on a une structure équivalente.

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

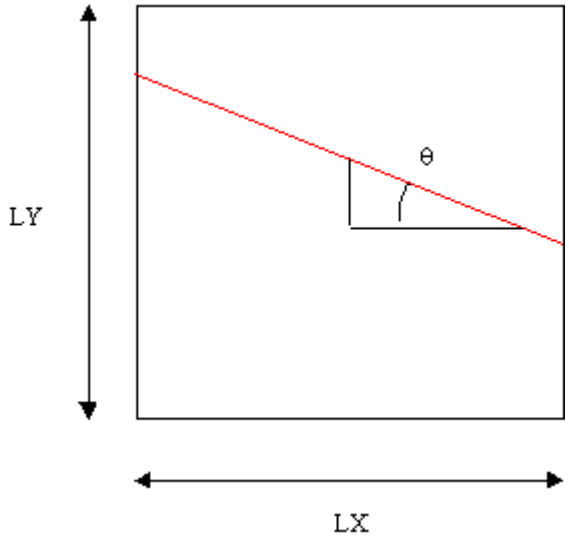


Figure 1.1-b **: Géométrie et positionnement de l'interface en** $2D$

1.2 Propriétés du matériau

Module d'Young : $E=100\,MPa$
Coefficient de Poisson : $\nu=0$.

1.3 Conditions aux limites et chargements

Les nœuds de la face inférieure du barreau sont encastrés et un déplacement $UZ=-10^{-6}m$ est imposé sur ceux de la face supérieure qui correspond à un chargement en pression suivant l'axe z. Les déplacements suivant les axes x et y sont bloqués pour les nœuds de la surface supérieure. En $2D$, le déplacement s'effectue selon l'axe y.

1.4 Caractéristiques du maillage

La structure est modélisée en $3D$ par un maillage régulier composé de $5\times20\times20$ HEXA8 [Figure 1.4-a].

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

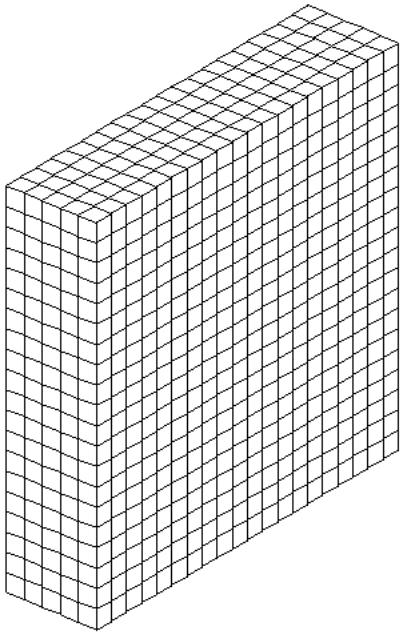


Figure -1.4-a : Maillage 3D

Ce maillage est composé d'éléments finis linéaires. Cependant, dans le cadre de la méthode continue [bib1] avec X-FEM [bib2], il est nécessaire de passer à des éléments linéaires un peu spéciaux. Ces éléments ont des fonctions de forme linéaires et une maille support quadratique. Sur ces éléments, les nœuds sommet portent les inconnues du déplacement, et les nœuds milieu portent les inconnues liées au contact. De plus, lorsque l'interface suit la bordure d'un élément, les nœuds sommet de l'élément portent aussi les inconnues de contact.

Pour les cas-test 2D , la structure est modélisée par un maillage régulier composé de 20×20 QUAD4.

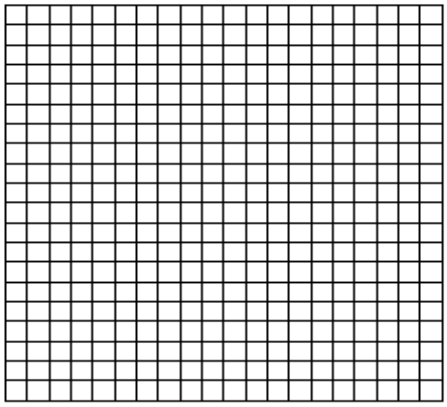


Figure -1.4-b : Maillage 2D

1.5 Bibliographie

1. MASSIN P., BEN DHIA H., ZARROUG M. : Éléments de contacts dérivés d'une formulation hybride continue, Manuel de référence du *Code_Aster*, [R5.03.52]

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

2. MASSIN P., GENIAUT S. : Méthode X-FEM, Manuel de référence du *Code_Aster*, [R7.02.12]

3. TARDIEU N., VAUTIER I., LORENTZ E. : Algorithme non linéaire quasi-statique, Manuel de Référence du *Code_Aster*, [R5.03.01]

4. DHATT G., TOUZOT G. : Une présentation de la méthode des éléments finis, Maloine Ed., PARIS

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

2 Modélisation A : interface droite, méthode du Lagrangien augmenté

Dans cette modélisation, on représente une interface droite, l'angle θ vaut alors 0. L'interface coïncide avec les faces de certains éléments finis. La méthode du Lagrangien augmenté est utilisée pour le traitement du contact / frottement.

2.1 Résolution analytique

Lorsque le contact adhérant est pris en compte sur l'interface, le problème est équivalent à celui d'un barreau sain en compression pure. La solution du problème est celle du même problème sans interface.
La contrainte dans la structure est :

$$\sigma_{zz} = E \frac{UZ}{LZ} \qquad \textbf{éq 2.1-1}$$

et la valeur de la pression de contact sur l'interface est :

$$\lambda = \sigma_{zz} \qquad \textbf{éq 2.1-2}$$

Avec les valeurs numériques précédemment introduites, $\lambda = -5.0\, Pa$.

2.2 Fonctionnalités testées

Comme il est signalé au paragraphe précédent, il est nécessaire d'activer le frottement. Dans l'opérateur DEFI_CONTACT, on stipule alors FROTTEMENT='COULOMB', et le coefficient de frottement est choisi égal à 1.

De plus, dès la première itération des contraintes actives, on fait l'hypothèse que les points de contact ont un statut contactant. Ceci est possible en spécifiant CONTACT_INIT='OUI'.
Sinon, à la fin de la première itération, le contact n'étant pas activé, le bloc supérieur rentre dans le bloc inférieur mais les deux blocs ne se sont pas déformés. Leur état de contraintes est donc nul, et il faut alors choisir un critère global (RESI_GLOB_MAXI) pour la convergence de l'algorithme de Newton-Raphson [bib3], critère qui risque d'être inadapté dans la suite des calculs quand le contact sera activé.

Pour éviter cela, et pour avoir un critère relatif, il faut un état de contraintes non nul dès la première itération, et donc activer le contact dès le début.

L'algorithme des contraintes actives converge donc en une itération.

2.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les valeurs de la pression normale de contact après convergence des itérations de l'opérateur STAT_NON_LINE et de la boucle sur les contraintes actives. On teste tous les points de contact, qui correspondent aux nœuds du maillage sur l'interface. On vérifie que l'on retrouve bien les valeurs déterminées au [§2.1].

Identification	Référence	% Tolérance
LAGS_C pour tous les nœuds de l'interface	-5.00	1.00e-10

Pour tester tous les nœuds en une seule fois, on teste le minimum et le maximum de la colonne.

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

2.4 Commentaires

Cette modélisation montre les possibilités de la méthode continue de contact appliquée au cadre X-FEM. L'avantage est que la procédure d'appariement est intrinsèque à la méthode X-FEM puisque ici, il n'y a pas vraiment de surface maître et esclave vu que l'on reste en petits déplacements.

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

3 Modélisation B : interface penchée, méthode du Lagrangien augmenté

Dans cette modélisation, on représente une interface penchée. L'angle θ vaut $\arctan(1/2)$, soit une pente α valant $-1/2$. L'interface ne coïncide plus avec les faces des éléments finis, et coupe maintenant les éléments. La normale à l'interface est notée n et le vecteur tangent est noté τ :

$$n=\begin{pmatrix}0\\1/\sqrt{5}\\2/\sqrt{5}\end{pmatrix},\qquad \tau=\begin{pmatrix}0\\2/\sqrt{5}\\-1/\sqrt{5}\end{pmatrix} \qquad \textbf{éq 4-1}$$

La méthode du Lagrangien augmenté est utilisée pour le traitement du contact / frottement.

3.1 Résolution analytique

L'interface étant penchée, il risque d'y avoir glissement. Pour éviter cela, on force l'adhérence en choisissant un coefficient de frottement de Coulomb suffisamment élevé. Théoriquement, il suffit de prendre :

$$\mu>\tan(\theta) \qquad \textbf{éq 4.1-1}$$

Ainsi, la solution du problème reste identique à celle du même problème sans interface.
La contrainte dans la structure est toujours celle de [éq 2.1-1], et la valeur de la pression de contact sur l'interface est fonction de la normale n à l'interface :

$$\lambda=n.\sigma.n=n_z\sigma_{zz}n_z \qquad \textbf{q 4.1-2}$$

où n_z est la composante suivant z de n.

Le semi-multiplicateur de frottement Λ est défini par :

$$r_\tau=\lambda\mu\Lambda \qquad \textbf{éq 4.1-3}$$

Avec la densité d'effort tangentiel s'écrivant comme suit :

$$r_\tau=(\tau.\sigma.n)\tau \qquad \textbf{éq 4.1-4}$$

D'où :

$$\Lambda=\left(\frac{1}{\mu}\frac{\tau.\sigma.n}{n.\sigma.n}\right)\tau=\left(\frac{1}{\mu}\frac{\tau_z}{n_z}\right)\tau \qquad \textbf{éq 4.1-5}$$

On prend $\mu=1$.
Avec les valeurs numériques précédemment introduites, $\lambda=-4.0\,MPa$ et $\Lambda.\tau=-0.5$.

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

3.2 Grandeurs testées et résultats

On teste les valeurs de la pression normale de contact et du semi-multiplicateur de frottement après convergence des itérations de l'opérateur STAT_NON_LINE, de la boucle sur les contraintes actives et de la boucle sur les seuils de frottement. On teste la valeur des multiplicateurs de contact et de frottement aux points de contact du maillage de visualisation : le GROUP_NO des points de contact est extrait par le mot-clé PREF_GROUP_CO de la commande POST_CHAM_XFEM.
On vérifie que l'on retrouve bien les valeurs déterminées au [§3.1]. LAGS_F1 correspond au semi-multiplicateur de frottement dans le direction Ox (il est donc nul), alors que LAGS_F2 correspond au semi-multiplicateur de frottement suivant τ .

Identification	Référence	% Tolérance
LAGS_C pour tous les points de contact	-4.00	1.00e-8
LAGS_F1 pour tous les points de contact	0.00	1.00e-8
LAGS_F2 pour tous les points de contact	-0.50	1.00e-8

Pour tester tous les points de contact en une seule fois, on teste la valeur MIN et la valeur MAX de la colonne.

3.3 Commentaires

Précisons que dans cette étude, le mot clé CONTACT_INIT = 'OUI' permet de commencer la boucle sur les contraintes actives avec une hypothèse de statut contactant pour tous les points de contact. Cela autorise à prendre un critère relatif ('RESI_RELA_MAX') pour la convergence des itérations de Newton. En effet, si on choisit CONTACT_INIT = 'NON', lors de la phase de prédiction de Newton, le contact n'étant pas activé, la structure supérieure se déplace sans se déformer, et celle inférieure reste immobile. Les contraintes sont alors nulles et un critère relatif n'est pas utilisable, seul un critère global l'est, dont la valeur est laissée au choix de l'utilisateur. Le problème est que cette valeur peut se révéler par la suite du calcul (contact actif….) inadéquate aux chargements et aux contraintes alors en jeu. Ainsi, il vaut mieux pourvoir prendre un unique critère relatif dès le début.

De plus, la valeur initiale du seuil de frottement a été prise à -10^9 afin d'être sûr que l'on ait adhérence dès la 1ère itération sur les seuils de frottement.

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

4 Modélisation C : interface droite et sous-intégration, méthode du Lagrangien augmenté

Cette modélisation est identique à la modélisation A, sauf que le schéma d'intégration numérique des termes de contact a changé.

Dans la modélisation A, on utilise un schéma de Gauss à 12 points par facettes triangulaires de contact. Dans la modélisation C, on utilise un schéma réduit à 4 points seulement.

En effet, le schéma doit permettre l'intégration exacte d'un champ de pression constant. L'intégrande sur la facette est alors un monôme en $x^i y^i$ avec $i+j \leq 3$.

D'après [bib4], un schéma à 4 points de Gauss suffit.

4.1 Grandeurs testées et résultats

On teste les mêmes valeurs que pour la modélisation A.

Identification	Référence	% différence
LAGS_C pour tous les points de contact	-5.00	0.20
LAGS_F1 pour tous les points de contact	0.00	1.00e-10
LAGS_F2 pour tous les points de contact	0.00	1.00e-10

Pour tester tous les nœuds de l'interface en une seule fois, on teste les valeurs minimum et maximum.

4.2 Commentaires

Cette modélisation montre qu'un schéma d'intégration réduit à 4 points permet de passer le patch test où la solution en pression est constante.

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

5 Modélisation D : interface droite en contraintes planes, méthode du Lagrangien augmenté

Dans cette modélisation, on représente une interface droite, l'angle θ vaut alors 0. L'interface coïncide avec les faces de certains éléments finis.

Dans cette modélisation, on considère l'hypothèse de contraintes planes (bien qu'ici, le coefficient de Poisson étant nul, il n'y a pas de différence entre contraintes et déformations planes).

La méthode du Lagrangien augmenté est utilisée pour le traitement du contact/frottement.

5.1 Résolution analytique

L'interface étant droite, et l'état de compression est uniaxial et normal à l'interface, il n'y a pas de glissement possible. La solution du problème est celle du même problème sans interface.
La contrainte dans la structure est :

$$\sigma_{zz} = E\frac{UY}{LY} \qquad \textbf{éq 8.1-1}$$

et la valeur de la pression de contact sur l'interface est :

$$\lambda = \sigma_{zz} \qquad \textbf{éq 8.1-2}$$

Avec les valeurs numériques précédemment introduites, $\lambda = -5.0\,Pa$.

5.2 Fonctionnalités testées

Ce cas ne nécessite pas l'activation du frottement. Dans l'opérateur DEFI_CONTACT, on stipule alors FROTTEMENT='SANS'.

De plus, dès la première itération des contraintes actives, on fait l'hypothèse que les points de contact ont un statut contactant. Ceci est possible en spécifiant CONTACT_INIT='OUI'.
Sinon, à la fin de la première itération, le contact n'étant pas activé, le bloc supérieur rentre dans le bloc inférieur mais les deux blocs ne se sont pas déformés. Leur état de contraintes est donc nul, et il faut alors choisir un critère global (RESI_GLOB_MAXI) pour la convergence de l'algorithme de Newton-Raphson [bib3], critère qui risque d'être inadapté dans la suite des calculs quand le contact sera activé.
Pour éviter cela, et pour avoir un critère relatif, il faut un état de contraintes non nul dès la première itération, et donc activer le contact dès le début.

L'algorithme des contraintes actives converge donc en une itération.

5.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les valeurs de la pression normale de contact après convergence des itérations de l'opérateur STAT_NON_LINE et de la boucle sur les contraintes actives. On teste tous les points de contact, qui correspondent aux nœuds du maillage sur l'interface. On vérifie que l'on retrouve bien les valeurs déterminées au [§5.1].

Identification	Référence	% différence
LAGS_C pour tous les nœuds de l'interface	-5.00	1.00e-10
LAGS_F1 pour tous les nœuds de l'interface	0.00	1.00e-5

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

Pour tester tous les nœuds en une seule fois, on teste le minimum et le maximum de la colonne.

5.4 Commentaires

Cette modélisation montre les possibilités de la méthode continue de contact appliquée au cadre X-FEM en $2D$. L'avantage est que la procédure d'appariement est intrinsèque à la méthode X-FEM puisque ici, il n'y a pas vraiment de surface maître et esclave pour le traitement du contact puisque l'on reste en petits déplacements.

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

6 Modélisation E : interface penchée en contraintes planes, méthode du Lagrangien augmenté

Dans cette modélisation, on représente une interface penchée. L'angle θ vaut $30°$. L'interface ne coïncide plus avec les faces des éléments finis, et coupe maintenant les éléments. La normale à l'interface est notée n et le vecteur tangent est noté τ :

$$n=\begin{pmatrix}1/2\\ \sqrt{3}/2\end{pmatrix},\qquad \tau=\begin{pmatrix}-\sqrt{3}/2\\ 1/2\end{pmatrix} \qquad \textbf{éq 10-1}$$

Dans cette modélisation, on considère l'hypothèse de contraintes planes (bien qu'ici, le coefficient de Poisson étant nul, il n'y a pas de différence entre contraintes et déformations planes).

La méthode du Lagrangien augmenté est utilisée pour le traitement du contact/frottement.

6.1 Résolution analytique

Pour éviter le glissement on prend $\mu=1$.

On doit avoir :

$$\lambda=\boldsymbol{n}.\boldsymbol{\sigma}.\boldsymbol{n}=n_y\sigma_{yy}n_y \qquad \textbf{éq 10.1-2}$$

où n_y est la composante suivant y de n.

Le semi-multiplicateur de frottement Λ est défini par :

$$r_\tau=\lambda\mu\Lambda \qquad \textbf{éq 10.1-3}$$

Avec la densité d'effort tangentiel s'écrivant comme suit :

$$r_\tau=(\tau.\sigma.n)\tau \qquad \textbf{éq 10.1-4}$$

D'où :

$$\Lambda=\left(\frac{1}{\mu}\frac{\tau.\sigma.n}{n.\sigma.n}\right)\tau=\left(\frac{1}{\mu}\frac{\tau_y}{n_y}\right)\tau \qquad \textbf{éq 10.1-5}$$

On prend $\mu=1$.
Avec les valeurs numériques précédemment introduites, $\lambda=-3.75\,Pa$ et $\Lambda.\tau=1/\sqrt{3}$.

6.2 Grandeurs testées et résultats

On teste les valeurs de la pression normale de contact et du semi-multiplicateur de frottement après convergence des itérations de l'opérateur STAT_NON_LINE, de la boucle sur les contraintes actives et de la boucle sur les seuils de frottement. On teste la valeur des multiplicateurs de contact et de frottement aux points de contact du maillage de visualisation : le GROUP_NO des points de contact est extrait par le mot-clé PREF_GROUP_CO de la commande POST_CHAM_XFEM.

Identification	Référence	% différence
LAGS_C pour tous les points de contact	-3.75	0.01

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

LAGS_F1 pour tous les points de contact	5.77350E-01	0.01

Pour tester tous les points de contact en une seule fois, on teste le minimum et le maximum de la colonne.

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

7 Modélisation F : interface penchée en déformations planes, méthode du Lagrangien augmenté

Cette modélisation est la même que la modélisation E, excepté le fait que l'on considère l'hypothèse de déformations planes. Comme le coefficient de Poisson est nul, cela n'a pas d'influence sur les résultats.

7.1 Grandeurs testées et résultats

On teste les valeurs de la pression normale de contact et du semi-multiplicateur de frottement après convergence des itérations de l'opérateur STAT_NON_LINE, de la boucle sur les contraintes actives et de la boucle sur les seuils de frottement. On teste tous les points de contact. On teste la valeur des multiplicateurs de contact et de frottement aux points de contact du maillage de visualisation : le GROUP_NO des points de contact est extrait par le mot-clé PREF_GROUP_CO de la commande POST_CHAM_XFEM.

Identification	Référence	% différence
LAGS_C pour tous les points de contact	-3.75	0.01
LAGS_F1 pour tous les points de contact	5.77350E-01	0.01

Pour tester tous les points de contact en une seule fois, on teste le minimum et le maximum de la colonne.

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

8 Modélisation G : interface droite, méthode pénalisée

Dans cette modélisation, on représente une interface droite, l'angle θ vaut alors 0. L'interface coïncide avec les faces de certains éléments finis. La méthode pénalisée est utilisée pour le traitement du contact / frottement.

8.1 Résolution analytique

La solution analytique est la même que celle de la modélisation A.

8.2 Fonctionnalités testées

Dans l'opérateur DEFI_CONTACT, on stipule alors FROTTEMENT='COULOMB', et le coefficient de frottement est choisi égal à 1.

Des coefficients de pénalisation très élevés permettent de s'approcher d'autant plus précisément de la solution. Les valeurs de ces coefficients sont toutefois limitées par le conditionnement de la matrice de rigidité.

8.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les valeurs de la pression normale de contact après convergence des itérations de l'opérateur STAT_NON_LINE et de la boucle sur les contraintes actives. On teste tous les points de contact, qui correspondent aux nœuds du maillage sur l'interface. On vérifie que l'on retrouve bien les valeurs déterminées au [§2.1].

Identification	Référence	% différence
LAGS_C pour tous les nœuds de l'interface	-5.00	1.00e-10
LAGS_F1 pour tous les nœuds de l'interface	0.	1.00e-10
LAGS_F2 pour tous les nœuds de l'interface	0.	1.00e-10

Pour tester tous les nœuds en une seule fois, on teste la valeur MIN et la valeur MAX de la colonne.

8.4 Commentaires

Moyennant des coefficients de pénalisation importants, la méthode pénalisée permet d'obtenir les mêmes résultats que la méthode du Lagrangien augmenté.

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

9 Modélisation H : interface penchée, méthode pénalisée

Dans cette modélisation, on représente une interface penchée. L'angle θ vaut $\arctan(1/2)$, soit une pente α valant $-1/2$. L'interface ne coïncide plus avec les faces des éléments finis, et coupe maintenant les éléments. La normale à l'interface est notée n et le vecteur tangent est noté τ :

$$n=\begin{pmatrix}0\\1/\sqrt{5}\\2/\sqrt{5}\end{pmatrix}, \qquad \tau=\begin{pmatrix}0\\2/\sqrt{5}\\-1/\sqrt{5}\end{pmatrix} \qquad \textbf{éq 16-1}$$

La méthode pénalisée est utilisée pour le traitement du contact/frottement.

9.1 Résolution analytique

La solution analytique est la même que celle de la modélisation B.

9.2 Fonctionnalités testées

Ce cas nécessite l'activation du frottement. Dans l'opérateur DEFI_CONTACT, on stipule alors FROTTEMENT='COULOMB'.

Des coefficients de pénalisation très élevés permettent d'approcher d'autant plus précisément la solution. Les valeurs de ces coefficients sont toutefois limitées par le conditionnement de la matrice de rigidité.

9.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les valeurs de la pression normale de contact et du semi-multiplicateur de frottement après convergence des itérations de l'opérateur STAT_NON_LINE, de la boucle sur les contraintes actives et de la boucle sur les seuils de frottement. On teste la valeur des multiplicateurs de contact et de frottement aux points de contact du maillage de visualisation : le GROUP_NO des points de contact est extrait par le mot-clé PREF_GROUP_CO de la commande POST_CHAM_XFEM.
On vérifie que l'on retrouve bien les valeurs déterminées au [§3.1]. LAGS_F1 correspond au semi-multiplicateur de frottement dans le direction Ox (il est donc nul), alors que LAGS_F2 correspond au semi-multiplicateur de frottement suivant τ.

Identification	Référence	% différence
LAGS_C pour tous les points de contact	-4.00	5.00e-3
LAGS_F1 pour tous les points de contact	0.00	5.00e-3
LAGS_F2 pour tous les points de contact	-0.50	5.00e-3

Pour tester tous les points de contact en une seule fois, on teste la valeur MIN et la valeur MAX de la colonne.

9.4 Commentaires

Moyennant des coefficients de pénalisation importants, la méthode pénalisée permet d'obtenir les mêmes résultats que la méthode du Lagrangien augmenté.

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

10 Modélisation I : interface droite en contraintes planes, méthode pénalisée

Dans cette modélisation, on représente une interface droite, l'angle θ vaut alors 0. L'interface coïncide avec les faces de certains éléments finis.

Dans cette modélisation, on considère l'hypothèse de contraintes planes (bien qu'ici, le coefficient de Poisson étant nul, il n'y a pas de différence entre contraintes et déformations planes).

La méthode pénalisée est utilisée pour le traitement du contact/frottement.

10.1 Résolution analytique

La solution analytique est la même que celle de la modélisation D.

10.2 Fonctionnalités testées

Ce cas ne nécessite pas l'activation du frottement. Dans l'opérateur DEFI_CONTACT, on stipule alors FROTTEMENT='SANS'.

Des coefficients de pénalisation très élevés permettent de s'approcher d'autant plus précisément de la solution. Les valeurs de ces coefficients sont toutefois limitées par le conditionnement de la matrice de rigidité.

10.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les valeurs de la pression normale de contact après convergence des itérations de l'opérateur STAT_NON_LINE et de la boucle sur les contraintes actives. On teste tous les points de contact, qui correspondent aux nœuds du maillage sur l'interface. On vérifie que l'on retrouve bien les valeurs déterminées au [§2.1].

Identification	Référence	% Tolérance
LAGS_C pour tous les nœuds de l'interface	-5.00	0.001
LAGS_F1 pour tous les nœuds de l'interface	0.00	0.001

Pour tester tous les nœuds en une seule fois, on teste le minimum et le maximum de la colonne.

10.4 Commentaires

Moyennant des coefficients de pénalisation importants, la méthode pénalisée permet d'obtenir les mêmes résultats que la méthode du Lagrangien augmenté.

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

11 Modélisation J : interface penchée en contraintes planes, méthode pénalisée

Dans cette modélisation, on représente une interface penchée. L'angle θ vaut $30°$. L'interface ne coïncide plus avec les faces des éléments finis, et coupe maintenant les éléments. La normale à l'interface est notée n et le vecteur tangent est noté τ :

$$n=\begin{pmatrix}1/2\\ \sqrt{3}/2\end{pmatrix},\qquad \tau=\begin{pmatrix}-\sqrt{3}/2\\ 1/2\end{pmatrix} \qquad \textbf{éq 20-1}$$

Dans cette modélisation, on considère l'hypothèse de contraintes planes (bien qu'ici, le coefficient de Poisson étant nul, il n'y a pas de différence entre contraintes et déformations planes).

La méthode pénalisée est utilisée pour le traitement du contact/frottement.

11.1 Résolution analytique

La solution analytique est la même que celle de la modélisation E.

11.2 Fonctionnalités testées

Dans l'opérateur DEFI_CONTACT, on stipule alors FROTTEMENT='COULOMB', et le coefficient de frottement est choisi égal à 1.

Des coefficients de pénalisation très élevés permettent de s'approcher d'autant plus précisément de la solution. Les valeurs de ces coefficients sont toutefois limitées par le conditionnement de la matrice de rigidité.

11.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les valeurs de la pression normale de contact et du semi-multiplicateur de frottement après convergence des itérations de l'opérateur STAT_NON_LINE, de la boucle sur les contraintes actives et de la boucle sur les seuils de frottement. On teste la valeur des multiplicateurs de contact et de frottement aux points de contact du maillage de visualisation : le GROUP_NO des points de contact est extrait par le mot-clé PREF_GROUP_CO de la commande POST_CHAM_XFEM.

Identification	Référence	% Tolérance
LAGS_C pour tous les points de contact	-3.75	0.01
LAGS_F1 pour tous les points de contact	5.77350E-01	0.01

Pour tester tous les points de contact en une seule fois, on teste le MIN et le MAX de la colonne.

11.4 Commentaires

Moyennant des coefficients de pénalisation importants, la méthode pénalisée permet d'obtenir les mêmes résultats que la méthode du Lagrangien augmenté.

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

12 Modélisation K : interface droite en contraintes planes, méthode du Lagrangien augmenté sur un maillage quadratique

Dans cette modélisation, on représente une interface droite, l'angle θ vaut alors 0. L'interface coïncide avec les faces de certains éléments finis.

Dans cette modélisation, on considère l'hypothèse de contraintes planes (bien qu'ici, le coefficient de Poisson étant nul, il n'y a pas de différence entre contraintes et déformations planes).

Le contact/ frottement est traité avec des éléments X-FEM quadratiques P2P1 , c'est- à- dire portant les degrés de liberté de déplacement sur tous les nœuds et les lagranges de contact/ frottement sur les nœuds sommets.

12.1 Résolution analytique

La solution analytique est la même que celle de la modélisation D.

12.2 Fonctionnalités testées

Ce cas ne nécessite pas l'activation du frottement. Dans l'opérateur DEFI_CONTACT, on stipule alors FROTTEMENT='SANS'.

12.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les valeurs de la pression normale de contact après convergence des itérations de l'opérateur STAT_NON_LINE et de la boucle sur les contraintes actives. On teste tous les points de contact, qui correspondent aux nœuds du maillage sur l'interface. On vérifie que l'on retrouve bien les valeurs déterminées au [§2.1].

Identification	Référence	% Tolérance
LAGS_C pour tous les nœuds de l'interface	-5.00	1.00e-10

Pour tester tous les nœuds en une seule fois, on teste le minimum et le maximum de la colonne.

12.4 Commentaires

Ce test valide :

- le calcul de la matrice de rigidité (le bon décalage lors du remplissage de la matrice car les nœuds ne portent pas le même nombre de degrés de liberté)
- le calcul des matrices de contact (intégration sur un SEG3 aux points de Gauss)

Il ne permet pas de valider le sous découpage puisque l'interface coïncide avec les faces des éléments.

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

13 Modélisation L : interface penchée en contraintes planes, méthode du Lagrangien augmenté sur un maillage quadratique

Dans cette modélisation, on représente une interface penchée. L'angle θ vaut $30°$. L'interface ne coïncide plus avec les faces des éléments finis, et coupe maintenant les éléments. La normale à l'interface est notée n et le vecteur tangent est noté τ :

$$n=\begin{pmatrix}1/2\\ \sqrt{3}/2\end{pmatrix},\qquad \tau=\begin{pmatrix}-\sqrt{3}/2\\ 1/2\end{pmatrix} \qquad \textbf{éq 20-1}$$

Dans cette modélisation, on considère l'hypothèse de contraintes planes (bien qu'ici, le coefficient de Poisson étant nul, il n'y a pas de différence entre contraintes et déformations planes).

Le contact/ frottement est traité avec des éléments X-FEM quadratiques P2P1 , c'est- à- dire portant les degrés de liberté de déplacement sur tous les nœuds et les lagranges de contact/ frottement sur les nœuds sommets.

13.1 Résolution analytique

La solution analytique est la même que celle de la modélisation E.

13.2 Fonctionnalités testées

Dans l'opérateur DEFI_CONTACT, on stipule alors FROTTEMENT='COULOMB', et le coefficient de frottement est choisi égal à 1.

13.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les valeurs de la pression normale de contact et du semi-multiplicateur de frottement après convergence des itérations de l'opérateur STAT_NON_LINE, de la boucle sur les contraintes actives et de la boucle sur les seuils de frottement. On teste tous les points de contact, sachant que les points de contact sont des nœuds sommets des éléments coupés par l'interface.

Identification	Référence	% Tolérance
LAGS_C pour tous les points de contact	-3.75	0.01
LAGS_F1 pour tous les points de contact	5.77350E-01	0.01

Pour tester tous les points de contact en une seule fois, on teste la valeur MIN et la valeur MAX de la colonne.

13.4 Commentaires

Ce test valide :

- le calcul de la matrice de rigidité (le bon décalage lors du remplissage de la matrice car les nœuds ne portent pas le même nombre de degrés de liberté)
- le calcul des matrices de contact (intégration sur un SEG3 aux points de Gauss)
- le sous découpage (configurations en interface droite et éléments à bords droits)

Le solveur linéaire MUMPS détecte une singularité dans la matrice pour le nœud N252 sur la composante DY . Ce problème s'est déjà posé sur de nombreux autres cas tests X-FEM en contact. Le réajustement de la level set normale permet d'améliorer le conditionnement de la matrice mais au détriment d'une trop grande erreur de discrétisation de la level set. On garde donc l'option de

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

désactivation de la détection de singularité du solveur avant de proposer une solution plus satisfaisante.

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

14 Modélisation M : interface penchée en 3D, méthode du Lagrangien augmenté sur un maillage quadratique

Nous reprenons des caractéristiques identiques à la modélisation B, mis à part le maillage qui est quadratique. Pour rappel, l'interface est donc inclinée d'un angle θ valant $\arctan(1/2)$, soit une pente α valant $-1/2$. La modélisation est tridimensionnelle, l'interface ne coïncidant pas avec les faces des éléments finis. La normale $\boldsymbol{n}$ et le vecteur tangent τ à l'interface sont donnés par (éq 4-1).

La méthode du Lagrangien augmenté est utilisée pour le traitement du contact frottant. Le contact frottant est traité avec des éléments XFEM quadratiques P2P1, c'est-à-dire portant les degrés de liberté de déplacement sur tous les nœuds et les « lagranges » de contact/frottement sur les nœuds sommets.

14.1 Résolution analytique

La solution analytique est la même que celle de la modélisation B.

14.2 Fonctionnalités testées

Dans l'opérateur DEFI_CONTACT, on stipule alors FROTTEMENT='COULOMB', et le coefficient de frottement est choisi égal à 1. Ce test sert à tester le contact XFEM sur les maillages quadratiques (attribut CONTACT='P2P1' dans la commande MODI_MODELE_XFEM) dans le cas tridimensionnel. Le frottement est activé, donc il est également testé (FROTTEMENT='COULOMB').

14.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les valeurs de la pression normale de contact et du semi-multiplicateur de frottement après convergence. On teste tous les points de contact. Rappelons que dans cette discrétisation 'P2P1' les degrés de liberté de contact sont portés par les nœuds sommets des éléments coupés par l'interface : c'est donc en ces points que l'on teste les valeurs.

Identification	Référence	% Tolérance
LAGS_C pour tous les points de contact	-3.75	0.01
LAGS_F1 pour tous les points de contact	5.77350E-01	0.01

Pour tester tous les points de contact en une seule fois, on teste la valeur MIN et la valeur MAX de la colonne.

14.4 Commentaires

Ce test valide la modélisation P2P1 en 3D à savoir :

- le calcul de la matrice de rigidité (le bon décalage lors du remplissage de la matrice car les nœuds ne portent pas le même nombre de degrés de liberté),
- le calcul des matrices de contact.

A l'heure actuelle, on sous-découpe les éléments quadratiques 3D avec des éléments linéaires, le sous-découpage quadratique, éventuellement à faces courbes, n'étant pas encore disponible. De même, les facettes de contact sont des TRI3. Ce test ne constitue donc pas une validation de sous-éléments ou de facettes de contact particuliers.

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

15 Synthèses des résultats

Les objectifs de ce test sont atteints :

- Il s'agit de montrer la faisabilité de la prise en compte du contact frottant sur les lèvres de la fissure avec la méthode continue adaptée au cadre X-FEM. Seul le cas d'une fissure traversant complètement la structure a été envisagé (interface).
- Les cas où l'interface suit la frontière des éléments ($\theta=0°$) et où l'interface coupe les éléments ($\theta=26.56°$ en $3D$ et $\theta=30°$ en $2D$) ont été validés.
- La méthode a été validée en $2D$ pour $P1P1A$ et $P2P1$ et en $3D$ pour $P1P1A$.
- La méthode a été validée à la fois avec la méthode du Lagrangien augmenté et avec la méthode pénalisée pour le traitement du contact / frottement.

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