SSNP503 – Contact en grands glissements avec X-FEM pour des fissures horizontales

Résumé :

Ce test a pour but de tester et valider les fonctionnalités de l'approche grands glissements avec X-FEM dans des cas présentant des fissures horizontales. On teste des structures 2D en contraintes planes et en déformations planes pour des éléments quadrangles et triangles ainsi que des structures 3D pour des éléments hexaèdres, pentaèdres et tétraèdres. Cette approche, décrite dans [R5.03.53], permet notamment la prise en compte du contact, avec frottement, au niveau des fissures introduites par la méthode X-FEM, en présence des grands déplacements mais sous l'hypothèse des petites déformations. Les nouveaux algorithmes, par rapport au traitement de contact avec X-FEM sous l'hypothèse des petites perturbations [R7.02.12], qui sont testés et validés par ce cas test concernent la réactualisation géométrique des lèvres des fissures, l'appariement maître – esclave et la création des nouveaux éléments hybrides de contact.

On considère une structure rectangulaire présentant deux fissures horizontales la traversant complètement, placées symétriquement par rapport à l'axe médian de la structure. Les deux fissures coupent ainsi le rectangle en trois blocs. Le blocage des déplacements horizontaux est imposé aux quatre coins du rectangle, des déplacements verticaux sont imposés sur les bords inférieur et supérieur du rectangle afin de serrer le bloc milieu qui se voit imposer un déplacement horizontal pour le faire glisser le long des fissures. Suite à la sollicitation de compression ainsi créée, des pressions de contact apparaissent sur les zones en contact, avec une évolution de leurs valeurs en fonction de l'avancement du bloc milieu.

La validation se fait par comparaison des valeurs de pression de contact avec les valeurs similaires obtenues à partir d'un test homologue (même géométrie, mêmes conditions aux limites etc.), traité dans le cadre classique de la méthode des éléments finis, avec *Code_Aster*, où les fissures sont conformes au maillage.

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

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

La structure est un rectangle sain dans lequel deux fissures horizontales sont introduites. Les fissures sont placées symétriquement par rapport à l'axe médian de la structure, comme montré sur la Figure 1.1-a. Les dimensions de la structure ainsi que la distance entre les fissures sont :

$H = 9\,m$;
$L = 4\,m$;
$b = 4\,m$;

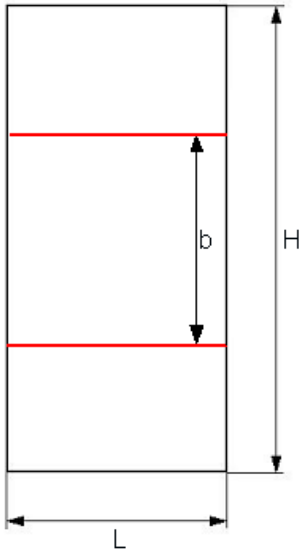


Figure 1.1-a : Géométrie de la structure et positionnement des fissures.

1.2 Propriétés du matériau

Module de Young : $E = 100\,MPa$

Coefficient de Poisson : $\nu = 0.3$

1.3 Conditions aux limites et chargements

Le blocage des déplacements horizontaux est imposé aux quatre coins de la structure (Figure 1.3-a). Sur les bords inférieur et supérieur du rectangle, on impose des déplacements suivant l'axe Y qui vont fermer les fissures afin de générer de la pression de contact. Le bloc milieu est soumis à un glissement important en appliquant un déplacement contrôlé suivant l'axe X sur son bord gauche.

Les valeurs numériques des déplacements imposés sont :

$Depl_X = 2.00\,m$
$Depl_Y = 1.0\mathrm{E}-3\,m$

Leur application se fait suivant une fonction rampe classique, en 4 pas de charge.

Le coefficient de frottement de Coulomb est pris égal à $0,5$.

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

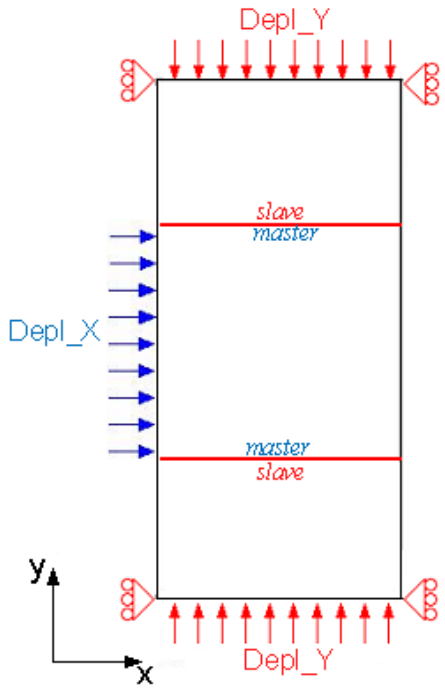


Figure 1.3-a : Illustration des conditions aux limites et des chargements.

2 Solution de référence

Les solutions de référence pour ce cas-test sont fournies par les résultats issus de calculs Aster, pour la même structure mais avec les fissures respectant le maillage, réalisées avec la méthode continue de contact déjà existante pour le cadre classique de la méthode des éléments finis [R5.03.52].

La géométrie (exception faite pour l'introduction des fissures), les conditions aux limites, les chargements ainsi que les paramètres de contact sont les mêmes que ceux considérés pour ce cas-test modélisé avec X-FEM.

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit d'une modélisation FEM, en déformations planes. Les trois blocs sont maillés conformément et les conditions de contact sont imposées sur les arêtes de ces blocs. On déclare les arêtes maîtres sur le bloc milieu et les arêtes esclaves sur les blocs inférieur et supérieur afin de se conformer à la figure 1.3-a.

3.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est réglé (Figure 3.2-a) et comporte 3 blocs composés de mailles de type `QUAD4`. Les blocs supérieur et inférieur possèdent chacun 12 mailles, tandis que le bloc milieu en possède 20.

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

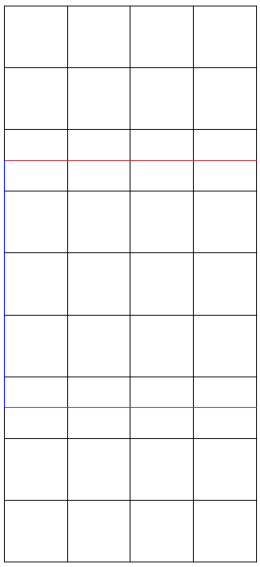


Figure 3.2-a : Le maillage de la modélisation A.

3.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les pressions de contact sur la lèvre supérieure du bloc inférieur, celle-ci étant déclarée esclave, à la fin de chaque pas de charge considéré. L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact dont on teste les valeurs, est illustré sur la Figure 3.4-a.

Pas	Identification	*Référence*
1	LAGS_C pour N21	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N20	-8.1059677E+03
	LAGS_C pour N19	-6.4501080E+03
	LAGS_C pour N18	-6.4542489E+03
	LAGS_C pour N17	-4.1383235E+03
2	LAGS_C pour N21	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N20	-1.0392388E+04
	LAGS_C pour N19	-1.3120234E+04
	LAGS_C pour N18	-1.1868000E+04
	LAGS_C pour N17	-8.7124511E+03
3	LAGS_C pour N21	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N20	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N19	-2.1971033E+04
	LAGS_C pour N18	-1.8731887E+04
	LAGS_C pour N17	-1.1800265E+04
4	LAGS_C pour N21	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N20	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N19	-1.9159216E+04
	LAGS_C pour N18	-2.3596467E+04
	LAGS_C pour N17	-1.7951778E+04

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

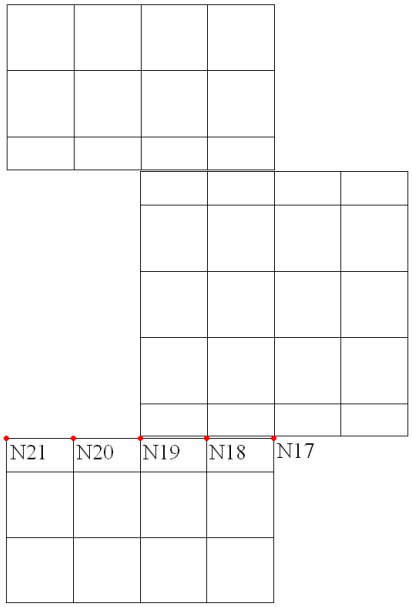


Figure 3.4-a : L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact testés.

3.4 Remarques

Ce test sert de référence à la modélisation B, il est donc normal d'avoir des résidus proches de zéro ($10^{-10}\%$), qui correspondent à la précision demandée dans l'opérateur IMPR_TABLE du fichier de commande. Il permet de s'assurer qu'il n'y a pas d'évolution dans les algorithmes de calcul pour la méthode FEM de contact en grands glissements, auquel cas il faudrait alors aussi revoir la méthode X-FEM, basée sur celle-ci.

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

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit d'une modélisation X-FEM, en déformations planes, avec définition de contact sur les interfaces générées par les fissures, elles-mêmes définies par des fonctions de niveau (level set normale notée LN) directement dans le fichier de commande à l'aide de l'opérateur DEFI_FISS_XFEM [U4.82.08].

Le statut esclave/maître pour une surface de contact X-FEM est donné par le signe de la fonction de niveau normale LN : la surface esclave est du côté négatif tandis que la surface maître se situe du côté positif.

Les équations des fonctions de niveaux pour les deux fissures horizontales sont les suivantes :

$$\mathrm{LN}1 = Y - 2.5 \qquad \text{éq 4.1-1}$$
$$\mathrm{LN}2 = -Y + 6.5 \qquad \text{éq 4.1-2}$$

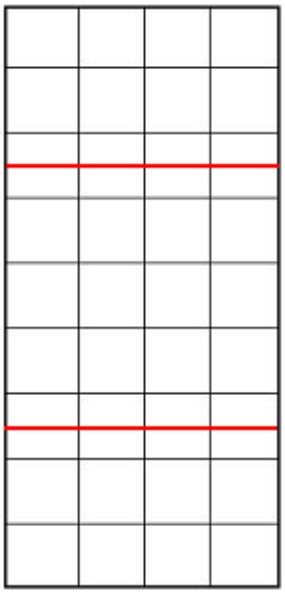
On ne définit pas les levels set tangente car on ne modélise pas de fond de fissure. Il faut alors renseigner le mot clé **TYPE_DISCONTINUITE** avec l'option **'INTERFACE'** dans l'opérateur **DEFI_FISS_XFEM**.

Pour que l'approche grands glissements avec X-FEM soit activée, il faut renseigner le mot clé **REAC_GEOM** dans l'opérateur **DEFI_CONTACT** avec l'option **'AUTOMATIQUE'**. Sinon, pour **REAC_GEOM='SANS'** (option par defaut), le traitement HPP est actif.

Pour l'activation du frottement, il faut renseigner le mot clé **FROTTEMENT** dans l'opérateur **DEFI_CONTACT** avec l'option **'COULOMB'** puis indiquer la valeur du coefficient de frottement pour chaque zone en renseignant le mot clé **COULOMB** sous l'opérande **ZONE**.

4.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est réglé (Figure 4.2-a) et comporte 36 mailles de type QUAD4. Suite à la définition des fissures, les 8 mailles coupées sont transformées en QUAD8 afin de stocker les degrés de liberté de contact frottant aux nœuds sommets et milieux.



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

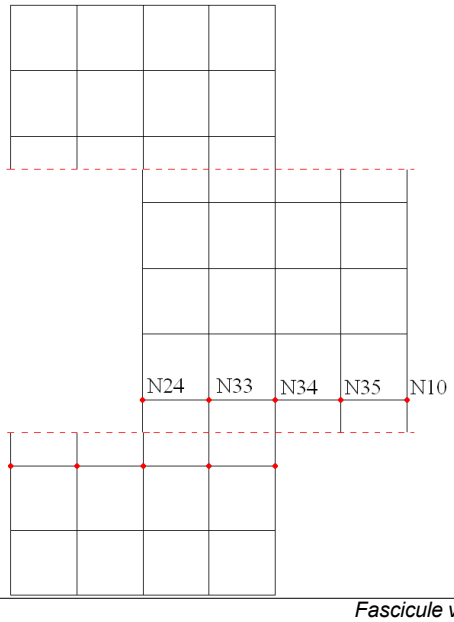
Figure 4.2-a : Le maillage de la modélisation B.

Le choix du nombre d'éléments dans la direction Y (sur la verticale) a été fait en tenant compte de la restriction imposée par la modélisation de la multi-fissuration avec la méthode X-FEM : les fissures doivent être séparées d'au moins deux mailles saines.

4.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les valeurs de la pression de contact sur la lèvre esclave de la première fissure, à la fin de chaque pas de charge considéré. Sur les éléments coupés, on peut choisir de relever arbitrairement les valeurs sur les noeuds au-dessus ou en dessous de la fissure (on a choisi au dessus), car les degrés de liberté de contact sont liés par des relation d'égalité (il n'est pas nécessaire de faire une interpolation). L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact dont on teste les valeurs, est illustré sur la Figure 4.4-a.

Pas	Identification	Référence
1	LAGS_C pour N24	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N33	-8.1059677E+03
	LAGS_C pour N34	-6.4501080E+03
	LAGS_C pour N35	-6.4542489E+03
	LAGS_C pour N10	-4.1383235E+03
2	LAGS_C pour N24	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N33	-1.0392388E+04
	LAGS_C pour N34	-1.3120234E+04
	LAGS_C pour N35	-1.1868000E+04
	LAGS_C pour N10	-8.7124511E+03
3	LAGS_C pour N24	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N33	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N34	-2.1971033E+04
	LAGS_C pour N35	-1.8731887E+04
	LAGS_C pour N10	-1.1800265E+04
4	LAGS_C pour N24	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N33	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N34	-1.9159216E+04
	LAGS_C pour N35	-2.3596467E+04
	LAGS_C pour N10	-1.7951778E+04



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

Figure 4.4-a : L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact testés.

4.4 Remarques

Dans les deux cas (méthodes de contact X-FEM et FEM classique) on a le même nombre de degrés de liberté de déplacements, le même nombre de degrés de liberté de contact, et la position des nœuds du maillage (hormis l'interface qui n'est pas maillée pour X-FEM) sont les mêmes, on intègre le contact sur les mêmes éléments et la rigidité sur les quasi-mêmes éléments (sauf pour les éléments coupés) . On résout donc le même problème numérique dans les 2 cas. Il est donc normal d'observer des différences proches de zéro ($10^{-7}\%$).

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

5 Modélisation C

5.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit des mêmes caractéristiques de modélisation que la modélisation A mais en contraintes planes.

5.2 Caractéristiques du maillage

Il s'agit des mêmes caractéristiques de maillage que la modélisation A.

5.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les pressions de contact comme pour la modélisation A. L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact, dont on teste les valeurs, est illustré sur la Figure 3.4-a.

Pas	Identification	Référence
1	LAGS_C pour N21	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N20	-7.1041388E+03
	LAGS_C pour N19	-5.5751916E+03
	LAGS_C pour N18	-5.6055420E+03
	LAGS_C pour N17	-3.6920556E+03
2	LAGS_C pour N21	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N20	-9.1709839E+03
	LAGS_C pour N19	-1.1435732E+04
	LAGS_C pour N18	-1.0391562E+04
	LAGS_C pour N17	-7.7671507E+03
3	LAGS_C pour N21	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N20	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N19	-1.9485289E+04
	LAGS_C pour N18	-1.6399583E+04
	LAGS_C pour N17	-1.0605893E+04
4	LAGS_C pour N21	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N20	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N19	-1.7065781E+04
	LAGS_C pour N18	-2.0872174E+04
	LAGS_C pour N17	-1.6114706E+04

5.4 Remarques

Ce test sert de référence à la modélisation D.

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

6 Modélisation D

6.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit des mêmes caractéristiques de modélisation que la modélisation B mais en contraintes planes.

6.2 Caractéristiques du maillage

Il s'agit des mêmes caractéristiques de maillage que la modélisation B.

6.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les valeurs de pression de contact comme pour la modélisation B.

Pas	Identification	Référence
1	LAGS_C pour N24	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N33	-7.1041388E+03
	LAGS_C pour N34	-5.5751916E+03
	LAGS_C pour N35	-5.6055420E+03
	LAGS_C pour N10	-3.6920556E+03
2	LAGS_C pour N24	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N33	-9.1709839E+03
	LAGS_C pour N34	-1.1435732E+04
	LAGS_C pour N35	-1.0391562E+04
	LAGS_C pour N10	-7.7671507E+03
3	LAGS_C pour N24	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N33	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N34	-1.9485289E+04
	LAGS_C pour N35	-1.6399583E+04
	LAGS_C pour N10	-1.0605893E+04
4	LAGS_C pour N24	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N33	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N34	-1.7065781E+04
	LAGS_C pour N35	-2.0872174E+04
	LAGS_C pour N10	-1.6114706E+04

6.4 Remarques

Idem 4.4

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

7 Modélisation E

7.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit des mêmes caractéristiques de modélisation que la modélisation A.

7.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est réglé (Figure 7.2-a) et comporte 3 blocs composés de mailles de type TRI3. Les blocs supérieur et inférieur possèdent chacun 336 mailles, tandis que le bloc milieu en possède 608.

Le maillage est plus fin que dans les tests précédents, car on veut éviter une perte de précision entre les méthodes de contact FEM et X-FEM causée par les différences de maillage. Le maillage est par ailleurs construit de manière à respecter la symétrie médiane du modèle.

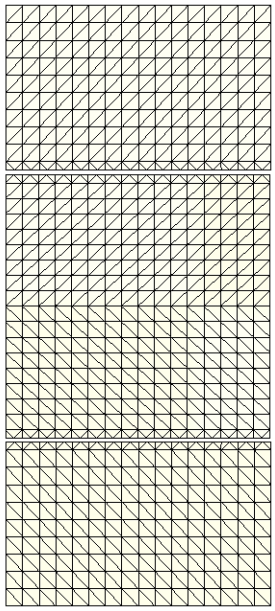


Figure 7.2-a : Le maillage de la modélisation E.

7.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les valeurs de la pression de contact comme pour la modélisation A. L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact, dont on teste les valeurs, est illustré sur la Figure 7.4-a.

Pas	Identification	Référence
1	LAGS_C pour N1254	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N1262	-7.1942608E+03
	LAGS_C pour N1270	-6.5408344E+03
	LAGS_C pour N1278	-6.1360067E+03
	LAGS_C pour N1286	-2.4914329E+03
2	LAGS_C pour N1254	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N1262	-2.4822528E+04
	LAGS_C pour N1270	-1.2993429E+04
	LAGS_C pour N1278	-1.2178296E+04
	LAGS_C pour N1286	-3.4642908E+03

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

3	LAGS_C pour N1254	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N1262	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N1270	-2.0219781E+04
	LAGS_C pour N1278	-1.8168929E+04
	LAGS_C pour N1286	-4.8271686E+03
4	LAGS_C pour N1254	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N1262	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N1270	-4.3387251E+04
	LAGS_C pour N1278	-2.4197889E+04
	LAGS_C pour N1286	-7.2647040E+03

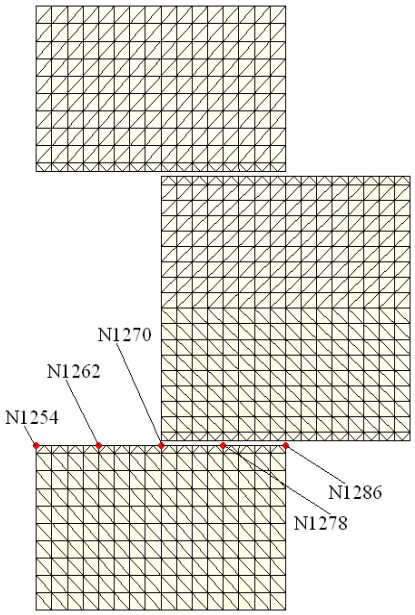


Figure 7.4-a : L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact testés.

7.4 Remarques

Ce test sert de référence à la modélisation F.

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

8 Modélisation F

8.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit des mêmes caractéristiques de modélisation que la modélisation B.

8.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est réglé (Figure 8.2-a) et comporte 1152 mailles de type TRI3. Suite à la définition des fissures, les 64 mailles coupées stockent à leurs nœuds les degrés de liberté de contact frottement. Le maillage est construit comme pour la modélisation E, de manière à respecter la symétrie médiane du modèle.

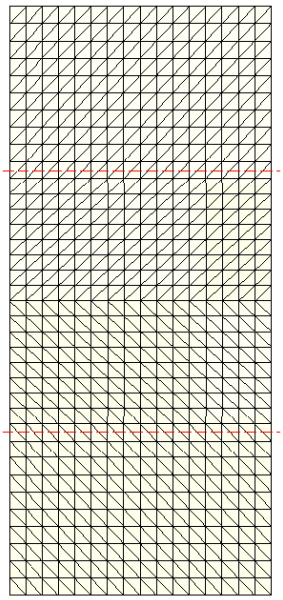


Figure 8.2-a : Le maillage de la modélisation F.

8.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les valeurs de pression de contact comme pour la modélisation B. L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact, dont on teste les valeurs, est illustré sur la Figure 8.4-a.

On compare graphiquement sur la figure 8.4-b les résultats des approches FEM et X-FEM.

Pas	Identification	Référence
1	LAGS_C pour N33	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N154	-7.1942608E+03
	LAGS_C pour N230	-6.5408344E+03
	LAGS_C pour N306	-6.1360067E+03
	LAGS_C pour N677	-2.4914329E+03
2	LAGS_C pour N33	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N154	-2.4822528E+04
	LAGS_C pour N230	-1.2993429E+04
	LAGS_C pour N306	-1.2178296E+04
	LAGS_C pour N677	-3.4642908E+03
	LAGS_C pour N33	0.0000000E+00

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

3	LAGS_C pour N154	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N230	-2.0219781E+04
	LAGS_C pour N306	-1.8168929E+04
	LAGS_C pour N677	-4.8271686E+03
4	LAGS_C pour N33	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N154	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N230	-4.3387251E+04
	LAGS_C pour N306	-2.4197889E+04
	LAGS_C pour N677	-7.2647040E+03

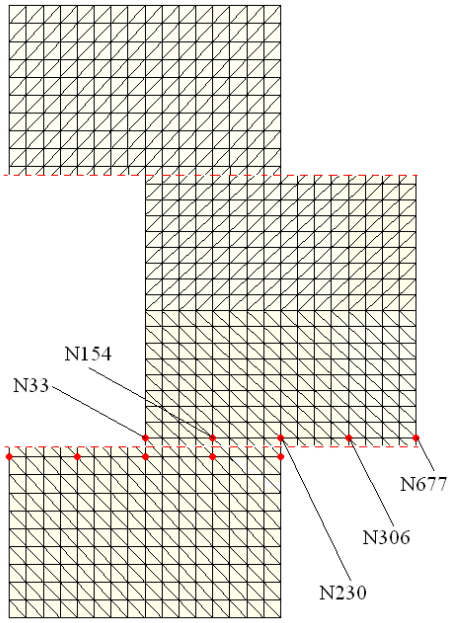


Figure 8.4-a : L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact testés.

Figure 8.4-b : SSNP503-e et f : Comparaison des réactions de contact (4 pas de charges), pour les méthodes FEM (en bleu) et XFEM (en rouge).

8.4 Remarques

Ces résultats valident en 2D la gestion de l'intégration du contact avec frottement glissant lorsqu'une relation linéaire entre les degrés de liberté de contact frottement est imposée au passage contactant/non contactant par l'algorithme de stabilisation de la LBB (voir [R5 03 53] et [D9 05 06]).

Pour que les résultats des deux approches (méthodes de contact X-FEM et FEM classique) correspondent, on impose que les positions des nœuds du maillage ainsi que les mailles triangles (hormis l'interface qui n'est pas maillée pour X-FEM) soient les mêmes, que l'intégration du contact se fasse sur les mêmes segments, et que l'intégration de la rigidité se fasse sur les mêmes triangles (sauf pour les éléments coupés).

Toutefois en faisant ainsi, les interfaces en méthode de contact FEM possèdent presque deux fois plus de degrés de liberté (contact et déplacement) que celles en méthode de contact X-FEM. On ne résout donc pas exactement le même problème numérique dans les 2 cas.

Tenant compte de cela, on peut conclure que l'on observe de très bons résultats (différences relatives inférieures à 0.5%) si on ne tient pas compte des effets de bords (différences relatives de l'ordre de 5% sur le dernier nœud).

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

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

9 Modélisation G

9.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit des mêmes caractéristiques de modélisation que la modélisation A, mais en 3D. On extrude donc le rectangle considéré dans la profondeur du plan d'une longueur unitaire. On bloque les mouvements de corps rigide dans la nouvelle direction considérée.

9.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est réglé (Figure9.2-a) et comporte 3 blocs composés de mailles de type HEXA8. Les blocs supérieur et inférieur possèdent chacun 12 mailles, tandis que le bloc milieu en possède 20.

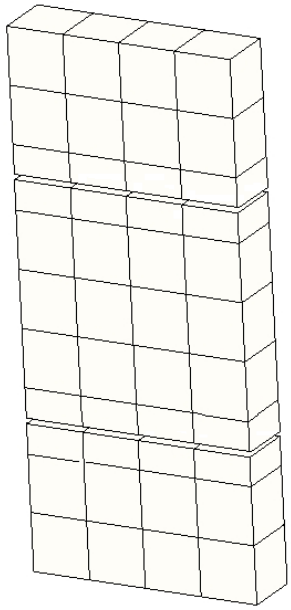


Figure 9.2-a : Le maillage de la modélisation G.

9.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les pressions de contact comme pour la modélisation A. L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact, dont on teste les valeurs, est illustré sur la Figure 9.4-a.

Pas	Identification	Référence
1	LAGS_C pour N110	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N119	-7.4394584E+03
	LAGS_C pour N121	-5.5601371E+03
	LAGS_C pour N123	-5.7894274E+03
	LAGS_C pour N108	-3.8723295E+03
2	LAGS_C pour N110	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N119	-9.9465544E+03
	LAGS_C pour N121	-1.1457450E+04
	LAGS_C pour N123	-1.0644747E+04
	LAGS_C pour N108	-8.1152553E+03
3	LAGS_C pour N110	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N119	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N121	-2.0437614E+04

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

	LAGS_C pour N123	-1.6583379E+04
	LAGS_C pour N108	-1.1024368E+04
4	LAGS_C pour N110	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N119	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N121	-1.8510255E+04
	LAGS_C pour N123	-2.1051214E+04
	LAGS_C pour N108	-1.6537311E+04

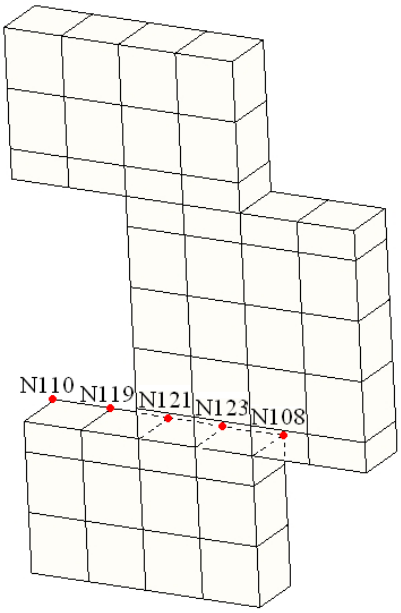


Figure 9.4-a : L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact testés.

9.4 Remarques

Ce test sert de référence à la modélisation H.

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

10 Modélisation H

10.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit des mêmes caractéristiques de modélisation que la modélisation B mais en 3D. On extrude donc le rectangle considéré dans la profondeur du plan d'une longueur unitaire. On bloque les mouvements de corps rigide dans la nouvelle direction considérée.

10.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est réglé (Figure 10.2-a) et comporte 36 mailles de type HEXA8. Suite à la définition des fissures, les 8 mailles coupées stockent à leurs nœuds les degrés de liberté de contact frottement.

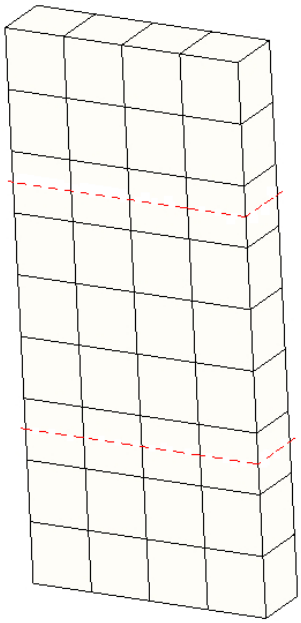


Figure 10.2-a : Le maillage de la modélisation H.

10.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les valeurs de pression de contact comme pour la modélisation B. L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact, dont on teste les valeurs, est illustré sur la Figure 10.4-a.

Pas	Identification	Référence
1	LAGS_C pour N13	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N14	-7.4394584E+03
	LAGS_C pour N15	-5.5601371E+03
	LAGS_C pour N16	-5.7894274E+03
	LAGS_C pour N85	-5.8084941D+03
2	LAGS_C pour N13	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N14	-9.9465544E+03
	LAGS_C pour N15	-1.1457450E+04
	LAGS_C pour N16	-1.0644747E+04
	LAGS_C pour N85	-1.2172882D+04
	LAGS_C pour N13	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N14	0.0000000E+00

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

3	LAGS_C pour N15	-2.0437614E+04
	LAGS_C pour N16	-1.6583379E+04
	LAGS_C pour N85	-1.6536552D+04
4	LAGS_C pour N13	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N14	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N15	-1.8510255E+04
	LAGS_C pour N16	-2.1051214E+04
	LAGS_C pour N85	-2.4805965D+04

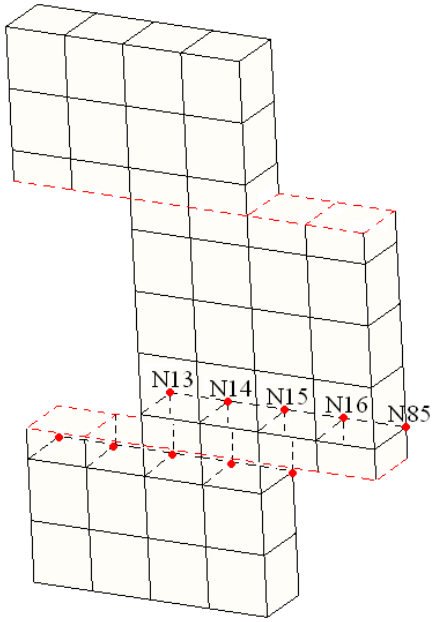


Figure 10.4-a : L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact testés.

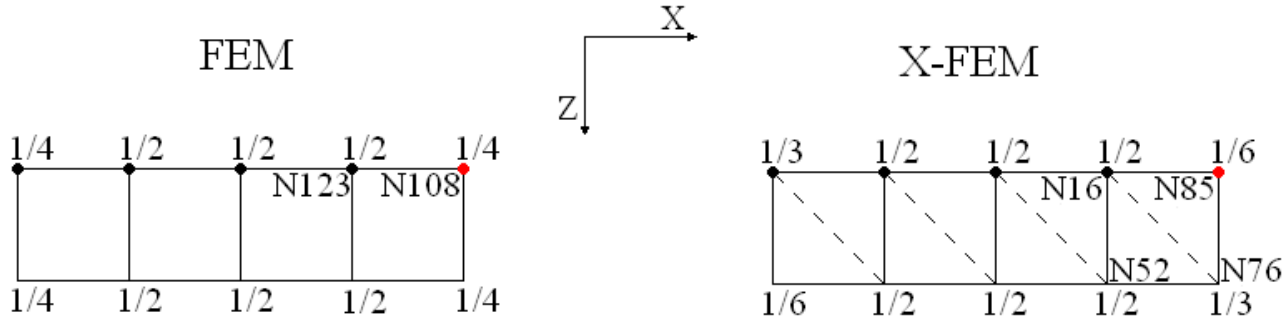


Figure 10.4-b : Surfaces (en m^2) sur lesquelles les multiplicateurs de contact de chaque nœud sont répartis en considérant l'intégration nodale (sur les quadrangles pour FEM, des triangles pour X-FEM).

10.4 Remarques

Idem 4.5 sauf qu'on n'intègre pas les contributions de contact sur les mêmes éléments (voir la figure 10.4.b): en FEM les mailles de contact sont des quadrangles, en X-FEM les facettes sont des triangles. Cela provoque une dissymétrie pour l'approche X-FEM entre les nœuds $N85$ (qui contribue sur une surface de $1/6 m^2$) et $N76$ (qui contribue sur une surface de $1/3 m^2$). Les surfaces explicitées sur la figure 10.4-b agissent numériquement comme des poids pour les multiplicateurs, on a donc logiquement $\frac{1}{6}\lambda_{N85}=\frac{1}{3}\lambda_{N76}$ soit $\lambda_{N85}=2\lambda_{N76}$.

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

Si maintenant on compare les noeuds N108 de l'approche FEM et N85 de l'approche X-FEM, on peut écrire $\frac{1}{6}\lambda_{N85}^{XFEM}=\frac{1}{4}\lambda_{N108}^{FEM}$ soit $\lambda_{N85}^{XFEM}=\frac{3}{2}\lambda_{N108}^{FEM}$.

La valeur LAGS_C de $N108$ provenant de la modélisation G doit donc être multipliée par 1,5 pour être comparée à LAGS_C de $N85$ de la modélisation H. Lorsqu'on fait ainsi, on observe bien des différences proches de zéro ($10^{-3}\%$) sur tous les nœuds testés.

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

11 Modélisation I

11.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit des mêmes caractéristiques de modélisation que la modélisation G.

11.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est réglé (Figure 11.2-a) et comporte 3 blocs composés de mailles de type PENTA6. Les blocs supérieur et inférieur possèdent chacun 24 mailles, tandis que le bloc milieu en possède 40.

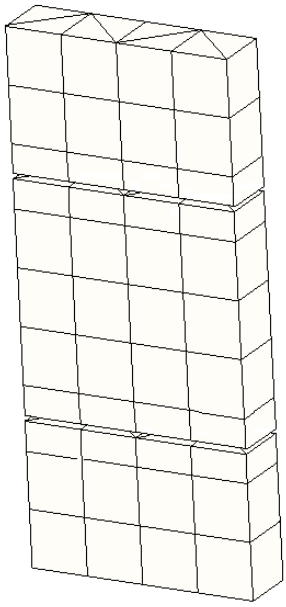


Figure 11.2-a : Le maillage de la modélisation I.

11.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les pressions de contact comme pour la modélisation A. L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact, dont on teste les valeurs, est illustré sur la Figure 11.4-a.

Pas	Identification	Référence
1	LAGS_C pour N52	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N69	-9.2184408E+03
	LAGS_C pour N70	-5.3136225E+03
	LAGS_C pour N73	-6.3318943E+03
	LAGS_C pour N50	-3.8408176E+03
2	LAGS_C pour N52	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N69	-1.5003217E+04
	LAGS_C pour N70	-8.0031951E+03
	LAGS_C pour N73	-1.4765678E+04
	LAGS_C pour N50	-6.7122964E+03
3	LAGS_C pour N52	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N69	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N70	-1.7575098E+04
	LAGS_C pour N73	-1.6339667E+04
	LAGS_C pour N50	-1.2605826E+04

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

	LAGS_C pour N52	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N69	0.0000000E+00
4	LAGS_C pour N70	-1.7152487E+04
	LAGS_C pour N73	-2.1471849E+04
	LAGS_C pour N50	-1.7685794E+04

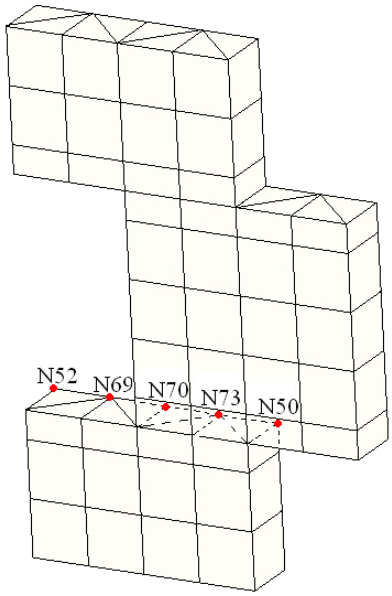


Figure 11.4-a : L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact testés.

11.4 Remarques

Ce test sert de référence à la modélisation J.

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

12 Modélisation J

12.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit des mêmes caractéristiques de modélisation que la modélisation H.

12.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est réglé (Figure 12.2-a) et comporte 72 mailles de type PENTA6. Suite à la définition des fissures, les 16 mailles coupées stockent à leurs nœuds les degrés de liberté de contact frottement.

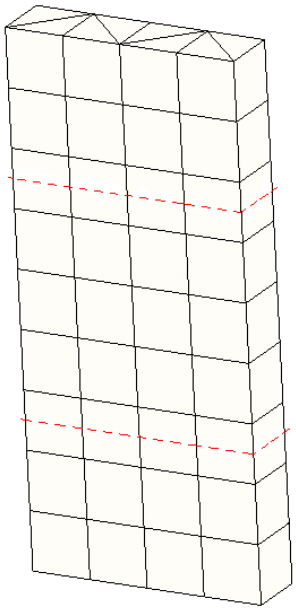


Figure 12.2-a : Le maillage de la modélisation J.

12.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les valeurs de pression de contact comme pour la modélisation B. L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact, dont on teste les valeurs, est illustré sur la Figure 12.4-a.

Pas	Identification	Référence
1	LAGS_C pour N19	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N20	-9.2184408E+03
	LAGS_C pour N22	-5.3136225E+03
	LAGS_C pour N23	-6.3318943E+03
	LAGS_C pour N85	-3.8408176E+03
2	LAGS_C pour N19	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N20	-1.5003217E+04
	LAGS_C pour N22	-8.0031951E+03
	LAGS_C pour N23	-1.4765678E+04
	LAGS_C pour N85	-6.7122964E+03
3	LAGS_C pour N19	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N20	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N22	-1.7575098E+04
	LAGS_C pour N23	-1.6339667E+04

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

	LAGS_C pour N85	-1.2605826E+04
4	LAGS_C pour N19	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N20	0.0000000E+00
	LAGS_C pour N22	-1.7152487E+04
	LAGS_C pour N23	-2.1471849E+04
	LAGS_C pour N85	-1.7685794E+04

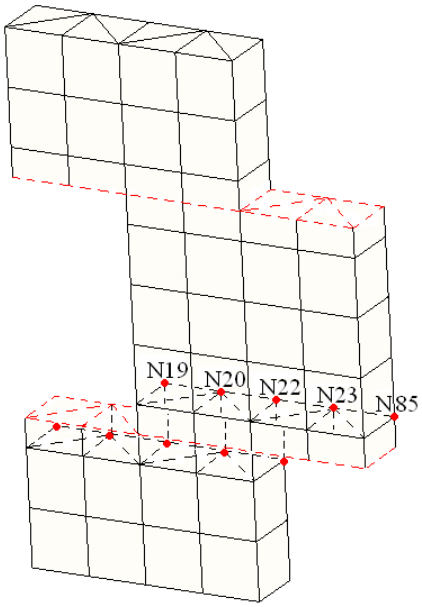


Figure 12.4-a : L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact testés.

12.4 Remarques

Idem 4.5. On observe des différences proches de zéro ($10^{-3}\,\%$).

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

13 Modélisation K

13.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit des mêmes caractéristiques de modélisation que la modélisation G.

13.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est réglé (Figure 13.2-a) et comporte 3 blocs composés de mailles de type TETRA4. Les blocs supérieur et inférieur possèdent chacun 1098 mailles, tandis que le bloc milieu en possède 1824.

Le maillage est plus fin que dans les tests précédents, car on veut limiter une perte de précision entre les méthodes de contact FEM et X-FEM causée par les différences de maillage. Le maillage est par ailleurs construit de manière à respecter la symétrie médiane du modèle.

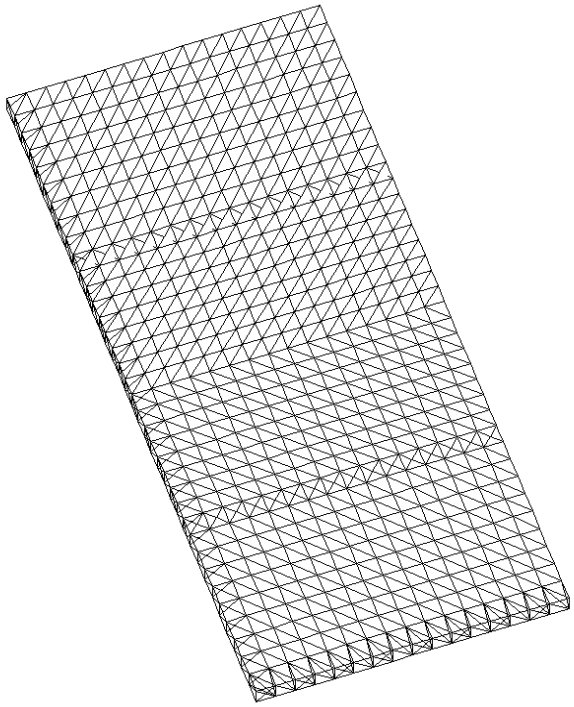


Figure 13.2-a : Le maillage de la modélisation K.

13.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les pressions de contact comme pour la modélisation A. L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact, dont on teste les valeurs, est illustré sur la Figure 13.4-a.

Pas	Identification	Référence
1	LAGS_C pour N3779	0,00E+000
	LAGS_C pour N3802	-7,24E+003
	LAGS_C pour N3826	-6,43E+003
	LAGS_C pour N3850	-5,50E+003
	LAGS_C pour N3874	-9,82E+002
2	LAGS_C pour N3779	0,00E+000
	LAGS_C pour N3802	-2,64E+004
	LAGS_C pour N3826	-1,28E+004

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

	LAGS_C pour N3850	-1,11E+004
	LAGS_C pour N3874	-1,01E+003
3	LAGS_C pour N3779	0,00E+000
	LAGS_C pour N3802	0,00E+000
	LAGS_C pour N3826	-1,93E+004
	LAGS_C pour N3850	-1,68E+004
	LAGS_C pour N3874	-1,57E+003
4	LAGS_C pour N590	0,00E+000
	LAGS_C pour N598	0,00E+000
	LAGS_C pour N606	-4,43E+004
	LAGS_C pour N614	-2,25E+004
	LAGS_C pour N622	-3,17E+003

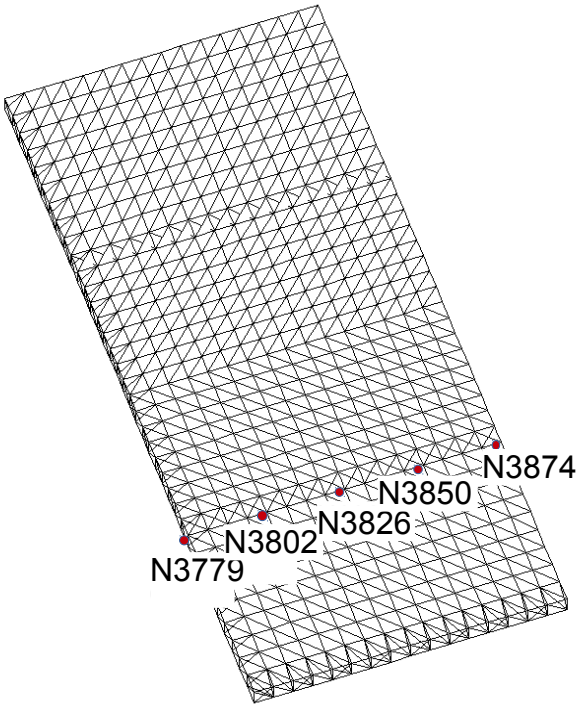


Figure 13.4-a : L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact testés.

13.4 Remarques

Ce test sert de référence à la modélisation L.

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

14 Modélisation L

14.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit des mêmes caractéristiques de modélisation que la modélisation H.

14.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est réglé (Figure 14.2-a) et comporte 3456 mailles de type TETRA4. Suite à la définition des fissures, les 192 mailles coupées stockent à leurs nœuds les degrés de liberté de contact frottement. Le maillage est construit comme pour la modélisation K, de manière à respecter la symétrie médiane du modèle.

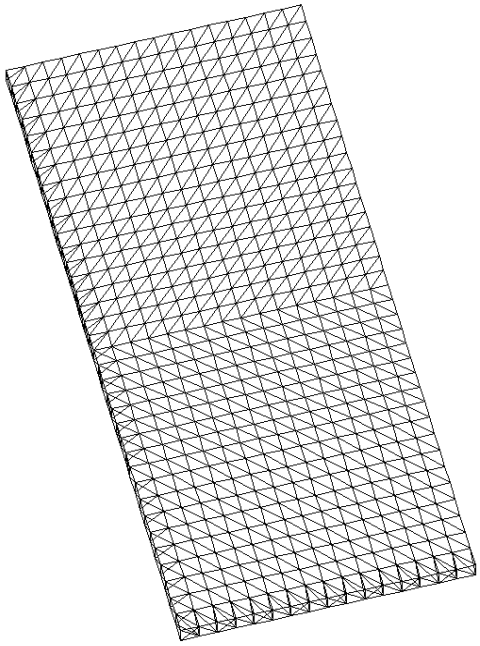


Figure 14.2-a : Le maillage de la modélisation L.

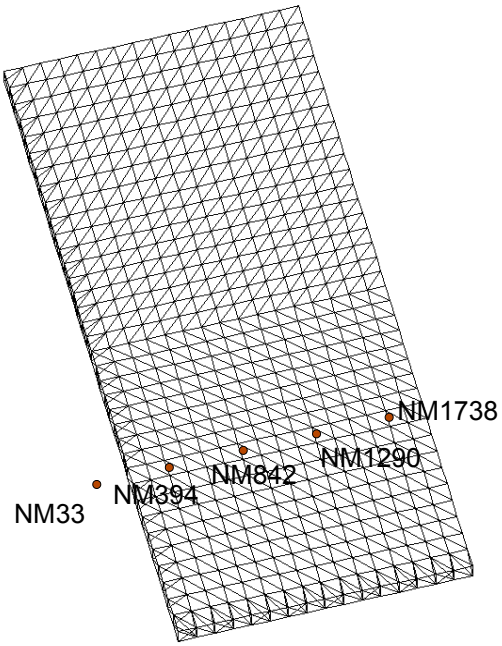
14.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les valeurs de pression de contact comme pour la modélisation B. L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact, dont on teste les valeurs, est illustré sur la Figure 14.4-a.
On compare graphiquement sur la figure 14.4-b les résultats des approches FEM et X-FEM.

Pas	Identification	Référence
1	LAGS_C pour NM33	0,00E+000
	LAGS_C pour NM394	-7,24E+003
	LAGS_C pour NM842	-6,43E+003
	LAGS_C pour NM1290	-5,50E+003
2	LAGS_C pour NM33	0,00E+000
	LAGS_C pour NM394	-2,64E+004
	LAGS_C pour NM842	-1,28E+004
	LAGS_C pour NM1290	-1,11E+004
3	LAGS_C pour NM33	0,00E+000
	LAGS_C pour NM394	0,00E+000

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

	LAGS_C pour NM842	-1,93E+004
	LAGS_C pour NM1290	-1,68E+004
4	LAGS_C pour NM33	0,00E+000
	LAGS_C pour NM394	0,00E+000
	LAGS_C pour NM842	-4,43E+004
	LAGS_C pour NM1290	-2,25E+004



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

Figure 14.4-a : L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact testés.

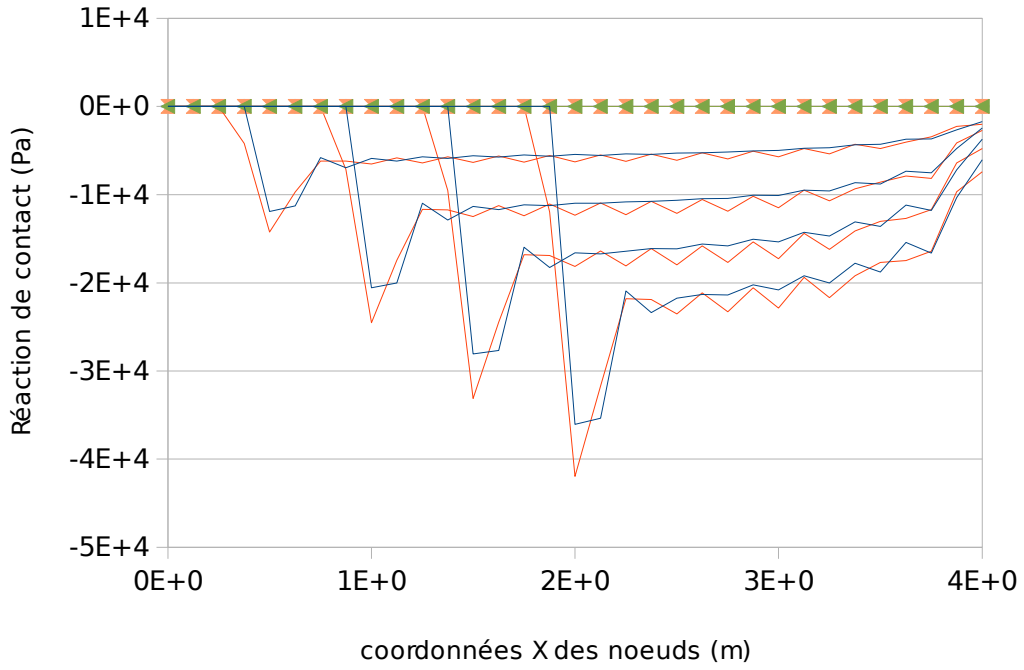


Figure 14.4-b : SSNP503-k et l : Comparaison des réactions de contact (4 pas de charges), pour les méthodes FEM (en bleu) et XFEM (en rouge).

14.4 Remarques

Ces résultats valident en 3D la gestion de l'intégration du contact avec frottement glissant lorsqu'une relation linéaire entre les degrés de liberté de contact frottement est imposée au passage contactant/non contactant par l'algorithme de stabilisation de la LBB (voir [R5 03 53] et [D9 05 06]).

Pour que les résultats des deux approches (méthodes de contact X-FEM et FEM classique) correspondent, on impose que les positions des nœuds du maillage ainsi que les mailles tétraèdriques (hormis l'interface qui n'est pas maillée pour X-FEM) soient les mêmes, que l'intégration du contact se fasse sur les mêmes triangles, et que l'intégration de la rigidité se fasse sur les mêmes tétraèdres (sauf pour les éléments coupés).
Toutefois en faisant ainsi, les interfaces en méthode de contact FEM possèdent presque deux fois plus de degrés de liberté (contact et déplacement) que celles en méthode de contact X-FEM. On ne résout donc pas exactement le même problème numérique dans les 2 cas.

Tenant compte de cela, on observe des résultats corrects qui permettent de valider la méthode (différences relatives inférieures à 5%) si on ne tient pas compte des effets de bords (différences relatives de l'ordre de 20% sur les points aux extrémités).

Néanmoins, ces résultats ne sont pas aussi bons qu'en 2D (comparaison des modélisations E et F). On peut le justifier par le fait que la la réduction de l'algorithme de la LBB est plus sévère sur des tétraèdres que sur des triangles.

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

15 Modélisation M

15.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit d'une modélisation X-FEM en petits glissements (on n'utilise pas le mot clé ITER_GEOM_MAXI dans l'opérateur CONTACT).

Elle possède les mêmes caractéristiques de modélisation que la modélisation B, mais les deux fissures possèdent une pointe (voir figure 15.1-a). On introduit donc dans la modélisation des fissures les level sets tangentes (notées LT). Les pointes sont positionnées en $\mathrm{LT}=0$.

Afin de tester tout les types d'appariement possibles soit les éléments tardifs $H-H$, $HCT-H$, $H-HCT$, $HCT-HCT$ et CT (voir partie 3 de [R5.03.53]), on intervertit pour la deuxième fissure les statuts maitre/esclave en changeant le signe de $LN2$.

La première pointe (définie par $LT1$) se situe à l'intérieur de l'élément, alors que la deuxième (définie par $LT2$) se situe sur le bord de l'élément.

Les équations 4.1-1 et 4.1-2 définissant initialement les level set sont remplacées par les suivantes :

$$LN1=Y-2{,}5 \qquad \text{éq 15.1-1}$$
$$LT1=X-2{,}5 \qquad \text{éq 15.1-2}$$
$$LN2=Y-6{,}5 \qquad \text{éq 15.1-3}$$
$$LT2=X-3 \qquad \text{éq 15.1-4}$$

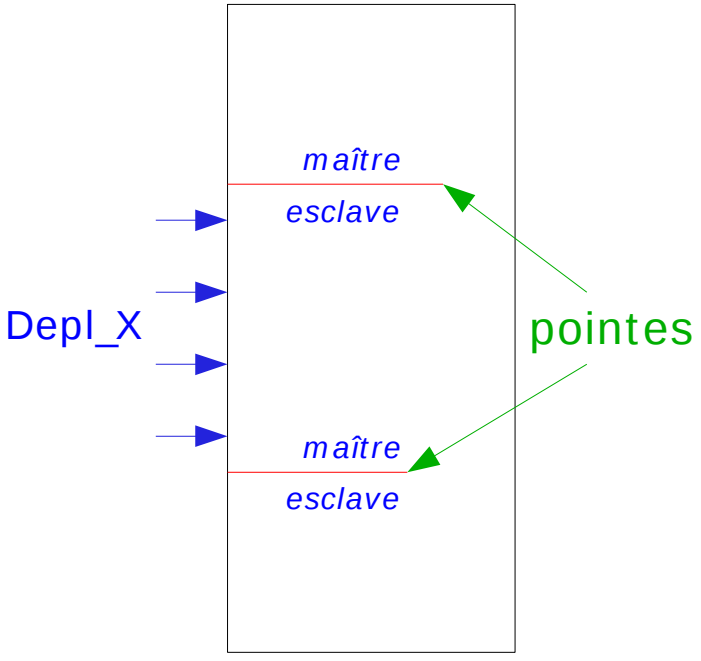


Figure 15.1-a : L'emplacement des fissures pour la modélisation M.

Enfin, l'introduction des fonds de fissure ne permet plus d'imposer un déplacement trop grand suivant X ; on impose maintenant :
$Depl_X=0.20\,m$

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

15.2 Caractéristiques du maillage

Idem modélisation B

15.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les pressions de contact comme pour la modélisation B. L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact, dont on teste les valeurs, est illustré sur la figure 4.4-a.

Pas	Identification	*Référence*
1	LAGS_C pour N24	-238385.373622
	LAGS_C pour N33	-67269.0287535
	LAGS_C pour N34	-44200.938843
2	LAGS_C pour N24	-476772.622857
	LAGS_C pour N33	-134537.599488
	LAGS_C pour N34	-88401.7804325
3	LAGS_C pour N24	-715159.872099
	LAGS_C pour N33	-201806.170221
	LAGS_C pour N34	-132602.622022
4	LAGS_C pour N24	-953547.121341
	LAGS_C pour N33	-269074.740954
	LAGS_C pour N34	-176803.463611

15.4 Remarques

Ce test sert de test de non régression pour le contact avec pointe en 2D petit glissement.

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

16 Modélisation N

16.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit des mêmes caractéristiques de modélisation que la modélisation M, mais en grands glissements.

16.2 Caractéristiques du maillage

Idem modélisation B

16.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les pressions de contact comme pour la modélisation B. L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact, dont on teste les valeurs, est illustré sur la figure 4.4-a.

Pas	Identification	*Référence*
1	LAGS_C pour N24	-235733.727207
	LAGS_C pour N33	-67363.6213534
	LAGS_C pour N34	-54390.634508
2	LAGS_C pour N24	-465195.565576
	LAGS_C pour N33	-133858.368841
	LAGS_C pour N34	-110332.5788
3	LAGS_C pour N24	-688183.601691
	LAGS_C pour N33	-199310.458365
	LAGS_C pour N34	-167912.167359
4	LAGS_C pour N24	-904516.410316
	LAGS_C pour N33	-263543.323143
	LAGS_C pour N34	-227227.354139

16.4 Remarques

La seule différence avec la modélisation M est que pour les grands glissements (modélisation N) une phase de ré-appariement est introduite. Ceci explique les différences de résultats entre les deux méthodes, puisque dans notre cas on introduit un glissement non négligeable par rapport à la taille de la structure. On remarque aussi que la différence augmente linéairement par rapport au glissement imposé. D'ailleurs en n'imposant aucun glissement sur ces deux cas-tests, la différence devient nulle.

Comme ce test n'a pas de solution analytique, il est difficile de déterminer si l'amélioration du modèle introduite par le grand glissement a un impact significatif sur la précision des résultats (champ de déplacements, champ de contraintes) au voisinage de la pointe de fissure. Néanmoins, ce test permet de couvrir la fonctionnalité « grand glissement » dans les éléments en pointe de fissure. Il s'agit donc d'un test en non régression pure.

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

17 Modélisation O

17.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit des mêmes caractéristiques de modélisation que la modélisation M, mais en 3D. On extrude donc le rectangle considéré dans la profondeur du plan d'une longueur unitaire. On bloque les mouvements de corps rigide dans la nouvelle direction considérée.

17.2 Caractéristiques du maillage

Idem modélisation H.

17.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les pressions de contact comme pour la modélisation B. L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact, dont on teste les valeurs, est illustré sur la figure 10.4-a.

Pas	Identification	*Référence*
1	LAGS_C pour N13	-1.6373123667042E+05
	LAGS_C pour N14	-44357.544505499
	LAGS_C pour N15	-35056.97086267
2	LAGS_C pour N13	-3.2746337860021E+05
	LAGS_C pour N14	-88714.735602067
	LAGS_C pour N15	-70113.84839032
3	LAGS_C pour N13	-4.9119551982913E+05
	LAGS_C pour N14	-1.3307192699716E+05
	LAGS_C pour N15	-105170.72552738
4	LAGS_C pour N13	-6.5492051932078E+05
	LAGS_C pour N14	-1.7743185103176E+05
	LAGS_C pour N15	-140228.33441009

17.4 Remarques

Ce test sert de test de non régression pour le contact avec fond de fissure en 3D petit glissement.

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

18 Modélisation P

18.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit des mêmes caractéristiques de modélisation que la modélisation O, mais en grands glissements.

18.2 Caractéristiques du maillage

Idem modélisation H.

18.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les pressions de contact comme pour la modélisation B. L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact, dont on teste les valeurs, est illustré sur la figure 10.4-a.

Pas	Identification	*Référence*
1	LAGS_C pour N13	-1.6238227696502E+05
	LAGS_C pour N14	-44471.272360813,
	LAGS_C pour N15	-47290.249552795
2	LAGS_C pour N13	-3.2167144997233E+05
	LAGS_C pour N14	-88579.687943577
	LAGS_C pour N15	-94685.282753714
3	LAGS_C pour N13	-4.7773723286992E+05
	LAGS_C pour N14	-1.3221454002148E+05
	LAGS_C pour N15	-142192.34718408
4	LAGS_C pour N13	-6.3045892009397E+05
	LAGS_C pour N14	-1.7526305992804E+05
	LAGS_C pour N15	-189824.71053565

18.4 Remarques

Idem modélisation N.

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

19 Modélisation Q

19.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit des mêmes caractéristiques de modélisation que la modélisation F mais en utilisant la formulation pénalisée.

19.2 Caractéristiques du maillage

Il s'agit du même maillage que celui de la modélisation F.

19.3 Grandeurs testées et résultats

On teste les valeurs de pression de contact avec les mêmes valeurs de référence et tolérances que la modélisation F. L'emplacement des nœuds qui stockent les degrés de liberté de contact, dont on teste les valeurs, est illustré sur la Figure 8.4-a. On vérifie que l'on obtient des résultats identiques à la méthode lagrangienne.

Pas	Identification	Référence	tolérance
1	LAGS_C pour N33	0.0000000E+00	1,00E-010
	LAGS_C pour N154	-7.1942608E+03	5,00%
	LAGS_C pour N230	-6.5408344E+03	5,00%
	LAGS_C pour N306	-6.1360067E+03	5,00%
	LAGS_C pour N677	-2.4914329E+03	5,00%
2	LAGS_C pour N33	0.0000000E+00	1,00E-010
	LAGS_C pour N154	-2.4822528E+04	5,00%
	LAGS_C pour N230	-1.2993429E+04	5,00%
	LAGS_C pour N306	-1.2178296E+04	5,00%
	LAGS_C pour N677	-3.4642908E+03	5,00%
3	LAGS_C pour N33	0.0000000E+00	1.00E-10
	LAGS_C pour N154	0.0000000E+00	1.00E-10
	LAGS_C pour N230	-2.0219781E+04	5,00%
	LAGS_C pour N306	-1.8168929E+04	5,00%
	LAGS_C pour N677	-4.8271686E+03	6,50%
4	LAGS_C pour N33	0.0000000E+00	0.00E+00
	LAGS_C pour N154	0.0000000E+00	0.00E+00
	LAGS_C pour N230	-4.3387251E+04	5,00%
	LAGS_C pour N306	-2.4197889E+04	5,00%
	LAGS_C pour N677	-7.2647040E+03	6,50%

20 Synthèse des résultats

Les objectifs de ce test sont atteints :

- Il s'agit de montrer la faisabilité de la prise en compte du contact et du frottement sur les lèvres des fissures horizontales avec l'approche grands glissements X-FEM.
- On démontre également en 2D et 3D l'efficacité des algorithmes implémentés pour améliorer les résultats lorsque les relations linéaires introduites sur les degrés de liberté de contact par l'algorithme LBB entrent en conflit avec un changement de statut contactant/non contactant (modélisation F en 2D et modélisation L en 3D).
- L'approche a été validée avec la prise en compte des frottements en 2D (déformations planes et contraintes planes, éléments QUAD4 et TRI3) et en 3D (éléments HEXA8, PENTA6 et TETRA4)

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

- Il est possible de définir des interfaces (modélisations B, D, F, H, J et L) mais aussi des fissures ne coupant pas entièrement la structure (modélisations N et P).

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