

SSLV116 – Fissure circulaire en milieu 3D avec contraintes initiales.

Résumé :

Ce test a pour but de valider le calcul des facteurs d'intensité de contrainte (SIFs) le long du fond d'une fissure 3D, dans le cadre de l'élasticité en présence de contraintes initiales.

Ce test met en jeu un cube encastré sur toutes ses faces, présentant une fissure circulaire centrale plane. Il est soumis à un champ de contraintes initiales dues à l'application d'un champ thermique.

Ce test contient 2 modélisations :

- Modélisation A : la fissure est maillée (FEM) ;
- Modélisation B (présent dans le dossier de validation) : la fissure n'est pas maillée, elle est représentée par des level-sets (X-FEM)

Pour les deux modélisations, les SIFs sont évalués par les commandes `POST_K1_K2_K3` et `CALC_G`.

Les valeurs numériques sont comparées aux valeurs obtenues dans le cas du chargement thermique équivalent.

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

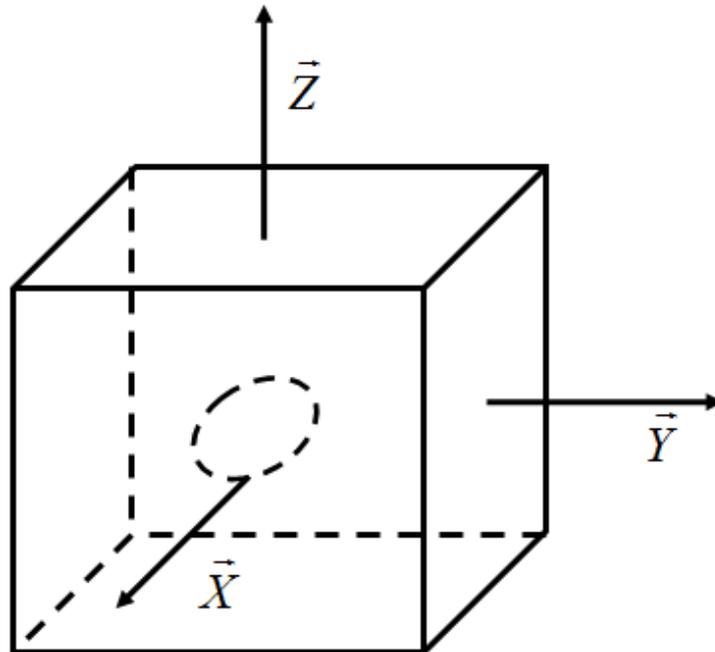


Figure 1.1 - Géométrie du cas test.

La fissure est circulaire (penny shaped crack) de rayon $a=2\text{m}$ dans le plan OXY . Le côté du cube est de longueur $L=10a$. Ainsi, on considère que la fissure se trouve dans un milieu infini.

1.2 Propriétés de matériaux

Le matériau est élastique isotrope dont les propriétés sont :

$$E=200000\text{ MPa}$$

$$\nu=0,3$$

$$\alpha=0,00001\text{ K}^{-1}$$

1.3 Conditions aux limites et chargements

Les faces extérieures du volume sont encastrées.

Compte tenu des symétries, seule la moitié de la structure est modélisée : demi-espace tel que $Y>0$.

Des conditions de symétrie sont donc appliquées sur la face en $Y=0$: sur cette face, le déplacement suivant Y est bloqué.

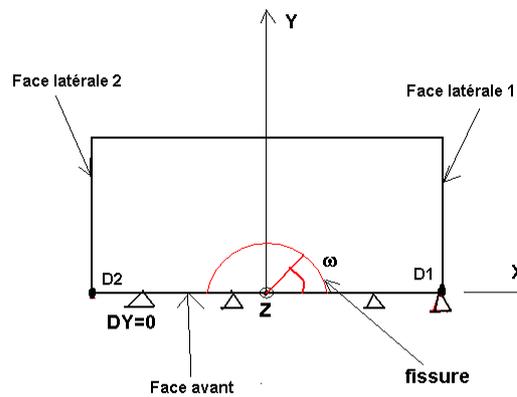


Figure 1.2: Condition de symétrie

La structure, de température uniforme 250°C initialement, est soumise à un champ de température variable en espace, selon Z. La structure refroidit, mais est encastree de toute part. De ce fait, des contraintes d'ouverture sont créées sur la fissure.
La Figure ci-dessous présente le profil de température imposé.

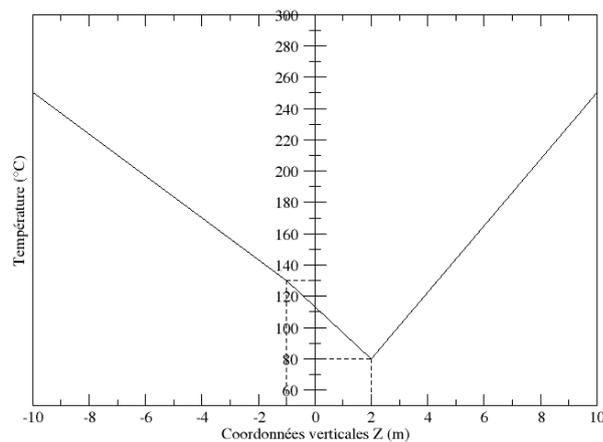


Figure 1.3 - Champ de température imposé.

A l'application de ce champ de température, des contraintes sont créées (fissure fermée). Ces contraintes sont alors extraites et peuvent constituer un champ de contraintes initiales pour le calcul des facteurs d'intensité des contraintes.

2 Solution de référence

La solution de référence est déterminée par calcul des facteurs d'intensité des contraintes directement à partir du chargement thermique.

La validation est faite à partir du maximum du taux de restitution d'énergie local (en chaque nœud du front de fissure) et du facteur d'intensité des contraintes local à 90° de la fissure.

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

Dans cette modélisation, la fissure est maillée (cas FEM). Le maillage comporte un tore entourant le fond de fissure. C'est le même maillage que pour le cas test sslv154a.

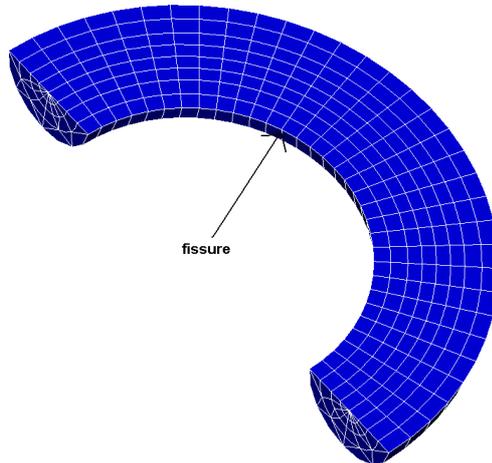


Figure 3.1: maillage rayonnant

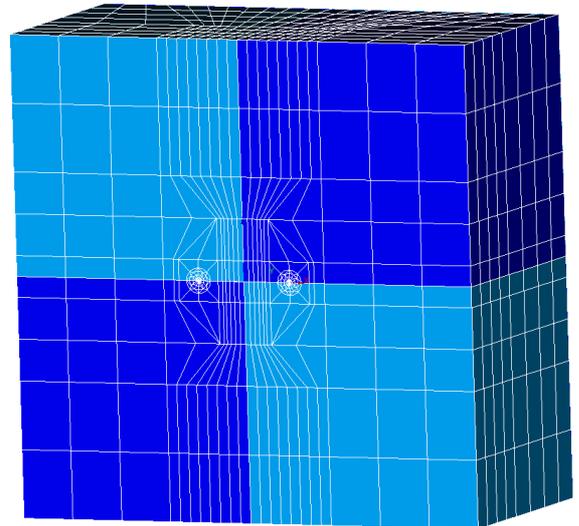


Figure 3.2: maillage de la structure

3.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 9967

Nombre de mailles et type : 864 PENTA15 et 1568 HEXA20

La longueur caractéristique d'un élément près du fond de fissure est de $0,12 m$.

Les nœuds milieux des arêtes des éléments touchant le fond de fissure sont déplacés au quart de ces arêtes.

3.3 Résultats

Trois couronnes d'intégration du champ θ pour la commande `CALC_G` sont utilisées :

- Couronne 1 : $RINF = 0,12 m$ et $RSUP = 0,528 m$.
- Couronne 2 : $RINF_2 = 0,5 RINF$ et $RSUP_2 = 0,5 RSUP$
- Couronne 3 : $RINF_2 = 1,5 RINF$ et $RSUP_2 = 1,5 RSUP$

On choisit un lissage de type `LEGENDRE`.

Le paramètre `ABS_CURV_MAXI` de l'opérateur `POST_K1_K2_K3` est choisi de manière à retenir 5 nœuds sur le segment d'extrapolation.

Le K_I est testé uniquement au point tel que $\omega = 90^\circ$.

| Option de calcul | Cas considéré | | Couronne | Max G (J/m ²) | K1(90°) (MPa.m ^{1/2}) | |
|------------------|---------------------|-----------------|----------|---------------------------|---------------------------------|------------|
| POST_K1_K2_K3 | Thermique | | | | 638,76E6 | |
| | Contrainte initiale | | | | 638,76E6 | |
| CALC_G | Thermique | | | 1,919E6 | | |
| | Contrainte initiale | Points de Gauss | 1 | 1,92E6 | | |
| | | | 2 | 1,954E6 | | |
| | | | 3 | 1,934E6 | | |
| | Noeuds | | 1 | 1,92E6 | | |
| | | | 2 | 1,954E6 | | |
| 3 | | | 1,934E6 | | | |
| CALC_K_G | Contrainte initiale | Points de Gauss | 1 | 1,943E6 | 679,3,36E6 | |
| | | | 2 | 1,952E6 | 677,11E6 | |
| | | | 3 | 1,944E6 | 688,62E6 | |
| | | Noeuds | | 1 | 1,943E6 | 679,3,36E6 |
| | | | | 2 | 1,952E6 | 677,11E6 |
| | | | | 3 | 1,944E6 | 688,62E6 |

Tableau 1- Résultats de la modélisation FEM.

On note alors que les résultats sont :

- Conformes aux références à 2% pour G et 8% K1. Notons que la référence POST_K1_K2_K3 annonce une incertitude de 9% pour son résultat, de l'ordre de l'écart constaté avec CALC_K_G
- Différents de 0.1 à 1% pour G entre les options CALC_G et CALC_K_G,
- Identiques que la contrainte initiale soit considérée aux nœuds ou aux points de Gauss
- Indépendants de la couronne à 2% près pour G de CALC_G, 0.5% pour G de CALC_K_G et 2% pour K1.

3.4 Grandeurs testées

On teste ici de nombreuses grandeurs, afin de contrôler la référence thermique et l'état initial.

| Identification | Option de calcul | Remarque | Type de référence | Valeur de référence | % Tolérance |
|-------------------|-----------------------------|----------------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------|
| $\max(G_{ref})$ | CALC_G, thermique | couronne1 | 'NON REGRESSION' | 1,91937 10 ⁶ | 1% |
| $\max(G_{irref})$ | CALC_K_G, thermique | couronne1 | 'AUTRE ASTER' | 1,91937 10 ⁶ | 1% |
| $\max(G_{ini})$ | CALC_G, contrainte initiale | Couronne1 contrainte initiale Gauss | 'AUTRE ASTER' | 1,91937 10 ⁶ | 1% |
| $\max(G_{ini2})$ | CALC_G, contrainte initiale | Couronne2 contrainte initiale Gauss | 'AUTRE ASTER' | 1,92013 10 ⁶ | 2% |
| $\max(G_{ini3})$ | CALC_G, | Couronne3 | 'AUTRE ASTER' | 1,92013 10 ⁶ | 1% |

| | | | | | |
|------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|---------------|-----------------------|-------|
| | contrainte initiale | contrainte initiale Gauss | | | |
| $max(Gini4)$ | CALC_G, contrainte initiale | Couronne1 contrainte initiale Noeud | 'AUTRE ASTER' | $1,91937 \cdot 10^6$ | 1% |
| $max(Gini5)$ | CALC_G, contrainte initiale | Couronne2 contrainte initiale Noeud | 'AUTRE ASTER' | $1,92013 \cdot 10^6$ | 2% |
| $max(Gini6)$ | CALC_G, contrainte initiale | Couronne3 contrainte initiale Noeud | 'AUTRE ASTER' | $1,92013 \cdot 10^6$ | 1% |
| $max(Girini)$ | CALC_K_G, contrainte initiale | Couronne1 contrainte initiale Gauss | 'AUTRE ASTER' | $1,92013 \cdot 10^6$ | 1,5 % |
| $max(Girini2)$ | CALC_K_G, contrainte initiale | Couronne2 contrainte initiale Gauss | 'AUTRE ASTER' | $1,95458 \cdot 10^6$ | 1,5 % |
| $max(Girini3)$ | CALC_K_G, contrainte initiale | Couronne3 contrainte initiale Gauss | 'AUTRE ASTER' | $1,9347110^6$ | 1,5 % |
| $max(Girini4)$ | CALC_K_G, contrainte initiale | Couronne1 contrainte initiale Noeud | 'AUTRE ASTER' | $1,92013 \cdot 10^6$ | 1,5 % |
| $max(Girini5)$ | CALC_K_G, contrainte initiale | Couronne2 contrainte initiale Noeud | 'AUTRE ASTER' | $1,95458 \cdot 10^6$ | 1,5 % |
| $max(Girini6)$ | CALC_K_G, contrainte initiale | Couronne3 contrainte initiale Noeud | 'AUTRE ASTER' | $1,93471 \cdot 10^6$ | 1,5 % |
| $Kref(90^\circ)$ | POST_K1_K2_K3 Thermique | | 'AUTRE ASTER' | $6,387673 \cdot 10^8$ | 5 % |
| $Kini(90^\circ)$ | POST_K1_K2_K3 Contrainte initiale | | 'AUTRE ASTER' | $6,387673 \cdot 10^8$ | 5 % |
| $Girini$ $K_I(90^\circ)$ | CALC_K_G, Contrainte initiale | Couronne1, contrainte initiale Gauss | 'AUTRE ASTER' | $6,387673 \cdot 10^8$ | 10% |
| $Girini2$ $K_I(90^\circ)$ | CALC_K_G, Contrainte initiale | Couronne2 contrainte initiale Gauss | 'AUTRE ASTER' | $6,387673 \cdot 10^8$ | 10% |
| $Girini3$ $K_I(90^\circ)$ | CALC_K_G, Contrainte initiale | Couronne3 contrainte initiale Gauss | 'AUTRE ASTER' | $6,387673 \cdot 10^8$ | 10% |
| $Girini4$ $K_I(90^\circ)$ | CALC_K_G, Contrainte initiale | Couronne1 contrainte initiale Noeud | 'AUTRE ASTER' | $6,387673 \cdot 10^8$ | 10% |
| $Girini5$ $K_I(90^\circ)$ | CALC_K_G, Contrainte | Couronne2 contrainte | 'AUTRE ASTER' | $6,387673 \cdot 10^8$ | 10% |

| | | | | | |
|-----------------|------------------------|------------------------------|---------------|--------------------------|-----|
| | initiale | initiale Noeud | | | |
| <i>Girini6</i> | CALC_K_G, | Couronne2 | 'AUTRE ASTER' | 6,387673 10 ⁸ | 10% |
| $K_I(90^\circ)$ | Contrainte initiale | contrainte initiale Noeud | | | |

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

Dans cette modélisation, la fissure n'est pas maillée (cas X-FEM).

C'est le même maillage que pour le cas test sslv154b.

Afin d'obtenir une meilleure précision sur les résultats, le maillage initial libre a été raffiné au niveau du fond de fissure à l'aide de la commande `MACR_ADAP_MAIL`.

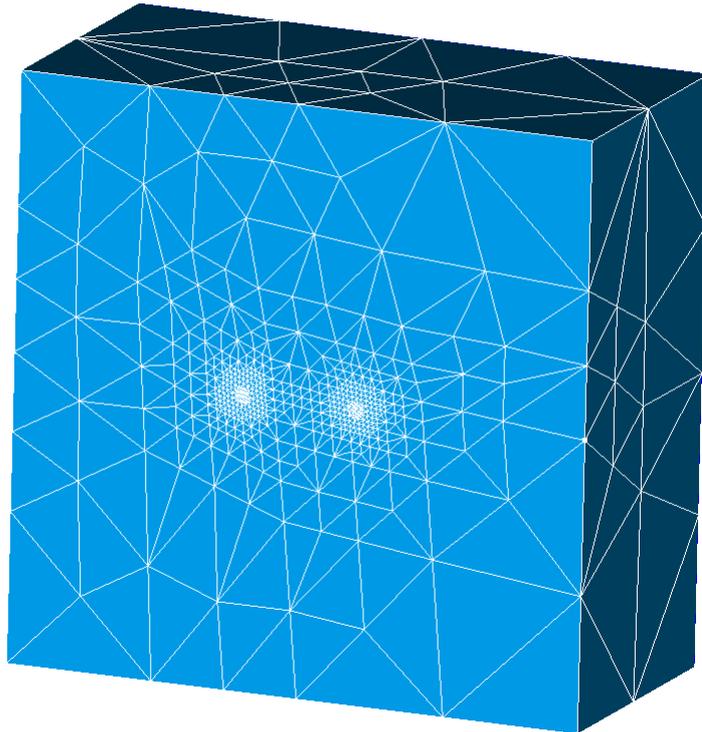


Figure 4.1: maillage de la structure raffiné

4.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 1146

Nombre de mailles et type : 64573 TETRA4

La longueur caractéristique d'un élément près du fond de fissure est de $0,07\text{ m}$.

4.3 Résultats

Trois couronnes d'intégration du champ θ pour la commande `CALC_G` sont utilisées :

- Couronne 1 : $R_{INF}=0,12\text{ m}$ et $R_{SUP}=0,528\text{ m}$.
- Couronne 2 : $R_{INF_2}=0,5 R_{INF}$ et $R_{SUP_2}=0,5 R_{SUP}$
- Couronne 3 : $R_{INF_2}=1,5 R_{INF}$ et $R_{SUP_2}=1,5 R_{SUP}$

On choisit un lissage de type `LEGENDRE`.

Le paramètre `ABS_CURV_MAXI` de l'opérateur `POST_K1_K2_K3` est choisi de manière à retenir 5 nœuds sur le segment d'extrapolation.

Le K_j est testé uniquement au point tel que $\omega=90^\circ$.

| Option de calcul | Cas considéré | Couronne | Max G (J/m ²) | K1(90°) (MPa.m ^{1/2}) |
|------------------|---------------------|----------|---------------------------|---------------------------------|
| POST_K1_K2_K3 | Thermique | | | 639,E6 |
| | Contrainte initiale | | | 612E6 |
| CALC_G | Thermique | | 2,06E6 | |
| | Contrainte initiale | 1 | 2,03E6 | |
| | | 2 | 1,95E6 | |
| | | 3 | 2,06E6 | |
| CALC_K_G | Contrainte initiale | 1 | 1,92E6 | 677E6 |
| | | 2 | 1,94E6 | 661E6 |
| | | 3 | 2,07E6 | 688E6 |

Tableau 1- Résultats de la modélisation FEM.

On note alors que les résultats sont :

- Conformes aux références à 6% pour G et 8% pour K1. Notons que la référence POST_K1_K2_K3 présente un écart de 4% entre le cas thermique et le cas avec contraintes initiales
- Différents de 5% maximum pour G entre les options CALC_G et CALC_K_G,
- Indépendants de la couronne à 5% près pour G de CALC_G, 7% pour G de CALC_K_G et 4% pour K1.

4.4 Grandeurs testées

Comme pour la modélisation A, on teste la valeur max des taux de restitution d'énergie et le facteur d'intensité des contraintes pour un angle de 90°, pour 3 couronnes, dans les cas de calcul thermique et d'état initial.

Cependant, en X-FEM, les contraintes ne peuvent être données qu'aux nœuds, ce qui limite le nombre de tests.

On teste ici de nombreuses grandeurs, afin de contrôler la référence thermique et l'état initial.

| Identificatio n | Option de calcul | Remarque | Type de référence | Valeur de référence | % Tolér ance |
|------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------|------------------------|--------------------|
| $\max(Gref)$ | CALC_G, thermique | couronne1 | 'NON REGRESSION' | $2,06919 \cdot 10^6$ | 1% |
| $\max(Gini)$ | CALC_G, contrainte initiale | Couronne1 | 'AUTRE ASTER' | $2,06919 \cdot 10^6$ | 2% |
| $\max(Gini2)$ | CALC_G, contrainte initiale | Couronne2 | 'AUTRE ASTER' | $2,06919 \cdot 10^6$ | 6% |
| $\max(Gini3)$ | CALC_G, contrainte initiale | Couronne3 | 'AUTRE ASTER' | $2,06919 \cdot 10^6$ | 2% |
| $\max(Girini)$ | CALC_K_G, contrainte initiale | Couronne1 | 'AUTRE ASTER' | $2,06919 \cdot 10^6$ | 7% |
| $\max(Girini2)$ | CALC_K_G, contrainte initiale | Couronne2 | 'AUTRE ASTER' | $2,06919 \cdot 10^6$ | 7% |
| $\max(Girini3)$ | CALC_K_G, contrainte initiale | Couronne3 | 'AUTRE ASTER' | $2,06919 \cdot 10^6$ | 3% |
| $\max(Girini4)$ | CALC_K_G, contrainte initiale | Couronne1 contrainte initiale Noeud | 'AUTRE ASTER' | $1,92013 \cdot 10^6$ | 1,5% |
| $\max(Girini5)$ | CALC_K_G, contrainte initiale | Couronne2 contrainte initiale Noeud | 'AUTRE ASTER' | $1,95458 \cdot 10^6$ | 1,5% |
| $\max(Girini6)$ | CALC_K_G, contrainte initiale | Couronne3 contrainte initiale Noeud | 'AUTRE ASTER' | $1,93471 \cdot 10^6$ | 1,5% |
| $Kref(90^\circ)$ | POST_K1_K2_K 3 Thermique | | 'NON REGRESSION' | $6,397943 \cdot 10^8$ | 1% |
| $Girini$ $K_I(90^\circ)$ | CALC_K_G, Contrainte initiale | Couronne1, | 'AUTRE ASTER' | $6,397943 \cdot 10^8$ | 7% |
| $Girini2$ $K_I(90^\circ)$ | CALC_K_G, Contrainte initiale | Couronne2 contrainte initiale Gauss | 'AUTRE ASTER' | $6,397943 \cdot 10^8$ | 5% |
| $Girini3$ $K_I(90^\circ)$ | CALC_K_G, Contrainte initiale | Couronne3 contrainte initiale Gauss | 'AUTRE ASTER' | $6,397943 \cdot 10^8$ | 8% |

5 Synthèse des résultats

Ce cas-test valide la calcul des facteurs d'intensité de contrainte d'une fissure 3D en présence d'état initial.

Le cas de fissure maillée donne meilleure satisfaction que le cas X-FEM, avec moins de dépendance à la couronne notamment.