# FORMA05 - Travaux pratiques de la formation « Mécanique de la Rupture » : Plaque fissurée en traction (SENT)

**Résumé :**

Ce test 2D (déformations planes) modélise en quasi-statique une plaque fissurée mise en traction (mode I pur). Il s'agit d'une modélisation de l'éprouvette SENT (Single Edge Notched Specimen in Tension).

Ce test est utilisé en formation « Mécanique de la Rupture » d u fait de la rapidité du temps d'exécution et de l'existence d'une solution analytique . Il permet de se familiariser avec les post-traitements en mécanique de la rupture élastique linéaire ( CALC_G, et POST_K1_K2_K3 ) pour les modélisation FEM et X-FEM. Les objectifs pédagogiques sont l'illustration de l'influence du maillage (maillage avec des éléments linéaires / quadratiques / quadratiques + Barsoum) ainsi que l'illustration de l'indépendance aux couronnes d'intégration pour la méthode G-thêta.

C e cas-test comporte 4 modélisations :
- Modélisation A : FEM, plaque entière (sans condition de symétrie), maillage libre
- Modélisation B : FEM, (demi-) plaque avec condition de symétrie, maillage libre
- Modélisation C : X-FEM, plaque entière (sans condition de symétrie), maillage réglé
- Modélisation D : FEM, (demi-)plaque avec condition de symétrie, maillage rayonnant

Seule la modélisation A fait l'objet d'une session de TP dans le cadre de la formation.



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

# 1 Problème de référence

## 1.1 Géométrie

On considère une plaque rectangulaire de hauteur $H=2\,m$ , de largeur $W=1\,m$ , en déformation plane, avec une fissure horizontale débouchante de profondeur $a=0{,}1\,m$ .

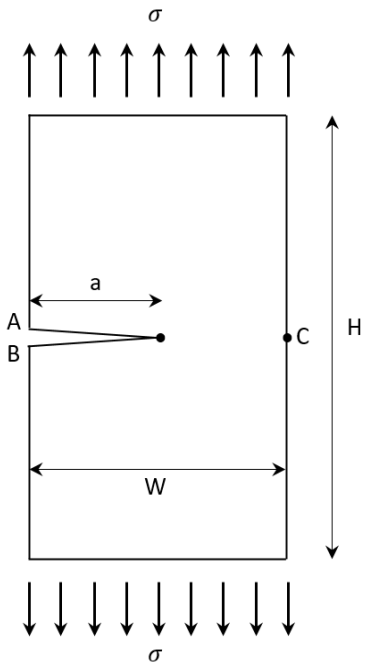



**Figure 1.1-1: schéma de la plaque fissurée**

## 1.2 Propriétés du matériau

On considère un matériau homogène isotrope élastique linéaire dont les caractéristiques sont les suivantes :

- module d'Young $E=210\,000\,MPa$
- coefficient de Poisson $\nu=0{,}3$

## 1.3 Conditions aux limites et chargements

La plaque est en traction ( $\sigma=10\,MPa$ ).



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

# 2 Solution de référence

## 2.1 Méthode utilisée pour la solution de référence

La solution de référence pour le facteur d'intensité de contraintes du mode I $K_I$ s'exprime de la façon suivante [1] :

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}\, F\left(\frac{a}{W}\right)$$

avec $F\left(\frac{a}{W}\right) = 1{,}122 - 0{,}231\left(\frac{a}{W}\right) + 10{,}550\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 21{,}710\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 30{,}382\left(\frac{a}{W}\right)^4$

Cette expression de $F$ provient d'une régression par moindres carrés (Gross 1964; Brown 1966). La précision annoncée de cette formule est de 0,5 % pour $\frac{a}{W} \leq 0{,}6$.

Remarque : dans [1] sont données d'autres formules pour $F(a/W)$, par exemple une formule due à Tada (1973) qui affiche une précision inférieure à 0,5 % pour n'importe quel ratio $a/W$.

Le taux de restitution d'énergie $G$ s'obtient grâce à la formule d'Irwin : $G = \frac{(1-\nu^2)}{E} K_I^2$. La précision attendue pour la valeur de référence de $G$ sera inférieure à 1 %.

## 2.2 Résultats de référence

Avec les valeurs numériques de l'énoncé, on trouve :

$$F(a/W) \approx 1{,}186$$
$$K_I \approx 6{,}646\, MPa\,.\sqrt{m}$$
$$G \approx 191{,}4\, J\,.\,m^{-2}$$

Remarque : en utilisant la formule alternative de Tada 1973, on obtient $F(a/W) \approx 1{,}196$ , soit un écart entre les 2 références d'environ 0,8 %. Compte-tenu des précisions annoncées pour chaque référence, on en déduit que la valeur théorique se situe entre ces 2 références. Il serait donc certainement plus judicieux de choisir comme valeur de référence la valeur moyenne $F(a/W) \approx 1{,}191$ . Toutefois dans la suite, on considère comme solution de référence celle provenant de la régression par moindres carrés (Gross 1964; Brown 1966).

## 2.3 Références bibliographiques


- H. Tada, P. Paris, G. Irwin, The stress analysis of cracks handbook, 3 rd edition, 2000




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

# 3 Modélisation A : FEM, plaque entière (sans condition de symétrie), maillage libre

## 3.1 Déroulement du TP

Pour ce TP, deux possibilités sont offertes pour l'obtention du maillage de la plaque fissurée :
- vous pouvez récupérer directement le maillage fissuré : cf. § 3.1.1
- vous pouvez le créer vous-même. L es instructions pour créer le maillage sont données a u paragraphe § 3.1.2

### 3.1.1 Récupération du maillage avec Salome-Meca

Pour ce TP, vous pouvez récupérer directement le maillage `forma05a.mmed`. Il s'agit d'un maillage dont les mailles sont l inéaires . Les groupes sont décrits sur la Figure 3.1.1-1 :

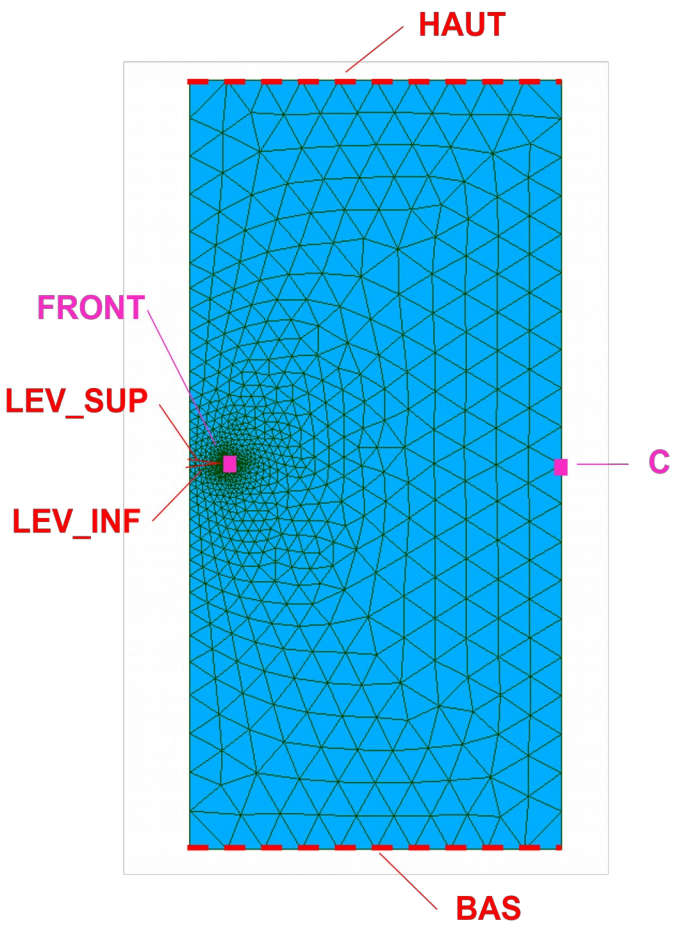



**Figure 3.1.1-1: Maillage forma05b avec ses groupes**

Les groupes définis sont les suivants :

| | | |
|---|---|---|
| Groupes de nœuds | FRONT | Ce groupe contient un seul nœud : le nœud correspondant au front de fissure. Ce nœud sera aussi utilisé pour bloquer les modes rigides |
| | C | Nœud situé au milieu du coté latéral droit de la plaque, servant au blocage des modes rigides |
| Groupes de mailles 1d | HAUT | Ligne supérieure de la plaque |



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

| | | |
|---|---|---|
| | BAS | Ligne inférieure de la plaque |
| | LEV_SUP | Lèvre supérieure de la fissure |
| | LEV_INF | Lèvre inférieure de la fissure |

Pour rappel, on cherche à appliquer une pression égale à 10 MPa sur la ligne HAUT et sur la ligne BAS . Pour éviter les mouvements de corps rigide, o n bloquera le déplacement selon X et Y sur le groupe FRONT et le déplacement selon Y sur le groupe C .

Si vous avez récupéré fichier forma05b.mmed, alors vous pouvez passer directement au §3.1.3.

### 3.1.2 Création de la géométrie et du maillage avec Salome-Meca

La géométrie de la plaque représentée en la Figure 1.1-1 peut être construite avec le module Geometry de Salome-Meca. Lancer le module Geometry puis effectuer les étapes suivantes :

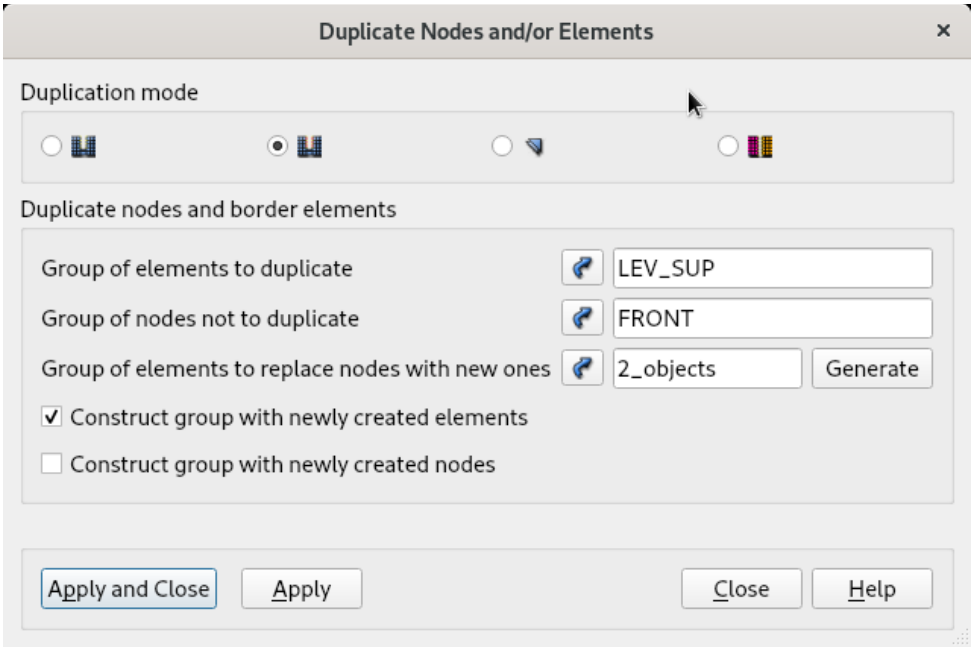
| |
|---|
| Création de la CAO de la plaque saine : New Entity / Primitives / Rectangle : Height = 2, Wi dth = 1. L'origine du repère est alors situé e au centre de la plaque |
| Création de la CAO de la fissure : Créer les 2 points de coordonnées (-0,5 0 0) et (-0,4 0 0), puis la ligne reliant ces 2 points. |
| Création de la CAO de la p laque fissuré e : Réaliser la partition ( Operations / Partition ) de la face avec la ligne créée à l'étape précédente . |
| Création du point C : créer le point C de coordonnées (0,5 0 0) puis générer la partition de la plaque fissurée avec le point C. Renommer l'objet résultant en « plaque_fiss » |
| Création des groupes géométriques : U tilis er la fonctionnalité Create group . (accessible par un clic-droit en ayant sélectionné l' objet plaque_fiss cré é à l'étape précédente ) pour créer les groupes définis sur la Figure 3.1.1-1 : HAUT , BAS , LEV_SUP , C e t FRONT Le groupe LEV_INF ne peut pas être encore cré é à ce stade car les lèvres de la fissure ne sont pas encore dédoublées. |
| Sauvegarder votre travail |

Lancer le module Mesh de Salome-Meca puis effectuer les étapes suivantes :

| |
|---|
| Création d' un nouveau maillage ( Mesh / Create Mesh ) a ssocié à l'objet géométrique plaque_fiss |
| Choisir l'algorithme 2d Netgen 1D-2D : choisir *NETGEN 2D Parameters* puis *Max. Size* = $0{,}1$ , *Min. Size* = $a/50$ , option *Very Fine*. Il est important de ne pas cocher la case *Second Order* (ce qui générerait un maillage quadratique) car l'opération de dédoublement des lèvres (voir plus bas) ne fonctionne que sur des mailles linéaires. |
| I mposer un raffinement de maillage autour du front de fissure : L'algorithme Netgen 1D-2D permet de définir une taille des mailles localement (onglet *Local sizes* ). On pourra par exemple spécifier des éléments de $a/50$ autour du front de fissure (cliquez sur *On Vextex* puis sur le groupe *FRONT* d e l'objet plaque_fiss). |
| Importer les groupes de mailles et de nœuds d'après les groupes géométriques :<br>- groupes de mailles : HAUT , BAS , LEV_SUP<br>- groupe de nœuds : C et FRONT |
| Dédoublement des lèvres : utiliser la fonctionnalité de dédoublement de nœuds du module Mesh (Modification / Transformation / Duplicate Nodes or/and Elements), en le paramétrant comme cela est indiqué sur la capture d'écran ci-dessous : |



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




Cela crée un nouveau groupe de edges `affectedEdges` que vous pouvez supprimer et un nouveau groupe de edges `LEV_SUP_double` qu'il faut renommer en `LEV_INF`.

Vérification du maillage : vérifier que le maillage ne contient pas de nœuds orphelins ( `Controls / Nodes Controls / Free Nodes` ). Vérifier que le maillage contient bien des nœuds doubles ( `Controls / Nodes Controls / D ouble Nodes` ) au niveau des lèvres.

Sauvegarder votre travail.

Exportez le maillage ainsi obtenu au format MED.

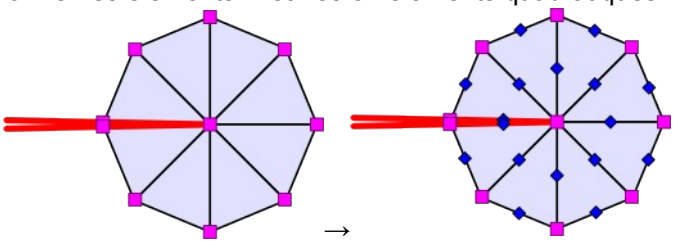
Remarque : D'autres techniques de construction d'un tel maillage existent. Par exemple on pourrait créer le maillage de la partie supérieure de la plaque (cf. modélisation B) puis le dupliquer par symétrie et recoller la partie correspondant au ligament sain. Autre possibilité : utiliser la fonctionnalité `New Entity/Basic/2D Sketch` pour créer le contour de la plaque fissurée (comme sur la Figure 1.1-1) en espaçant les points $A$ et $B$ d'une faible distance, par exemple $4.10^{-4}$ m. La fissure sera alors très légèrement ouverte. Il n'est alors pas nécessaire d'utiliser la fonctionnalité de dédoublement des nœuds.

### 3.1.3 Création du cas dans AsterStudy

Lancer Salome_Meca, puis choisissez le module *AsterStudy*. Ajoutez les étapes suivantes à votre cas :

**Read a mesh** (***LIRE_MAILLAGE***). Sélectionnez le maillage `forma05b.mmed` ou bien le maillage généré à l'issu du §3.1.2 et le format MED. Ce maillage contient des mailles linéaires.

**CREA_MAILLAGE**. Sélectionnez le maillage précédent et donnez un nouveau nom. Choisissez l'action `LINE_QUAD` pour transformer les éléments linéaires en éléments quadratiques.

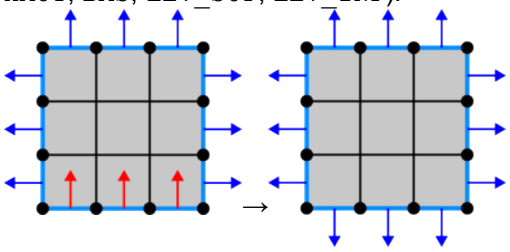


**Modify a mesh** (***MODI_MAILLAGE***). Choisissez le maillage lu précédemment et sélectionnez le `reuse`. Sélectionnez l'action `ORIE_PEAU` pour réorienter les normales aux arêtes vers l'extérieur du



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

maillage (groupes d'éléments HAUT, BAS, LEV_SUP, LEV_INF).



**Assign finite element** (AFFE_MODELE). Choisissez le phénomène mécanique et la modélisation des milieux continus 2D en déformation plane (D_PLAN)

Définition et affectation du matériau: **Define a material (DEFI_MATERIAU)** et **Assign a material (AFFE_MATERIAU)**

Définition des conditions limites et chargements : **Assign mechanical load (AFFE_CHAR_MECA)** :
- Blocage des modes rigides ( **D X** et **D Y** sur F RONT et **DY** sur C ) ;
- Application de la pression sur HAUT et BAS) **(PRES_REP)**

Résolution du problème élastique : **Static mechanical analysis (MECA_STATIQUE)** ;

Pour visualisation avec Paravis :
- Calcul du champ de contraintes extrapolé aux nœuds (CALC_CHAMP, option 'CONTRAINTE' avec le champ 'SIGM_ NOEU')
- Calcul du champ de contraintes équivalentes ( CALC_CHAMP, option ' CRITERES ' avec le champ 'SIEQ _NOEU')

Pour cela, on enrichira le concept issu de MECA_STATIQUE en reprenant le même nom de concept.

Impression des résultats au format MED : Results output (IMPR_RESU).

Vous pouvez lancer le cas pour vérifier le bon fonctionnement de votre mise en données.

### 3.1.4 Ajout des étapes de post traitement en mécanique de la rupture

Afin de séparer le calcul et le post-traitement, vous pouvez ajouter une nouvelle étape (New stage) à votre cas d'étude (Case).

**Définition du fond de fissure (opérateur DEFI_FOND_FISS ).** Définir le fond de fissure dans DEFI_FOND_FISS à partir du groupe de nœud du fond FRONT et les mot-clés LEVRE_INF et LEVRE_SUP à partir des groupes de mailles LEV_INF et LEV_SUP.

**Calcul du taux de restitution d'énergie avec CALC_G** (OPTION='G').
Compléter les informations sur le champ THETA :
- la description de la fissure (FISSURE)
- les rayons de la couronne du champ theta ( R_INF , R_SUP ), à définir en fonction du maillage utilisé.

Imprimer les valeurs de G ( IMPR_TABLE ).

**Calcul de s facteurs d'intensité des contraintes avec CALC_G** (OPTION='K')
Idem que précédemment.
Imprimer les résultats dans une nouvelle table (IMPR_TABLE).

Calcule de K et G avec POST_K1_K2_K3 :
- renseigner le fond de fissure
- renseigner le paramètre ABSC_CURV_MAXI
- imprimer les résultats dans une table (IMPR_TABLE)

Comparer les solutions obtenues avec la solution de référence.

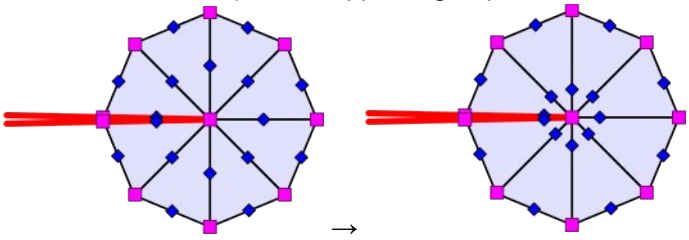


Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

### 3.1.5 Pour aller plus loin : Utilisation des éléments de Barsoum

Pour cela, ajoutez la commande suivante après CREA_MAILLAGE :

**Modify a mesh** (***MODI_MAILLAGE***). Choisissez le maillage quadratique et le reuse. Action MODI_MAILLE avec l'option NOEUD_QUART pour déplacer les nœuds milieux des éléments connectés à la pointe de la fissure au quart de la distance (éléments de Barsoum). Pour rappel le groupe de nœud du fond de fissure est FRONT.



### 3.1.6 Pour aller plus loin : Études d'influence des tailles de couronnes

- Dans CALC_G : vérifier l'indépendance du résultat au choix des couronnes d'intégration du champ thêta ;
- Dans POST_K1_K2_K3 : étudier l'influence du paramètre ABSC_CURV_MAXI.

## 3.2 Grandeurs testées et résultats

### 3.2.1 Tests sur G

| Identification | Référence | % tolérance |
|---|---|---|
| $G$ de CALC_G, option G | 191,4 | 0,6% |
| $G_{Irwin}$ de CALC_G, option K | 191,4 | 0,6% |
| $G$ de POST_K1_K2_K | 191,4 | 1,0% |

### 3.2.2 Tests sur KI

| Identification | Référence | % tolérance |
|---|---|---|
| $K_I$ de CALC_G, option K | 6,646 $10^6$ | 0,3% |
| $K_I$ de POST_K1_K2_K | 6,646 $10^6$ | 0,5% |



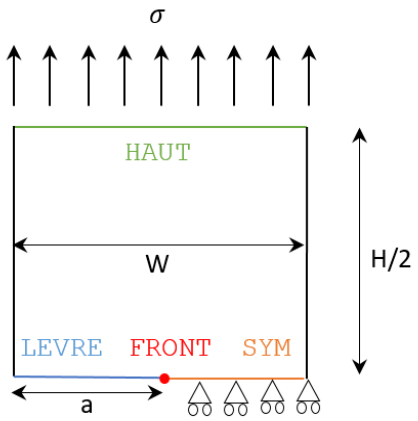
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 4 Modélisation B : FEM, (demi-)plaque avec condition de symétrie, maillage libre

## 4.1 Déroulement du TP

### 4.1.1 Géométrie et maillage avec Salome-Meca

En prenant en compte la symétrie de la géométrie définie sur la Figure 1.1-1 seule la moitié supérieure du modèle sera représentée. La géométrie modélisée dans cette modélisation est représentée sur la figure ci-dessous.




Cette géométrie peut être construite avec module Geometry de Salome-Meca en utilisant la fonctionnalité `New Entity / Basic /2D Sketch` puis `Build/Face`. On veillera à définir les groupes géométriques `FRONT`, `SYM`, `HAUT` et `LEVRE` sur la face ainsi créée en utilisant la fonctionnalité `New Entity / Explode`.

Avec le module Mesh de Salome-Meca, en utilisant Netgen 1D-2D : choisir `NETGEN 2D Parameters` puis `Max. Size` = $0{,}1\,m$ , `Min. Size` = $0{,}005\,m$ , option `Very Fine` et cocher la case `Second Order` pour obtenir directement un maillage quadratique. Cet algorithme permet lui aussi de définir une taille des mailles localement (onglet `Local sizes`). On pourra par exemple spécifier des éléments de $0{,}005\,m$ à proximité du fond de fissure. N'oubliez par d'importer les groupes de mailles et de nœuds d'après les groupes géométriques `FRONT`, `SYM`, `HAUT` et `LEVRE`.

### 4.1.2 Création du fichier de commandes sans post-traitement de la rupture

| |
|---|
| Lecture du maillage (`LIRE_MAILLAGE`) au format MED ; |
| Réorientation des normales aux éléments : on utilisera `MODI_MAILLAGE/ORIE_PEAU` pour orienter tous les éléments de la même façon, avec une normale tournée vers l'extérieur (utiliser le groupe `HAUT`) ; |
| Définition des éléments finis utilisés (`AFFE_MODELE`)<br>On ouvre la documentation par un clic-droit sur le nom de la commande et on trouve la modélisation correspondante à une modélisation en contraintes planes pour les éléments de milieux continus 2D (`D_PLAN`) |
| Définition et affectation du matériau (`DEFI_MATERIAU` et `AFFE_MATERIAU`) ; |
| Définition des conditions limites et chargements (`AFFE_CHAR_MECA`) :<br>• Symétrie sur la moitié de la plaque `SYM` (`DDL_IMPO`) ;<br>• Blocage des modes rigides (`DDL_IMPO`) ;<br>• Application de la traction sur `HAUT (FORCE_CONTOUR)` |



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

| |
|---|
| Résolution du problème élastique (MECA_STATIQUE) ; |
| Pour visualisation avec Paravis :<br>• Calcul du champ de contraintes extrapolé aux nœuds (CALC_CHAMP, option ' CONTRAINTE ' avec le champ 'SIGM_ NOEU')<br>• Calcul du champ de contraintes équivalentes ( CALC_CHAMP, option ' CRITERES ' avec le champ 'SIEQ _NOEU')<br>Pour cela, on enrichira le concept issu de MECA_STATIQUE en reprenant le même nom de concept. |
| Impression des résultats au format MED (IMPR_RESU). |

### 4.1.3 Calcul du champ de déplacement

Lancement du calcul avec *AsterStudy*.

Visualiser les champs de déplacement et de contraintes obtenus.

### 4.1.4 Post-traitement pour la rupture

#### a) Définition du fond de fissure

Définir le fond de fissure dans DEFI_FOND_FISS à partir des groupes de mailles du fond et des lèvres. Le modèle étant symétrique, il est nécessaire de préciser SYME='OUI'.

Préciser le fond de fissure ( FOND_FISS ) et la lèvre supérieure ( LEVRE_SUP ).

#### b) Calcul de G par la méthode G-théta

Calculer le taux de restitution d'énergie G avec CALC_G ( OPTION='G' ).

Utiliser le résultat du MECA_STATIQUE ( RESULTAT ).

Compléter les informations sur le champ THETA :

- la description de la fissure (FISSURE)
- les rayons de la couronne du champ théta (R_INF, R_SUP), à définir en fonction du maillage utilisé.

I mprimer les valeurs de G ( IMPR_TABLE ).

#### c) Calcul de K par la méthode G-théta

Calculer également les facteurs d'intensité des contraintes $K_I$ et $K_{II}$ (OPTION='K').

Idem que précédemment.

Imprimer les résultats dans une nouvelle table (IMPR_TABLE).

#### d) Calcul de K et G par la méthode d'extrapolation des sauts de déplacement

Calculer K et G avec POST_K1_K2_K3 :

- utiliser le résultat du MECA_STATIQUE ( RESULTAT ).
- renseigner le fond de fissure
- renseigner le paramètre ABSC_CURV_MAXI
- imprimer les résultats dans une table (IMPR_TABLE)

Comparer les solutions obtenues avec la solution de référence.

### 4.1.5 Pour aller plus loin : utilisation des éléments de Barsoum



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

Après l'opérateur LIRE_MAILLAGE, modifier le maillage en transformant les éléments en pointe de fissure en éléments de Barsoum (opérateur MODI_MAILLAGE / MODI_MAILLE / NOEUD_QUART ) et regarder comment le résultat est modifié.

### 4.1.6 Pour aller plus loin : études d'influence des tailles de couronnes

- Sur CALC_G : vérifier l'indépendance du résultat au choix des couronnes d'intégration du champ thêta ;
- Sur POST_K1_K2_K3 : étudier l'influence du paramètre ABSC_CURV_MAXI.



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

## 4.2 Grandeurs testées et résultats

### 4.2.1 Tests sur G

| Identification | Référence | % tolérance |
|---|---|---|
| $G$ de CALC_G, option G | 191,4 | 0,6% |
| $G_{Irwin}$ de CALC_G, option K | 191,4 | 0,6% |
| $G$ de POST_K1_K2_K | 191,4 | 1,0% |

### 4.2.2 Tests sur KI

| Identification | Référence | % tolérance |
|---|---|---|
| $K_I$ de CALC_G, option K | 6,646 $10^6$ | 0,3% |
| $K_I$ de POST_K1_K2_K | 6,646 $10^6$ | 0,5% |



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

# 5 Modélisation C : X-FEM, plaque entière (sans condition de symétrie), maillage réglé

## 5.1 Déroulement du TP

### 5.1.1 Récupération du maillage avec Salome-Meca

Pour ce TP, vous pouvez récupérer directement le maillage forma05c.mmed. Le maillage fourni est quadratique. Les groupes sont décris sur la Figure 5.1.1-1 :

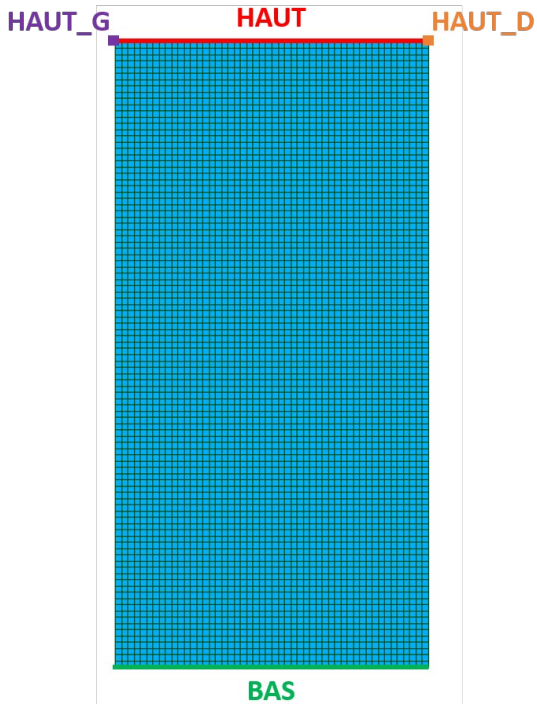
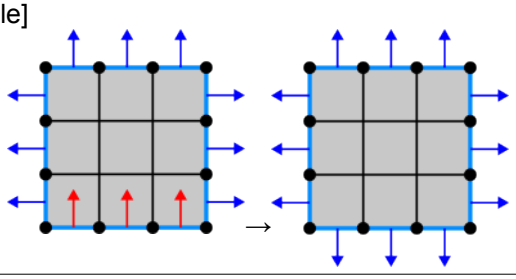



**Figure 5.1.1-1: Maillage forma05c avec ses groupes**

Les conditions limites et les chargements sont les mêmes que ceux de la modélisation B.

### 5.1.2 Création du cas classique dans AsterStudy

| |
|---|
| Lancer Salome_Meca, puis choisissez le module AsterStudy. Ajoutez les étapes suivantes à votre cas : |
| **Read a mesh** (***LIRE_MAILLAGE***). Sélectionnez le maillage forma05c.mmed et le format MED |
| **Modify a mesh** (***MODI_MAILLAGE***). Choisissez le maillage lu précédemment et sélectionnez le reuse. Sélectionnez l'action ORIE_PEAU_2D pour réorienter les normales aux arêtes vers l'extérieur du maillage (groupes d'éléments HAUT, BAS). [Cette étape n'est pas obligatoire ici, mais fortement conseillée de manière générale]  |
| **Assign finite element (`AFFE_MODELE`)**. Choisissez le phénomène mécanique et la modélisation des |



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

| |
|---|
| milieux continus 2D en déformation plane (D_PLAN) |
| Définition et affectation du matériau: **Define a material (DEFI_MATERIAU)** et **Assign a material (AFFE_MATERIAU)** |
| Dans l'onglet **Fracture and Fatigue** : Définition de la fissure **DEFI_FISS_XFEM** avec a=0,1m. Utilisez de préférence le catalogue des fissures (FORM_FISS='DEMI-DROITE') |
| Dans l'onglet **Fracture and Fatigue** : Modification du modèle pour prendre en compte les éléments X-FEM (**MODI_MODELE_XFEM**) |
| Définition des conditions limites et chargements : **Assign mechanical load (AFFE_CHAR_MECA)** :<br>• Blocage des modes rigides (**Enforce DOF** sur HAUT_G et HAUT_D)<br>• Application de la pression sur 'HAUT' et 'BAS) **(PRES_REP)** |
| Résolution du problème élastique : **Static mechanical analysis (MECA_STATIQUE)** |

Afin de séparer le calcul et le post-traitement, vous pouvez ajouter une nouvelle étape (New stage) à votre cas d'étude (Case).

| |
|---|
| Dans l'onglet **Fracture and Fatigue** : Création d'un maillage de visualisation (**POST_MAIL_XFEM**) |
| Dans l'onglet **Finite Element** : Création d'un modèle pour la visualisation (**AFFE_MODELE**) sur le maillage créé pour la visualisation |
| Dans l'onglet **Fracture and Fatigue** : Création d'un champ de résultats sur le maillage de visualisation X-FEM (**POST_CHAM_XFEM**) |
| Pour visualisation avec Paravis :<br>• Calcul du champ de contraintes extrapolé aux noeuds ( CALC_CHAMP, option ' CONTRAINTE ' avec le champ 'SIGM_ NOEU ' )<br>• Calcul du champ de contraintes équivalentes ( CALC_CHAMP, option ' CRITERES ' avec le champ 'S IEQ _NOEU' )<br>Pour cela, on enrichira le concept issu de **POST_CHAM_XFEM** en reprenant le même nom de concept. |
| Impression des résultats au format MED : Results output (IMPR_RESU). |

### 5.1.3 Ajout des étapes de post traitement en mécanique de la rupture

Pour le post-traitement de la rupture vous pouvez également ajouter une nouvelle étape (New stage) à votre cas d'étude en cours.

Pour l'ensemble des étapes suivantes, il faudra aller dans l'onglet **Fracture and Fatigue**.

#### a) Calcul de G avec CALC_G_XFEM

Calculer le taux de restitution d'énergie G avec CALC_G_XFEM (OPTION='CALC_G').

Utiliser le résultat du calcul statique à ne pas confondre avec le résultat créé pour la visualisation avec **POST_CHAM_XFEM** (RESULTAT ).

Compléter les informations sur le champ THETA :

- le fond de fissure FISSURE
- les rayons de la couronne du champ theta ( R_INF , R_SUP ), à définir en fonction du maillage utilisé (la taille des éléments est de 0,02m).

Imprimer les valeurs de la table G ( **IMPR_TABLE** dans l'onglet **Output** ).

#### b) Calcul de K avec CALC_G_XFEM

Calculer également les facteurs d'intensité des contraintes (K1, K2) (OPTION='CALC_K_G').

Idem que précédemment.

Imprimer les résultats dans une nouvelle table.



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

#### c) Calcul de K et G avec POST_K1_K2_K3

Calculer K et G avec POST_K1_K2_K3 :

- utiliser le résultat du MECA_STATIQUE (RESULTAT)
- renseigner la fissure
- renseigner le paramètre ABSC_CURV_MAXI
- imprimer les résultats dans une table.

Comparer les solutions obtenues avec la solution de référence.

### 5.1.4 Pour aller plus loin : Études d'influence des tailles de couronnes

- Sur CALC_G_XFEM : vérifier l'indépendance du résultat au choix des couronnes d'intégration du champ thêta ;
- Sur POST_K1_K2_K3 : étudier l'influence du paramètre ABSC_CURV_MAXI .



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

# 6 Modélisation D : FEM, plaque entière, maillage rayonnant

On utilise un maillage rayonnant autour de la pointe du défaut. La partie rayonnante correspond à un disque de rayon $a/10$ . Ce disque est constitué de 8 couches d'éléments d'épaisseur constante. L'épaisseur d'une couche est donc $h=a/80$ . Des vues du maillage sont données sur les figures ci-dessous. Le maillage utilisé pour le calcul est quadratique, avec des éléments de Barsoum.

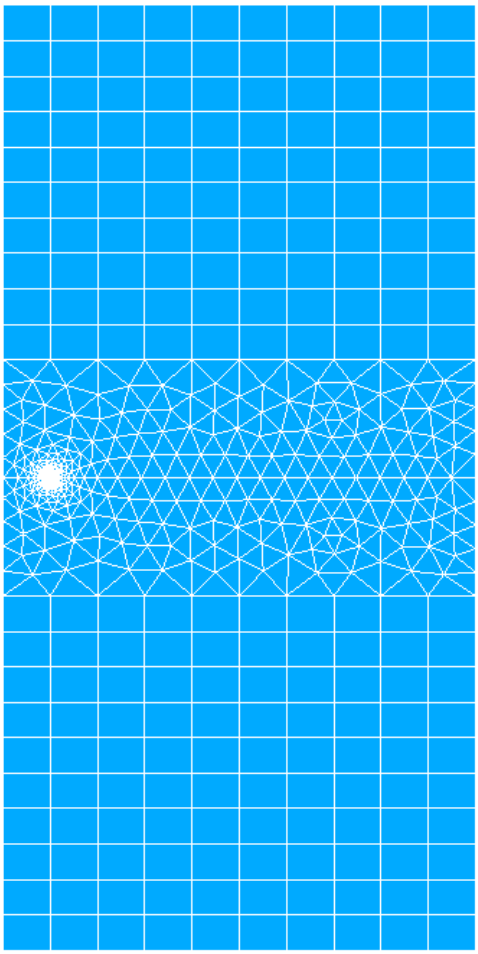


**Figure 6-1 : Vue complète du maillage rayonnant de la plaque**



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

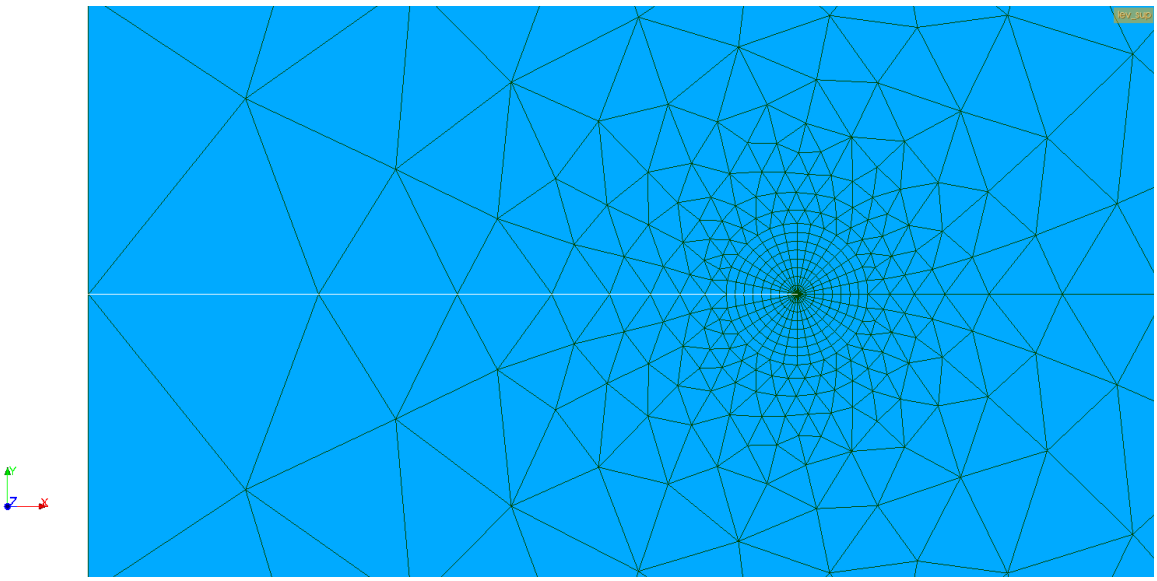


**Figure 6-2 : Zoom sur la fissure**

Les conditions aux limites et le chargement sont identiques à ceux définis dans la modélisation B.

Pour le post-traitement en mécanique de la rupture avec la méthode G-thêta, on utilise une couronne d'intégration telle que $\mathrm{R_INF}=2h$ et $\mathrm{R_SUP}=5h$.

## 6.1 Grandeurs testées et résultats

### 6.1.1 Tests sur G

| Identification | Référence | % tolérance |
|---|---|---|
| $G$ de CALC_G, option G | 191,4 | 0,6% |
| $G_{Irwin}$ de CALC_G, option K | 191,4 | 0,6% |
| $G$ de POST_K1_K2_K | 191,4 | 1,0% |

### 6.1.2 Tests sur KI

| Identification | Référence | % tolérance |
|---|---|---|
| $K_I$ de CALC_G, option K | 6,646 $10^6$ | 0,3% |
| $K_I$ de POST_K1_K2_K | 6,646 $10^6$ | 0,5% |

# 7 Synthèse

Ce TP permet de mettre en évidence :

- Les deux méthodes de calcul des G et K disponibles dans Code_Aster
- L'amélioration de la précision des résultats avec l''utilisation des éléments de Barsoum (FEM)
- La possibilité de simuler une fissure sans la mailler (X-FEM)
- L'invariance des résultats aux choix des couronnes ;



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