

FORMA01 - Travaux pratiques de la formation « Initiation » : modélisation d'une plaque trouée en élasticité linéaire et adaptation de maillage

Résumé :

Ce test 2D en contraintes planes quasi-statique permet une prise en main de la plate-forme Salome-Meca sur un cas simple en élasticité linéaire.

Il s'agit d'une plaque rectangulaire homogène, trouée en son centre, qui est soumise à une traction à ses extrémités.

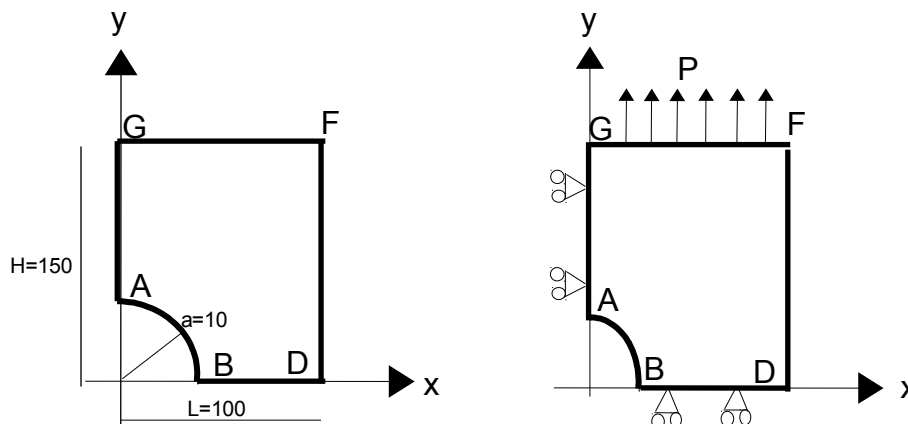
Dans un premier temps (modélisation A), on indique comment construire la géométrie puis le maillage et comment mettre en données l'étude. Dans un second temps (modélisation B et C), on procédera à l'adaptation du maillage. Enfin (modélisation D), on présente une solution alternative utilisant la méthode X-FEM.

Les énoncés des Travaux Pratiques de la formation (TP1) sont inclus dans ce document (voir les modélisations A, B et C).

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

Il s'agit d'une plaque rectangulaire, comportant un trou, modélisée en 2D contraintes planes. On modélise seulement un quart de la plaque grâce aux symétries. Les dimensions sont données en millimètres.



1.2 Conditions aux limites et chargements

Conditions de symétrie :

La plaque est bloquée suivant Ox le long du côté AG et suivant Oy le long du côté BD .

Chargement en contrainte imposée :

Elle est soumise à une traction $P=100 \text{ MPa}$ suivant Oy répartie sur le côté FG .

1.3 Propriétés des matériaux

Les caractéristiques sont :

- Module d'Young $E=200\,000 \text{ MPa}$
- Coefficient de Poisson $\nu=0,3$
- Limite d'élasticité : 200 MPa

2 Solution de référence

2.1 Solution élastique

En élasticité, pour une plaque **infinie**, comportant un trou de diamètre a , soumise à un chargement P selon y à l'infini, la solution analytique en contraintes planes et coordonnées polaires (r, θ) est [bib1] :

$$\sigma_{rr} = \frac{P}{2} \left[\left(1 - \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right) - \left(1 - 4 \left(\frac{a}{r} \right)^2 + 3 \left(\frac{a}{r} \right)^4 \right) \cos 2\theta \right]$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{P}{2} \left[\left(1 + \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right) + \left(1 + 3 \left(\frac{a}{r} \right)^4 \right) \cos 2\theta \right]$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{P}{2} \left[\left(1 + 2 \left(\frac{a}{r} \right)^2 - 3 \left(\frac{a}{r} \right)^4 \right) \sin 2\theta \right]$$

En particulier, au bord du trou ($r = a$) : $\sigma_{\theta\theta} = P[(1 + 2 \cos 2\theta)]$

Et le long de l'axe x : $\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{yy} = \frac{P}{2} \left[\left(1 + \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right) + \left(1 + 3 \left(\frac{a}{r} \right)^4 \right) \right]$

Numériquement, pour $P = 1 \text{ MPa}$, et pour une plaque **infinie**, on a :

Point	Composante	Calcul	MPa
A	SIXX	$\sigma_{\theta\theta}(r=a, \theta=\pi/2)$	-1
B	SIYY	$\sigma_{\theta\theta}(r=a, \theta=0)$	3

Pour une plaque de dimension **finie**, les abaques [bib1] permettent d'obtenir le coefficient de concentration de contraintes, et on trouve que pour une traction de 1 MPa , $SIYY$ maximum vaut environ 3.03 MPa au point B .

2.2 Références bibliographiques

- [1] Analyse limite des structures fissurées et critères de résistance. F. VOLDOIRE : Note EDF/DER/HI/74/95/26 1995
- [2] Stress concentration factors. R.E. PETERSON Ed. J. WILEY p150

3 Modélisation A

3.1 Déroutement du TP

Il s'agit de mener à bien le calcul élastique en générant la géométrie, le maillage et le fichier de commandes AsterStudy à l'aide de la plate-forme Salome-Meca.

La modélisation est C_PLAN élastique. Un quart de la plaque est modélisé. On définira également les commandes nécessaires au dépouillement (tracés de courbes et post-traitements graphiques).

3.1.1 Géométrie

On créera la face plane du quart supérieur droit de la plaque.

Lancer le module Geometry.

Les principales étapes pour construire cette géométrie sont les suivantes :

- Pour définir les contours de la plaque, on peut, par exemple, utiliser l'outil « Sketcher » (Menu `New Entity` → `Basic` → `2D Sketch`). Il est plus simple de commencer par le point B de coordonnées $(10,0)$. En partant de B , pour l'arc de cercle, utiliser `Element Type(Arc)` et `Destination(Direction/Perpendicular)`, et définir le rayon 10 et l'angle et le rayon 90° . On obtient le point A . Puis utiliser `Element Type(Line)` et donner les autres points (G , F , D) par leurs coordonnées absolues. Terminer par `Sketch Closure`.
- On obtient alors un contour fermé (`Sketch_1`) sur lequel on doit construire une face (Menu `New Entity` → `Build` → `Face`). La géométrie de la plaque est alors complète.
- Construire des groupes utiles pour le calcul. Ici on construit les 3 groupes des arêtes sur lesquels s'appuieront les conditions aux limites (symétries et chargement) : gauche pour le bord AG , haut pour le bord GF et bas pour le bord BD . Menu `New Entity` → `Group` → `Create Group` : Sélectionner le type d'entité géométrique (ici la ligne, `edge`) et sélectionner le bord directement dans la fenêtre graphique, ensuite cliquer sur `Add`, un numéro d'objet doit alors apparaître. On peut changer le nom du groupe avant de le valider par `Apply`.

3.1.2 Maillage

On créera un maillage plan du quart supérieur droit de la plaque, en éléments d'ordre 2, pour avoir une précision suffisante.

Lancer le module Mesh.

Les principales étapes pour générer le maillage sont les suivantes :

- Construire le maillage (Menu `Mesh` → `Create Mesh`). Sélectionner la géométrie à mailler `Face_1`, puis choisir `Algorithm` → `NETGEN 1D-2D` en ajoutant `Hypothesis` → `NETGEN 2D Parameters`. Dans cette hypothèse, sélectionner `Fineness` → `Fine` et cocher la case `Second Order` avant de `Apply`.
- Calculer le maillage (Menu `Mesh` → `Compute`). Une fenêtre des informations de maillage doit apparaître, et on obtient alors un maillage libre.
- Créer les groupes de mailles correspondants aux groupes géométriques (Menu `Mesh` → `Create Groups from Geometry`). Sélectionner tous les 3 groupes des arêtes sous module `Geometry` et puis `Apply`. On obtient 3 groupes des arêtes sur le maillage.
- Pour obtenir une meilleure précision, on va faire passer le maillage de linéaire à quadratique, grâce à l'outil « Modification -> Convert to/from quadratic ». Les plus curieux peuvent comparer les différences de résultats entre les deux types d'éléments.
- (Facultatif) Exporter le maillage au format MED : sélectionner `Mesh_1` et cliquer droite, puis choisir `Export / MED file`.

Remarques :

Ce maillage est suffisamment fin (avec des éléments quadratiques) pour avoir une bonne approximation de la solution en élasticité : par exemple si on compare $\sigma_{\theta\theta}$ sur le bord du trou par rapport à la solution analytique, on obtient un écart de moins de 5%.

La géométrie et les paramètres de maillage sont définis dans le fichier *forma01a.datg* associé au test. Le maillage produit est stocké dans le fichier *forma01a.mmed*.

3.2 Création et lancement du cas de calcul (via AsterStudy)

Lancer le module AsterStudy.

Puis en colonne gauche, cliquer sur l'onglet Case View. Dans la case Data Settings, cliquer à droite à CurrentCase et choisir Add Stage. C'est dans Stage_1 où on définit le fichier de commandes du cas de calcul.

Nota : chercher des commandes par Menu Commands → Show All or par les 10 catégories de calcul : Mesh, Model Definition, Material, Functions and Lists, BC and Load, Pre Analysis, Post Processing, Fracture and Fatigue, Output.

Les principales étapes pour la création et le lancement du cas de calcul sont les suivantes :

- Lire le maillage au format MED : Catégorie Mesh / Commande LIRE_MAILLAGE. Le maillage dans le module MESH est disponible dans la liste. Sinon le bouton derrière permet de choisir un maillage dans les répertoires.
- Orienter la normale du bord sur lequel le chargement de traction sera appliqué : Catégorie Mesh / Commande MODI_MAILLAGE / ORIE_PEAU_2D en affectant le groupe haut dans GROUP_MA. On garde le même nom du maillage en utilisant reuse.
- Définir les éléments finis utilisés : Catégorie Model Definition / Commande AFFE_MODELE pour la modélisation en contraintes planes 2D (C_PLAN). Ajouter un terme dans AFFE. Dans ce terme, affecter OUI à TOUT éléments, et choisir le phénomène MECANIQUE, et ajouter le terme de contraintes planes 2D (C_PLAN) dans la modélisation
- Définir le matériau : Catégorie Material / Commande DEFI_MATERIAU . Choisir ELAS et saisir les valeurs du module de Young et du coefficient de Poisson.
- Affecter le matériau : Catégorie Material / Commande AFFE_MATERIAU. Définir au moins une option entre MAILLAGE et MODELE. Ajouter un terme dans AFFE, et affecter le matériau défini à TOUT.
- Affecter les conditions aux limites mécaniques et le chargement : Catégorie BC and Load / Commande AFFE_CHAR_MECA :
 - pour la symétrie sur le quart de plaque : DDL_IMPO. Pour le gauche, DX=0, et pour le bas, DY=0.
 - pour la traction : PRES_REP. Pour le haut, saisir la traction à PRES (donc c'est négatif).
- Résoudre le problème mécanique statique linéaire : Catégorie Analysis / Commande MECA_STATIQUE en donnant le matériau (CHAM_MATER), la modélisation (MODELE), les conditions aux limites et le chargement (EXCIT).
- Calculer le champ : Catégorie Post Processing / Commande CALC_CHAMP en activant reuse (pour garder le même nom de l'objet d'entrée dans la commande). C'est-à-dire qu'on enrichira le concept issu de MECA_STATIQUE en reprenant le même nom.
 - pour le calcul du champ de contraintes : CONTRAINTE / SIGM_ELNO (contraintes par éléments aux nœuds), SIGM_NOEU (contraintes globales aux nœuds).
 - pour le calcul du champ de contraintes équivalentes : CRITERES / SIEQ_ELNO (par éléments aux nœuds), SIEQ_ELGA (par éléments aux points de Gauss), SIEQ_NOEU (globales aux nœuds).
- Imprimer les résultats d'un calcul au format MED : Catégorie Output / Commande IMPR_RESU . Ajouter un terme dans RESU, et choisir les résultats à imprimer. Définir le fichier de sortie (.rmed) par UNITE.

- Pour lancer le cas de calcul, en colonne gauche, cliquer sur l'onglet `History View`. Il faut sauvegarder l'étude d'abord, et sélectionner `CurrentCase`. Ajouter `Stage_1` en sélectionnant `run` (croix en vert). Avant de lancer, vérifier des paramètres de calcul souhaité dans la case `Run Parameters` : temps limite de calcul, mémoire, version de `code_aster` etc.

3.3 Post-traitement des résultats

Pour visualiser les résultats, deux choix sont actuellement disponibles : onglet `Results` dans `AsterStudy`, et le module `ParaVis`.

Choix 1 : Dans l'onglet `Results` dans `AsterStudy` :

On propose les post-traitements suivants :

- Importer le fichier de résultats (`Case Case View` → `Data Files`, cliquer droite sur le fichier de sortie et choisir `Post-process`. Par défaut, la coloration de la plaque par le champ de déplacement `DEPL`, une amplification automatique est appliquée à la déformée de la plaque. Pour visualiser bien la différence entre la forme initiale et la déformée, cliquer droit à la fenêtre et choisir `Show as / Wireframe`.
- Double cliquer le champ souhaité, utiliser le bouton `Probe values on one or more points or cells` (symbole croix) pour vérifier les valeurs aux points A et B.
- (facultatif) aller au module `Paravis`, on trouve l'état actuel de visualisation et aussi toutes les actions historiques.

Choix 2 : Dans le module `ParaVis` :

On propose les post-traitements suivants :

- Importer le fichier de résultats (`Case Case View` → `Data Files`, cliquer droite sur le fichier de sortie et choisir `Open in ParaVis`).
- Télécharger les résultats : Dans l'onglet `Properties` la colonne à gauche, choisir d'abord les champs souhaités pour importer, et cocher l'option `GenerateVectors`, puis appliquer `Apply`.
- Visualiser le maillage initial (passer en représentation `Surface With Edges`).
- Visualiser la déformée de la plaque (`Menu Filters` → `Common` → `Warp By Vector` avec les options `Vectors = results_DEPL_Vector` et `ScaleFactor = 100` avant `Apply`).
- Visualiser le champ de contraintes par éléments aux nœuds ou au points Gauss : sélectionner le résultat importé, puis dans le `Menu Filters` → `Mechanics`, choisir l'option de visualisation souhaitée.

Vérifier la valeur des contraintes au nœud B : si l'on retrouve un rapport 3 entre la contrainte $\sigma_{\theta\theta}$ ($= \sigma_{yy}$) au bord du trou et la force appliquée. Pour visualiser les résultats sur un nœud, activer `Hover points on` (comme la photo ci-dessous), et déplacer la souris au nœud souhaité.



3.4 Grandeurs testées et résultats

Valeur des composantes de contraintes :

Localisation	Identification	Référence (Analytique)	Tolérance
Nœud B	Contrainte S_{YY}	303,0	5,0%
Nœud A	Contrainte S_{XX}	-100,0	15,0%

Ces tests sur des valeurs analytiques sont doublés par des tests de non-régression

4 Modélisation B

4.1 Déroulement du TP

Il s'agit de mettre en œuvre l'adaptation de maillage à la suite d'un calcul élastique. On repartira donc de l'étude réalisée lors de la modélisation A.

4.2 Adaptation de maillage

Après avoir lancé le module `AsterStudy`, on modifie le fichier de commande pour ajouter le calcul de l'indicateur d'erreur :

- Ajouter les résultats d'erreur avec la commande `CALC_ERREUR` dans la catégorie `Post Processing` : choisir l'option `ERME_ELEM` en utilisant `reuse`.
- Relancer le calcul.

Pour visualiser les champs de contrainte et d'erreur (composante `ERREST`, erreur totale), on peut effectuer le post-traitement dans l'onglet `Results` (fortement recommandé) ou dans le module `ParaVis`. Les étapes dans le module `ParaVis` sont comme suivant :

- Cocher les champs à visualiser les charger avant d'appliquer `GenerateVectors` : `SIEF_ELGA`, `ERME_ELEM`
- Pour visualiser la composante `SIYY` du champ `SIEF_ELGA` notamment au bord du trou : Menu `Filters` → `Mechanics` → `ELGA field To Surface` et passer en représentation `Surface With Edges`. Pour relever la position de la valeur maximale (de l'ordre de 270 MPa) : Menu `Edit` → `Find Data` et choisir l'option `Cells` dans le champ crée `ELGAfieldToSurface`, sélectionner `SIEF_ELGA_Vector(1)` représentant `SIYY` et la formule `is max`.
- Visualiser la cartographie de l'indicateur d'erreur (champ `ERME_ELEM`, composante `ERREST`, erreur totale).

On retourne au module `AsterStudy`, on modifie le fichier de commande pour effectuer une adaptation de maillage et calculer ensuite directement la nouvelle valeur d'indicateur d'erreur :

- Catégorie `Post Processing` / commande `MACR_ADAP_MAIL` pour une adaptation de maillage de type `RAFFINEMENT` : on nomme le nouveau maillage par `MAILLAGE_NP1=MAIL2`, sélectionner le critère des éléments (option `CRIT_RAFF_PE`) à 10% pour le paramètre d'adaptation : `RESULTAT_IN / NOM_CHAM=ERME_ELEM / sa composante NOM_CMP = ERREST`.
- Enchaîner ensuite les commandes `AFFE_MODELE`, `AFFE_MATERIAU`, `AFFE_CHAR_MECA`, `MECA_STATIQUE`, `CALC_CHAMP` et `CALC_ERREUR` sur ce nouveau maillage `MAIL2` (Duplicate les commandes en modifiant le maillage et d'autres termes concernants). **Attention** : les noms des concepts de ces commandes ne doivent pas être identiques à ceux d'avant, et ils ne dépassent pas 8 caractères.
- Imprimer les nouveaux résultats de calcul au format `MED` : Commande `IMPR_RESU`.
- Lancer le calcul.

Pour visualiser les champs de contrainte et d'erreur, on peut effectuer le post-traitement dans l'onglet `Results` (fortement recommandé) ou dans le module `ParaVis`.

4.3 Grandeurs testées et résultats

Valeur des composantes de contraintes (`SIGM_NOEU`) avec le maillage initial et après une adaptation :

Maillage	Localisation	Identification	Référence (Analytique)	Tolérance
1	Nœud <i>B</i>	Contrainte <i>SIYY</i>	303,0	5,0%
1	Nœud <i>A</i>	Contrainte <i>SIXX</i>	-100,0	15,0%

2	Nœud <i>B</i>	Contrainte <i>SIYY</i>	303,0	2,0%
2	Nœud <i>A</i>	Contrainte <i>SIXX</i>	-100,0	3,0%

Ces tests sur des valeurs analytiques sont doublés par des tests de non-régression.

5 Modélisation C

5.1 Déroulement du TP

Il s'agit de mettre en œuvre une adaptation de maillage dans une boucle python sur un calcul élastique.

5.2 Adaptation de maillage

Après avoir lancé le module `AsterStudy` et à partir du fichier de commande de la modélisation A, on ajoute une boucle python pour effectuer deux adaptations (Menu `Operations` → `Text mode`). On pourra s'inspirer du fichier `forma01c.comm`.
On lance le calcul.

Après avoir lancé le module `ParaVis`, on effectue le post-traitement suivant :

- Voir l'effet de l'adaptation sur le maximum de la composante `SIYY` du champ de contrainte. Le maximum est maintenant de l'ordre de 280 MPa .
- Visualiser la cartographie de l'indicateur d'erreur (composante `ERREST`, erreur totale).

5.3 Grandeurs testées et résultats

Valeur des composantes de contraintes pour le maillage initial et après une adaptation :

Maillage	Localisation	Identification	Référence (Analytique)	Tolérance
1	Nœud <i>B</i>	Contrainte <i>SIYY</i>	303,0	5,0%
1	Nœud <i>A</i>	Contrainte <i>SIXX</i>	-100,0	15,0%
2	Nœud <i>B</i>	Contrainte <i>SIYY</i>	303,0	2,0%
2	Nœud <i>A</i>	Contrainte <i>SIXX</i>	-100,0	3,0%
3	Nœud <i>B</i>	Contrainte <i>SIYY</i>	303,0	1,0%
3	Nœud <i>A</i>	Contrainte <i>SIXX</i>	-100,0	2,0%

Ces tests sur des valeurs analytiques sont doublés par des tests de non-régression.

6 Modélisation D

6.1 Déroutement du TP

Il s'agit de réaliser la simulation élastique sans mailler le trou, en utilisant la méthode X-FEM. Pour cela, on utilise la notion d'interface (délimitant le trou), une interface étant vue comme une fissure « infinie » (pas de front de fissure). L'interface est alors représentée par une seule Level Set (Level Set Normale), séparant deux solides, sans contact sur l'interface. On modélise ainsi un trou (vide) car le solide à l'intérieur est isolé du reste de la structure sur laquelle le chargement de pression est appliquée.

On générera la géométrie et le maillage et le fichier de commandes AsterStudy à l'aide de la plateforme Salome-Meca.

La modélisation est `C_PLAN` élastique. Un quart de la plaque est modélisé.

6.1.1 Géométrie

La géométrie est le quart supérieur droit de la plaque rectangulaire, sans trou.

Lancer le module `Geometry`.

Les principales étapes pour construire cette géométrie sont les suivantes :

- Pour créer la face, on peut, par exemple, utiliser l'outil « rectangle » (Menu `New Entity / Primitives / Rectangle`), puis éventuellement la translater (Menu `Operations / Transformation / Translation`).
- Construire les groupes des arêtes sur lesquels s'appuieront les conditions aux limites (symétries et chargement) (Menu `New Entity → Group → Create Group`). Sélectionner le type d'entité géométrique (ici la ligne, `edge`) et sélectionner le bord directement dans la fenêtre graphique. Ensuite, cliquer sur `Add` . Un numéro d'objet doit alors apparaître. On peut changer le nom du groupe avant de le valider par `Apply` . Construire ainsi les 3 groupes de bord utiles pour le calcul : `gauche` pour le bord `AG` , `haut` pour le bord `GF` et `bas` pour le bord `BD` .

6.1.2 Maillage

On créera un maillage plan du quart supérieur droit de la plaque, en éléments d'ordre 2, pour avoir une précision suffisante.

Lancer le module `Mesh`.

Les principales étapes pour générer le maillage sont les suivantes :

- Construire le maillage (Menu `Mesh → Create Mesh`). Sélectionner la géométrie à mailler, puis l'algorithme `NETGEN 1D-2D` avec l'hypothèse `NETGEN 2D Parameters` . Dans cette hypothèse, sélectionner `Fineness → Fine` et cocher la case `Second Order` .
- Calculer le maillage (Menu `Mesh → Compute`).
- Créer les groupes de mailles correspondants aux groupes géométriques (Menu `Mesh → Create Groups from Geometry`). Sélectionner tous les groupes géométriques. On obtient 3 groupes d'arêtes sur le maillage.
- Exporter le maillage au format `MED`.

6.2 Création et lancement du cas de calcul (via AsterStudy)

Lancer le module AsterStudy.

Puis en colonne gauche, cliquer sur l'onglet Case View .

On définit le fichier de commandes du cas de calcul.

Nota : Pour ajouter des commandes : Menu Commands → Show All .

Les principales étapes pour la création et le lancement du cas de calcul sont les suivantes :

- Lire le maillage au format MED : Commande `LIRE_MAILLAGE` .
- Orienter le maillage sur le bord affecté par le chargement : Commande `MODI_MAILLAGE / ORIE_PEAU_2D` en utilisant le groupe `haut` .
- Définir les éléments finis utilisés : Commande `AFFE_MODELE` pour la modélisation en contraintes planes 2D (`C_PLAN`) .
- Définir l'interface : `DEFI_FISS_XFEM` avec la forme de fissure (`FORM_FISS / ELLIPSE`) et le type de discontinuité .
- Créer les éléments finis enrichis (`MODI_MODELE_XFEM`) . Et nommer un nouveau nom du modèle X-FEM .
- Définir le matériau : Commande `DEFI_MATERIAU` .
- Affecter le matériau : Commande `AFFE_MATERIAU` sur le modèle X-FEM .
- Affecter les conditions aux limites mécaniques et le chargement : `AFFE_CHAR_MECA` sur le modèle X-FEM :
 - pour la symétrie sur le quart de plaque : `Enforce DOF (DDL_IMPO)`,
 - pour la traction : `FORCE_CONTOUR` .
- Résoudre le problème mécanique statique linéaire : Commande `MECA_STATIQUE` sur le modèle X-FEM .
- Créer le maillage : Commande `POST_MAIL_XFEM` . Et nommer un nouveau nom du maillage .
- Définir les éléments finis utilisés : Commande `AFFE_MODELE` pour la modélisation en contraintes planes 2D (`C_PLAN`) . Et nommer un nouveau nom du modèle .
- Créer le résultat de visualisation : Commande `POST_CHAM_XFEM` . Et nommer un nouveau nom du résultat .
- Calculer le champ : Commande `CALC_CHAMP` .
 - On enrichira le concept issu de `POST_CHAM_XFEM` en reprenant le même nom de concept .
 - pour le calcul du champ de contraintes par éléments aux nœuds : `CONTRAINTE / SIGM_ELNO` .
 - pour le calcul du champ de contraintes équivalentes par éléments aux nœuds : `CRITERES / SIEQ_ELNO` .
 - pour le calcul du champ de contraintes équivalentes par éléments aux points de Gauss : `CRITERES / SIEQ_ELGA` .
- Imprimer les résultats d'un calcul au format MED : Commande `IMPR_RESU` .
- Pour lancer le cas de calcul, en colonne gauche, cliquer sur l'onglet History View .

Remarque :

Les modes rigides du trou sont bloqués par les conditions de symétrie appliquées. Dans le cas d'une modélisation de la plaque entière, il aurait fallu bloquer les modes rigides de la plaque et aussi de ceux du trou.

6.3 Post-traitement des résultats

Lancer le module ParaViS.

On visualisera la déformée de la plaque puis les contraintes au bord du trou en se comparant avec la solution de référence.

- Importer le fichier de résultats (Onglet `Data Files` → `Open in ParaVis` avec l'option `GenerateVectors`).
- Visualiser la déformée de la plaque (Menu `Filters` → `Common` → `Warp By Vector`).

On pourra éventuellement rajouter une étape de raffinement automatique de maillage pour améliorer la précision des résultats.

Remarque :

Les modes rigides du trou sont bloqués par les conditions de symétrie appliquées. Dans le cas d'une modélisation de la plaque entière, il aurait fallu bloquer les modes rigides de la plaque et aussi de ceux du trou.

6.4 Grandeurs testées et résultats

Valeur des composantes de contraintes aux points A et B :

Pour cela, on calcule le champ `SIGM_NOEU`. Attention, la notion de `SIGM_NOEU` est particulière pour X-FEM car les éléments générés pour la visualisation (par `POST_CHAM_XFEM`) ont des nœuds doubles non connectés. On a donc plusieurs valeurs pour une position de nœud. Dans le cas présent, on a deux nœuds localisés au point A (coté plaque) et deux nœuds localisés au point B (coté plaque). On teste donc le min et le max pour chaque point.

Localisation	Identification	Référence (Analytique)	Tolérance
Nœud <i>A</i>	Contrainte <i>S_{XX}</i>	-100,0	5,0%
Nœud <i>B</i>	Contrainte <i>S_{YY}</i>	303,0	5,0%

Ces tests sur des valeurs analytiques sont doublés par des tests de non-régression.

7 Synthèse des résultats

Ce test montre comment mener le calcul d'une structure élastique et comment extraire en post-traitement les grandeurs d'intérêt. Il met également en évidence le bénéfice à utiliser l'adaptation de maillage pour améliorer la précision des résultats.