

TP1 - Travaux pratiques de la formation « Initiation » : modélisation d'une plaque trouée en élasticité linéaire et adaptation de maillage

Résumé :

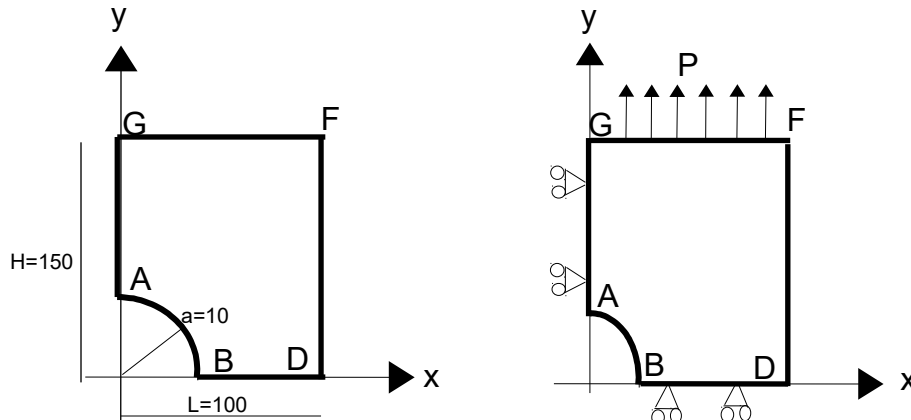
Ce test 2D en contraintes planes quasi-statique permet une prise en main de la plate-forme Salome-Meca sur un cas simple en élasticité linéaire.

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

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 (pour tracer des courbes et post-traitements graphiques).

3.1.1 Géométrie et maillage

On charge le script TP01.py présent dans le dossier de TP, menu File/Load Script. On analyse le maillage Plaque_NETGEN pour vérifier sa qualité et contrôler sa conformité par rapport à la modélisation envisagée :

- **Vérifier la qualité du maillage** Plaque_NETGEN dans le module Mesh :

Pour ce faire on accède aux informations sur le maillage, soit par le menu Mesh/Mesh Information soit par clic droit sur le maillage et Mesh Information.

Nombre d'éléments	Nombre de nœuds	Type d'éléments	Nœuds doubles	Aspect ration maximum

- **Vérifier l'unité du maillage** par Bounding Box dans le menu Measurements

- **Vérifier que tous les groupes nécessaires à l'application des chargements, conditions aux limites et post-traitement sont bien présents et repérer leur noms :**

Groupes pour les conditions aux limites de symétries		Groupe pour le chargement de traction	Groupe pour les post-traitements en A et B
Axe Ox	Axe Oy		

3.1.2 Création et lancement du cas de calcul via AsterStudy

On utilise un assistant de calcul pour initialiser l'étude. On y accède dans le module AsterStudy dans l'onglet Case View via Operation/Add Stage with Assitant ou par clic droit sur le CurrentCase et Add Stage with Assitant.

Assistant de calcul Linear isotropic elasticity :

- Choix du maillage :

On sélectionne le maillage Plaque_NETGEN disponible dans le module Mesh

- Choix de la modélisation :

Question 1 : Quelle modélisation doit-on choisir et pourquoi ?

- Propriété des matériaux :

Question 2 : Quelle unité doit-on utiliser ?

- Définition des conditions aux limites :

Question 3 : Comment appliquer les conditions aux limites de symétrie pour que la modélisation appliquée sur le quart de plaque corresponde au problème complet ?

Question 4 : Tous les mouvements rigides de corps sont-ils bloqués par les conditions aux limites ?

- Application de la traction :

Question 5 : On souhaite appliquer une traction en utilisant l'opérateur imposant une pression. Sachant qu code_aster applique une pression dans le sens opposé à la normal extérieure.

Quelle signe doit avoir notre «pression» imposée pour correspondre à une traction ?

Question 6 : Quelle unité doit-on utiliser ?

- Définition du fichier de sortie des résultats au format MED :

On choisit un fichier de sortie pour le résultat au format MED (par exemple `TP1_resu.rmed`)

Une fois l'assistant de calcul exécuté, une mise en donnée correspondant aux valeurs renseignées est générée. La mise en donnée est un enchaînement de commande que le code exécutera pour réaliser l'étude. Les commandes sont classées en catégorie `Mesh`, `Model Definition`, `Material`, `BC and Load etc...` pour faciliter la lecture de l'étude. L'ordre des commandes est géré automatiquement grâce aux dépendances inter-commandes et aux catégories.

Avant de continuer la suite du TP, sauvegarder votre étude.

Parcours du fichier de commande généré, onglet `Case View`:

Question 1 : Quel concept définit les conditions limites (symétrie) ?

Question 2 : Quel concept définit la traction ?

Question 3 : Quelle commande peut assurer la normal du maillage pour l'application de pression ?

Question 4 : Quelle commande d'analyse est utilisée ?

L'interface graphique AsterStudy possède un outil de vérification graphique d'analyse permettant d'accéder à un résumé des modèles, matériaux, conditions aux limites et chargements utilisés. Cet outil est accessible par clic droit `Analysis Summary` sur la commande d'analyse. Vérifier votre mise en donnée avec cet outil.

Avant de continuer la suite du TP, sauvegarder votre étude.

Enrichissement des résultats en sortie :

Dans cette section, on va enrichir le résultat en utilisant un opérateur de post-traitement permettant de calculer des champs supplémentaires, `CALC_CHAMP` :

- Ajouter une commande `CALC_CHAMP` via la catégorie `Post Processing`.

- On souhaite enrichir un résultat déjà existant. On coche donc `reuse the input object` et on vérifie que le mot-clé `RESULTAT` est bien défini.

- On souhaite calculer les champs de contrainte mot clé `CONTRAINTE` suivant :

- * `SIGM_ELGA` Quel est le support géométrique de ce champ ?

- * `SIGM_ELNO` Quel est le support géométrique de ce champ ?

- * `SIGM_NOEU` Quel est le support géométrique de ce champ ?

- Valider la commande

- Dans la commande `IMPR_RESU`, vérifier que `RESU/RESULTAT` est bien renseigné au résultat issu de `CALC_CHAMP` pour imprimer le résultat avec enrichissement.

Avant de continuer la suite du TP, sauvegarder votre étude.

Exécution du calcul, onglet `History View` :

L'exécution et le suivi de calcul sont réalisés dans l'onglet `History View`. Seul le `CurrentCase` est exécutable les `RunCase_X` sont uniquement des sauvegardes d'exécution qui peuvent être rechargées dans le `CurrentCase`.

- Sélectionner le `CurrentCase`

- Sélectionner l'unique stage à exécuter

- Définition des paramètres de calcul dans les onglets `Basic` et `Advanced` de `Run Parameters`. On utilisera la version stable de `code_aster` en local.

- Exécuter le calcul en cliquant sur `Run`

- Fixer l'`Auto Refresh` à 5 second ou surveiller l'état du calcul manuellement avec le bouton `Refresh`

- Vérifier dans l'onglet `Message` qu'aucune alarme et/ou erreur n'ont été émises.


Avant de continuer la suite du TP, sauvegarder votre étude.

3.1.3 Post-traitements

Pour visualiser les résultats au format `Med`, deux choix sont actuellement disponibles : onglet `Results` dans AsterStudy ou directement dans le module Paravis. On abordera uniquement l'onglet `Results` dans ce TP.

Afin de visualiser les résultats dans l'onglet Results d'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 sur le champ souhaité, utiliser le bouton Probe values on one or more points or cells (symbole croix, ) pour vérifier les valeurs aux points A.


Question : Quel champ de contrainte doit-on regarder ?

- Compléter le tableau ci-dessous :

Localisation	Identification	Référence Analytique	Résultat numérique	Erreur relative Numérique
Nœud <i>B</i>	Contrainte <i>SIYY</i>	303,0		
Nœud <i>A</i>	Contrainte <i>SIXX</i>	-100,0		

On peut aussi réaliser des post-traitements directement lors de l'exécution, par exemple, extraction de résultat sous forme de tableau, courbes etc...

On propose d'extraire *SIGM_NOEU/SIYY* au point B et *SIGM_NOEU/SIXX* au point A dans deux tableaux.

- Ajouter un nouveau stage,
- Extraire le champ au point B avec la commande `POST_RELEVE_T` :
Ouvrir la documentation 
Utiliser `OPERATION= « EXTRACTION »` avec `NOM_CHAM` pour le point B
- Imprimer le tableau au format `TABLEAU` avec la commande `IMPR_TABLE`
On renseignera le mot clé `NOM_PARA = SIYY` pour uniquement imprimer la colonne *SIYY* du tableau
- Exécuter le stage 2 uniquement,
- Ouvrir le tableau et vérifier la valeur.
- Extraire dans un second tableau le champ *SIGM_NOEU/SIXX* au point A.

Avant de continuer la suite du TP, sauvegarder votre étude.

3.1.4 Raffinement de maillages

Compléter le tableau ci-dessous pour le maillage `Plaque_NETGEN` en utilisant l'outil `Mesh Information` dans le module `MESH`

Nombre d'éléments	Nombre de nœuds	Type d'éléments	Nœuds doubles	Aspect ration maximum

Dans AsterStudy, utiliser le maillage `Plaque_NETGEN_Arc_fin` en modifiant la commande `LIRE_MAILLAGE`

Exécuter l'étude complète, stage 1 et stage 2

Localisation	Identification	Référence Analytique	Résultat numérique	Erreur relative Numérique
Nœud <i>B</i>	Contrainte <i>SIYY</i>	303,0		
Nœud <i>A</i>	Contrainte <i>SIXX</i>	-100,0		

Question : Comment la qualité des résultats évolue-t-elle ?

3.1.5 Utilisation d'éléments quadratiques :

On convertit le maillage en éléments quadratiques, soit par le menu `Modification/Convert to/from quadratic` ou par clic droit sur le maillage et `Convert to/from quadratic`.

Nombre d'éléments	Nombre de nœuds	Type d'éléments	Nœuds doubles	Aspect ration maximum

Exécuter l'étude complète, stage 1 et stage 2

Localisation	Identification	Référence Analytique	Résultat numérique	Erreur relative Numérique
Nœud <i>B</i>	Contrainte <i>SIYY</i>	303,0		
Nœud <i>A</i>	Contrainte <i>SIXX</i>	-100,0		

Question : Comment la qualité des résultats évolue-t-elle ?

3.1.6 Pour aller plus loin : Lancement de calcul paramétrique via OpenTurns.


Dans cette section, nous allons faire varier la traction appliquée sur la plaque selon un plan d'expérience déterministe et lancer automatiquement les calculs en série en utilisant le lien entre AsterStudy et OpenTurns.

Pour ce faire on a besoin d'au moins une variable au format `Variable` d'AsterStudy, et une sortie de type tableau au format `Numpy`.

Analyse théorique :

Question : A partir de l'équation analytique, définir l'évolution de `SIGM_NOEU/SIYY` au point *B* en fonction de la traction appliquée afin de comparer avec les résultats numériques.

Modification de l'étude :

- Ajouter deux variables avec `Create Variable` 
 - `Trac = 100`
 - `Pres = -Trac`
- Modifier la commande définissant le chargement de traction :
 - Mot-clé `PRES_REP/PRES` utiliser la variable `Pres` (utiliser le sélecteur de type d'entrée pour basculer entre valeur réelle et variable, à droite du champ texte)
- Changer le type du tableau imprimé et aussi `UNITE` par `IMPR_TABLE` :
 - Mot-clé `FORMAT` au `NUMPY`
- Vérifier que l'étude s'exécute correctement
- Exporter vers OpenTurns
 - Dans `CaseView`, clic droit sur le `Current Case` et `Export to OpenTurns` ou en sélectionnant le `Current Case` par le menu `Opération/Export to OpenTurns`.
- Sélectionner la variable `Trac` et le tableau contenant `SIYY` au point *B* puis exporter vers OpenTurns
- Une fois dans OpenTurns :
 - On définit un plan d'expérience déterministe `Trac` varie entre 100 et 500 en 5 pas :
 - Clic droit sur `Definition` et choisir `Design of experiments`
 - Évaluer le plan d'expérience, clic droit sur le plan d'expérience (`design_0`) et `Evaluate`. On peut alors lancer l'évaluation en chaque jeux de paramètre du plan d'expérience avec le bouton `Run`.
 - Une fois l'exécution terminée, on vérifie dans `Scatter plot` que la pente de la droite, correspond bien à la valeur calculée lors de l'analyse théorique.