FORMA03 - Travaux pratiques de la formation « Utilisation avancée » : charge limite d'une plaque trouée

Résumé :

Ce test 2D en contraintes planes quasi-statique permet d'illustrer sur un cas simple les questions relatives à la modélisation élastoplastique ; il met en évidence les effets de structure, de concentration de contraintes, de charge limite.

Il s'agit d'une plaque rectangulaire homogène, trouée en son centre, constituée d'un matériau élastoplastique avec écrouissage isotrope, dont l'état initial est non contraint, qui est soumise à une traction à ses extrémités. On s'intéresse à la solution élastoplastique en charge.

L'objectif du test est de montrer les possibilités de modélisation, l'utilisation de STAT_NON_LINE et le post-traitement avec SALOME.

La modélisation A correspond au calcul à force imposée en élasticité. Il illustre l'usage de STAT_NON_LINE dans une configuration simplifiée (calcul purement élastique linéaire). Il sert également de référence pour les autres modélisations.

La modélisation B correspond au calcul à force imposée, de référence avec le comportement VMIS_ISOT_TRAC, et illustre l'usage des différents paramètres de STAT_NON_LINE, ainsi que les commandes de dépouillement.

La modélisation C explicite le mode opératoire pour effectuer le calcul jusqu'à la charge limite, en utilisant le pilotage du chargement par un déplacement.

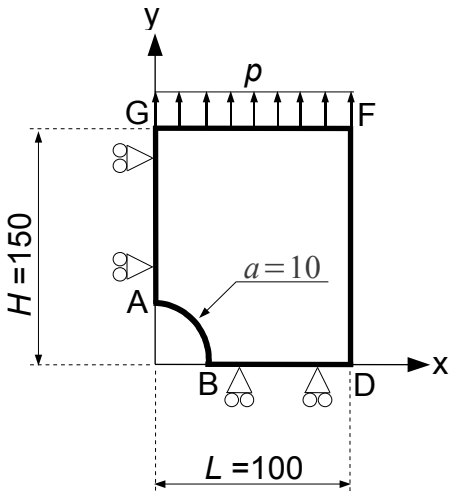
La modélisation D illustre l'identification des paramètres d'un comportement (VMIS_CIN1_CHAB), dont l'écrouissage cinématique est annulé. Le recalage des paramètres se fait sur la courbe de traction utilisée dans la modélisation B. On utilise ensuite ces paramètres pour effectuer un calcul similaire à celui de la modélisation B, avec le comportement VMIS_CIN1_CHAB.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

Il s'agit d'une plaque rectangulaire, comportant un trou, modélisée en $2\mathrm{D}$ 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 suivant Oy répartie sur le côté FG .

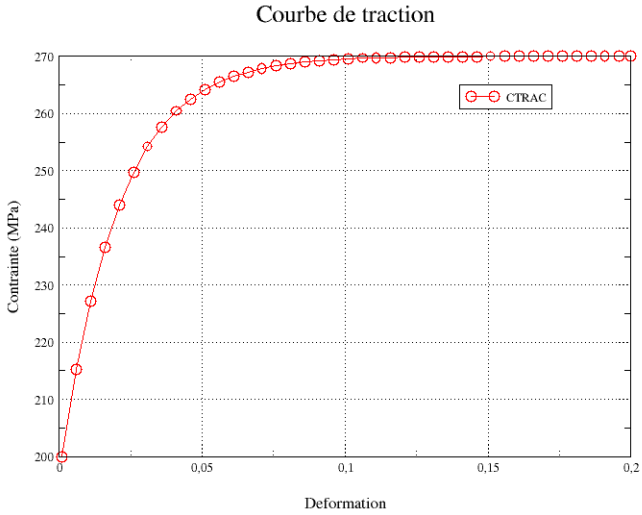
1.3 Propriétés des matériaux

Le comportement est élastoplastique de Von Mises, à écrouissage isotrope.

Les caractéristiques élastiques sont :
•Module d'Young $E=200\,000\,MPa$;
•Coefficient de Poisson $\nu=0.3$;
•Limite d'élasticité : $200\,MPa$;

L'écrouissage est déduit de la courbe de traction définie par les données suivantes (prolongement droit constant `PROL_DROITE='CONSTANT'`) :

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)



Epsilon	Sigma (Mpa)		Epsilon	Sigma (Mpa)
1.00000E-03	2.00000E+02		1.06000E-01	2.69626E+02
6.00000E-03	2.15275E+02		1.11000E-01	2.69709E+02
1.10000E-02	2.27253E+02		1.16000E-01	2.69773E+02
1.60000E-02	2.36630E+02		1.21000E-01	2.69823E+02
2.10000E-02	2.43964E+02		1.26000E-01	2.69862E+02
2.60000E-02	2.49694E+02		1.31000E-01	2.69893E+02
3.10000E-02	2.54168E+02		1.36000E-01	2.69917E+02
3.60000E-02	2.57659E+02		1.41000E-01	2.69935E+02
4.10000E-02	2.60382E+02		1.46000E-01	2.69949E+02
4.60000E-02	2.62506E+02		1.51000E-01	2.69961E+02
5.10000E-02	2.64161E+02		1.56000E-01	2.69969E+02
5.60000E-02	2.65451E+02		1.61000E-01	2.69976E+02
6.10000E-02	2.66457E+02		1.66000E-01	2.69981E+02
6.60000E-02	2.67240E+02		1.71000E-01	2.69986E+02
7.10000E-02	2.67850E+02		1.76000E-01	2.69989E+02
7.60000E-02	2.68325E+02		1.81000E-01	2.69991E+02
8.10000E-02	2.68696E+02		1.86000E-01	2.69993E+02
8.60000E-02	2.68984E+02		1.91000E-01	2.69994E+02
9.10000E-02	2.69209E+02		1.96000E-01	2.69996E+02
9.60000E-02	2.69384E+02		2.00000E-01	2.69996E+02
1.01000E-01	2.69520E+02			

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 :

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

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

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

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

En particulier, au bord du trou ($r=a$), on a :

$$\sigma_{\theta\theta}=p.\left[1+2.\cos(2\theta)\right] \quad (4)$$

Et le long de l'axe x :

$$\sigma_{\theta\theta}=\sigma_{yy}=\frac{P}{2}.\left[\left(1+\left(\frac{a}{r}\right)^2\right)+\left(1+3.\left(\frac{a}{r}\right)^4\right)\right] \quad (5)$$

Numériquement, pour $P=10\,MPa$, et pour une plaque infinie

Point	Composante	MPa
A	$SIGXX$	–10
B	$SIGYY$	30

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 $1\,MPa$, $SIGYY$ maximum vaut environ $30.3\,MPa$ au point B .

2.2 Solution élastoplastique (charge limite)

En élastoplasticité, par une approche statique en contraintes planes, on peut obtenir une borne inférieure de la charge limite pour une bande de largeur $2L$ finie et de longueur infinie, comportant un trou de largeur $2a$ et soumise à une contrainte imposée à l'infini p :

$$p^-_{\lim}=\frac{\sigma_y.(L-a)}{L} \quad (6)$$

Ici on obtient comme borne inférieure de la charge limite : $p^-_{\lim}=0.9\times270=243\,MPa$. (On prend ici $\sigma_y=270\,MPa$, car la charge limite est identique entre un matériau élastoplastique parfait et un matériau dont la courbe de traction présente une asymptote horizontale à $270\,MPa$). Dans ce test (en particulier la modélisation B), on aimerait trouver, par un calcul élastoplastique, une approximation de cette charge limite, sachant que les méthodes analytiques permettent d'en connaître une borne inférieure. Nous prendrons donc la valeur $p^-_{\lim}$ comme référence.

2.3 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 », Peterson R.E., Wiley, 1974.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

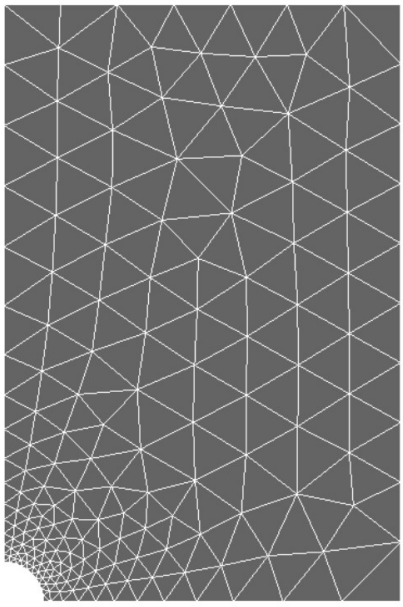
3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

Calcul élastique sur un modèle en contraintes planes (C_PLAN). Le chargement est défini dans le § 2 . On charge jusqu'à $p=10\,MPa$.

3.2 Caractéristiques du maillage

On utilise un maillage qui comporte 315 TRIA6 et 686 nœuds[1].



3.3 Grandeurs testées et résultats

On teste la valeur des composantes de contraintes pour le chargement de 10MPa :

Composante	Type de référence	Valeur	Tolérance
SIGM_NOEU – $SIYY$ en B	ANALYTIQUE	$30\,MPa$	1.00%
SIGM_NOEU – $SIXX$ en A	ANALYTIQUE	$-10\,MPa$	2,00%

1 Maillage obtenu avec la version 7.3.0 de Salome, de légères différences peuvent apparaitre suivant les versions et les machines d'exécution.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

On fait trois calculs sur un modèle en contraintes planes (C_PLAN) :
- Calcul élastique : o n charge jusqu'à $p=10\,MPa$;
- Calcul élasto-plastique : o n charge jusqu'à $p=230\,MPa$;
- Calcul élasto-plastique puis décharge : o n charge jusqu'à $p=230\,MPa$ puis on décharge jusqu'à $p=0$.

4.2 Caractéristiques du maillage

On utilise le même maillage que la modélisation A qui comporte 315 TRIA6 et 686 nœuds.

4.3 Grandeurs testées et résultats

On teste la valeur des composantes de contraintes pour le calcul élastique (chargement de 10MPa), on doit trouver la même chose que dans la modélisation A, soit :

Composante	Type de référence	Valeur	Tolérance
SIGM_NOEU – $SIYY$ en B	AUTRE_ASTER	Identique A	
SIGM_NOEU – $SIXX$ en A	AUTRE_ASTER	Identique A	

On teste la valeur des composantes de contraintes et des variables internes pour le calcul élasto-plastique (à l'instant correspond au chargement de 230MPa) :

Composante	Type de référence	Valeur
SIGM_NOEU – $SIYY$ en B	NON_REGRESSION	$271.642151153\,MPa$
SIGM_NOEU – $SIXX$ en A	NON_REGRESSION	$-213.06249364\,MPa$
VARI _NOEU – $V1$ en B	NON_REGRESSION	0.3251779025
VARI _NOEU – $V2$ en B	NON_REGRESSION	1.0
VARI _NOEU – $V1$ en A	NON_REGRESSION	3.69151195696E−03
VARI _NOEU – $V2$ en A	NON_REGRESSION	1.0

On teste la valeur des composantes de contraintes et des variables internes pour le calcul élasto-plastique avec décharge (à l'instant correspond au déchargement final de 0) :

Composante	Type de référence	Valeur	Tolérance
SIGM_NOEU – $SIYY$ en B	NON_REGRESSION	-271.78	1,00E-006%
SIGM_NOEU – $SIXX$ en A	NON_REGRESSION	23.88	1,00E-006%
VARI _NOEU – $V1$ en B	NON_REGRESSION	0.327	1,00E-006%
VARI _NOEU – $V2$ en B	NON_REGRESSION	1.0	1,00E-006%
VARI _NOEU – $V1$ en A	NON_REGRESSION	3.67e-3	1,00E-006%
VARI _NOEU – $V2$ en A	NON_REGRESSION	0.0	1,00E-006%

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

5 Modélisation C

5.1 Caractéristiques de la modélisation

On fait deux calculs sur un modèle en contraintes planes (C_PLAN) :
- Calcul élasto-plastique : on charge jusqu'à $p=243\,MPa$;
- Calcul élasto-plastique : on fait un calcul par pilotage au-delà de la charge limite ;

5.2 Caractéristiques du maillage

On utilise le même maillage que la modélisation B qui comporte 315 TRIA6 et 686 nœuds.

5.3 Grandeurs testées et résultats

On teste la valeur de la charge limite pour le calcul élastoplastique sans pilotage, par rapport à la solution analytique de la borne minimale et par non-régression :

Composante	Type de référence	Valeur	Tolérance
SIGM_NOEU – $SIYY$ en G	ANALYTIQUE	$243\,MPa$	1.00%

On teste la valeur de la charge limite pour le calcul élastoplastique avec pilotage (déplacement imposé vertical de 6mm au point G), par rapport à la solution analytique de la borne minimale, de la solution sans pilotage et par non-régression :

Composante	Type de référence	Valeur	Tolérance
SIGM_NOEU – $SIYY$ en G	ANALYTIQUE	$243\,MPa$	1.00%
SIGM_NOEU – $SIYY$ en G	AUTRE_ASTER	$243.05\,MPa$	0.30%
ETA_PILOTAGE en INST=6	ANALYTIQUE	$243\,MPa$	1.00%

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

6 Modélisation D

6.1 Caractéristiques de la modélisation

On fait un sur un modèle en contraintes planes (C_PLAN) avec identification des paramètres de la loi VISC_CIN1_CHAB par recalage.

6.2 Caractéristiques du maillage

On utilise le même maillage que la modélisation A qui comporte 315 TRIA6 et 686 nœuds.

6.3 Grandeurs testées et résultats

On teste la valeur des composantes de contraintes pour un chargement $p=66.67\,MPa$:

Composante	Type de référence	Valeur	Tolérance
SIGM_NOEU – $SIYY$ en B	ANALYTIQUE	$200\,MPa$	1.00%
SIGM_NOEU – $SIXX$ en A	ANALYTIQUE	$-66.67\,MPa$	2,00%
SIGM_NOEU – $SIYY$ en G	ANALYTIQUE	$230\,MPa$	0,1%

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

7 Mise en œuvre du TP

7.1 Déroulement du TP

Il s'agit de mener à bien un calcul élasto-plastique en générant la géométrie et le maillage à l'aide de Salomé, et le fichier de commandes Code_Aster à l'aide d'Eficas.
Ce TP permet de :

- Mettre en œuvre un calcul non-linéaire standard dans Code_Aster : gestion du chargement, des matériaux, du comportement et des paramètres de `STAT_NON_LINE` ;
- Comprendre et mettre en œuvre la notion de pilotage ;
- Mettre en œuvre un calcul de recalage des paramètres d'une loi de comportement non-linéaire ;
- Faire des post-traitements « évolués » (en particulier tracer des courbes) ;
- En ce qui concerne le test, le script Python générant la géométrie et le maillage dans Salomé se trouve dans le fichier `datg` associé au test.

7.2 Géométrie

On créera un maillage plan du quart supérieur droit le la plaque, en éléments quadratiques, pour avoir une précision suffisante. Le maillage pourra être construit avec Salomé de façon très simple. On peut par exemple utiliser le `Sketcher` pour définir les contours de la plaque.

Lancer le module `GEOM` de Salomé ;
`New Entity/ 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 `Perpendicular`, et définir l'angle et le rayon. On obtient alors le point A ;
Donner les autres points par leurs coordonnées absolues ;
Terminer par `Sketch Closure` ;
On obtient alors un contour fermé (`Wire1`), sur lequel on doit construire une face (`New Entity/Build/Face`).

La géométrie de la plaque est alors complète. Il faut construire les groupes des arêtes sur lesquels s'appuieront les conditions aux limites (symétries et chargement) :

Sélectionner `New Entity/Groupe/Create` ;
Sélectionner le type d'entité géométrique (ici la ligne, `edge`) et sélectionner le bord directement dans la fenêtre graphique. Ensuite il faut 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 groupes de bord suivants : `gauche` pour le bord AG, `haut` pour le bord GF, `droite` pour le bord FD, `bas` pour le bord DB et `trou` pour l'arc BA.

On peut également créer les groupes s'appuyant sur les sommets, ils seront utiles pour créer des groupes de nœuds (pour le post-traitement ou le pilotage) :

Sélectionner `New Entity/Groupe/Create` ;
Sélectionner le type d'entité géométrique (ici le sommet, `vertex`) et sélectionner le sommet directement dans la fenêtre graphique. Ensuite il faut cliquer sur `Add`. Un numéro d'objet doit alors apparaître. On peut changer le nom du groupe avant de la valider par `Apply` ;

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Construire ainsi les groupes de sommets utiles : les cinq sommets A , B , D , F et G .

7.3 Maillage

Pour effectuer le maillage, on propose d'utiliser Netgen :

Lancer le module MESH de Salomé ;
Mesh / Create Mesh ;
Sélectionner ensuite l'algorithme Netgen $1D-2D$ pour construire le maillage (ne pas oublier de sélectionner votre géométrie) ;
Ajouter l'hypothèse Netgen 2D Parameters ;
Dans cette hypothèse, Il suffit de sélectionner Fineness/Very Fine et cocher la case Second Order ;

On obtient alors un maillage raffiné près du trou avec de grands éléments dans le haut de la plaque. Pour raffiner ce maillage, il faut diminuer Max Size dans les paramètres de Netgen, en choisissant par exemple 10 . Si on veut raffiner autour du trou, il est possible d'utiliser les cartes de taille dans Netgen :

Éditer les paramètres Netgen ;
Sélectionner l'onglet Local sizes ;
Ajouter le groupe trou avec le bouton On Edge . Il suffit alors de modifier la valeur associée. En la diminuant, le maillage sera raffiné sur le trou ;
Ne pas oublier de régénérer le maillage par Mesh/Compute ;

Les groupes sont définis au niveau de la géométrie. On peut les importer dans le maillage par Mesh/Create groups from Geometry ou on utilisera directement les groupes sur la géométrie dans Eficas.

7.4 Post-traitements

Pour un calcul non-linéaire, STAT_NON_LINE sort en standard trois champs (selon les options du mot-clef ARCHIVAGE) :

- Le champ des déplacements aux nœuds DEPL ;
- Le champs des contraintes aux points de Gauss SI EF _ELGA ;
- Le champ des variables internes aux points de Gauss VARI_ELGA ;

Pour le post-traitement, on propose en plus de calculer :

- Le champ des contraintes et des variables internes aux nœuds (respectivement SIGM_NOEU et VARI_NOEU). Il faut utiliser pour cela CALC_CHAMP ;
- Les contraintes équivalentes (Von Mises, Tresca, etc.) aux points de Gauss avec l'option SIEQ_ELGA de CALC_CHAMP ;

On propose ensuite plusieurs post-traitements plus évolués :

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Extraction de la contrainte SIYY en fonction du déplacement vertical DY pour le point G :
Extraire les valeurs du déplacement au point G dans le résultat en utilisant la commande RECU_FONCTION sur le champ DEPL , composante DY ;
Extraire les valeurs de la contrainte au point G dans le résultat en utilisant la commande RECU_FONCTION sur le champ SIGM_NOEU , composante SIYY ;
Imprimer la fonction $SIYY=f(DY)$ (IMPR_FONCTION).

Extraction de la contrainte SIYY sur l'arête inférieure BD :
La commande MACR_LIGN_COUPE permet d'extraire dans une TABLE les composantes d'un champ suivant un chemin donné (mot-clef LIGN_COUPE) . Appliquer la commande sur la composante SIYY du champ SIGM_ELNO , sur le chemin BD ;
Imprimer la table issue de MACR_LIGN_COUPE en filtrant sur le dernier instant et en affichant les colonnes de l'abscisse curviligne ABSC_CURV et de la contrainte SIYY (IMPR_TABLE) ;

Extraction des contraintes sur le bord du trou :
Création d'un chemin avec la commande INTE_MAIL_2D , on s'appuie sur le bord du trou ;
On utilise la commande POST_RELEVE_T : on extrait (OPERATION='EXTRACTION') les contraintes $\sigma_{\theta\theta}$ le long du chemin défini précédemment (mot-clef CHEMIN) en projetant les composantes SIXX , SIYY et SIXY de SIGM_ELNO dans le repère polaire (mot-clef REPERE) ; On produit ainsi une table ;
Extraire $\sigma_{\theta\theta}=f(s)$ avec s l'abscisse curviligne (ABSC_CURV) dans la table précédente à l'aide de RECU_FONCTION ;
En élasticité, on peut comparer cette courbe à la référence analytique (équation 4). On va créer la fonction analytique : Construction la formule (4) à l'aide d'une FORMULE qui dépend de la coordonnée curviligne s : SOLU=F ORMULE(NOM_PARA='S',VALE=' p *(1.+2.*cos(2.*S/R))') avec $p=10\text{MPa}$ et $R=10\text{mm}$; Interpolation de la formulation par la définition d'une liste de réels DEFI_LIST_REEL divisant la coordonnée curviligne de 0 à $s_{\max}=\frac{\pi}{2.R}$ puis utilisation de la commande CALC_FONC_INTERP ;

Extraction de la force résultante en haut de la plaque en fonction du déplacement vertical :
Calcul de l'option FORC_NODA avec CALC_CHAMP ;
Extraire les valeurs du déplacement au point G dans le résultat en utilisant la commande RECU_FONCTION sur le champ DEPL , composante DY ;
Création d 'un chemin avec la commande INTE_MAIL_2D , on s'appuie sur le haut de la plaque ;
On utilise la commande POST_RELEVE_T : on extrait (OPERATION='EXTRACTION') l a résultante des déplacements (mot-clef RESULTANTE) l e long du chemin défini précédemment (mot-clef CHEMIN) ; On produit ainsi une table ;
Extraire $DY=f(t)$ dans la table précédente à l'aide de RECU_FONCTION ;

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Extraction du paramètre de pilotage (modélisation C) :
Extraire les valeurs du coefficient de pilotage dans le résultat en utilisant la commande RECU_FONCTION/ NOM_PARA_RESU sur le paramètre ETA_PILOTAGE ;
Imprimer la fonction $\mathrm{ETA_PILOTAGE}=f(t)$ (IMPR_FONCTION).

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

8 Modélisation A

8.1 Déroulement du TP

Il s'agit de mener à bien le calcul élastique en générant le fichier de commandes Code_Aster à l'aide d'Eficas. La modélisation est C_PLAN. Un quart de la plaque est modélisé. Cette modélisation permet d'effectuer un calcul en élasticité pour p allant jusqu'à $10\,MPa$.

8.2 Calcul élastique

On définira dans le fichier de commandes, à l'aide d'Eficas, lancé dans Salomé :

Lire le maillage au format MED (LIRE_MAILLAGE) ;
Orienter le maillage sur le bord affecté par le chargement de Neumann (MODI_MAILLAGE/ORIE_PEAU_2D) ;
Affecter la modélisation en $2D$ contraintes planes (AFFE_MODELE / C_PLAN) ;
Définir le matériau (DEFI_MATERIAU/ ELAS puis AFFE_MATERIAU) ;
Affecter les conditions aux limites cinématiques (conditions de symétrie sur le quart de plaque par AFFE_CHAR_CINE par exemple) : pour cela dans EFICAS, on peut sélectionner pour chaque mot-clé GROUP_MA une entité géométrique (groupe créé à partir de la géométrie) ;
Affecter le chargement : force répartie (FORCE_CONTOUR) sur le haut de la plaque. Le plus simple est de définir une charge unitaire (FY=1.0) , que l'on multipliera ensuite par une fonction rampe ;
Créer une fonction rampe linéaire variant entre $0.$ et $1000.$ pour appliquer le chargement mécanique (DEFI_FONCTION) ;
Créer la discrétisation temporelle à l'aide de DEFI_LIST_REEL et de DEFI_LIST_INST ;
Utiliser STAT_NON_LINE pour le calcul élastique (COMPORTEMENT/RELATION='ELAS') avec la liste d'instant définie précédemment. Si on indique INST_FIN=10. dans le mot-clef INCREMENT , on aura bien appliqué une force de $10\mathrm{MPa}$.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

9 Modélisation B

9.1 Déroulement du TP

Il s'agit de mener à bien le calcul élasto-plastique avec écrouissage isotrope donné par une courbe de traction telle que la contrainte uniaxiale tende vers une valeur constante ($270\,MPa$).
Il existe donc une charge limite pour cette structure dont une borne inférieure est connue : $p_{\lim} > 243\,MPa$. Dans cette modélisation, on ne charge que jusqu'à 230MPa et on procède à un retour élastique. Le cas de la charge limite sera traité dans la modélisation C.

9.2 Calcul élastoplastique

9.2.1 Mise en données initiales

On définira dans le fichier de commandes, à l'aide d'Eficas, lancé dans Salomé. Le fichier de commande est très semblable à la modélisation A, ci-dessous, en gras, on indique les différences :

Lire le maillage au format MED (LIRE_MAILLAGE) ;
Orienter le maillage sur le bord affecté par le chargement de Neumann (MODI_MAILLAGE/ORIE_PEAU_2D) ;
Affecter la modélisation en $2D$ contraintes planes (AFFE_MODELE/ C_PLAN) ;
Lire la courbe de traction fournie dans le fichier forma03 b .21 (LIRE_FONCTION) ;
Définir le matériau (D EFI_MATERIAU/ ELAS+ TRACTION puis AFFE_MATERIAU) ;
Affecter les conditions aux limites cinématiques (conditions de symétrie sur le quart de plaque par AFFE_CHAR_CINE par exemple) : pour cela dans EFICAS, on peut sélectionner pour chaque mot-clé GROUP_MA une entité géométrique (groupe créé à partir de la géométrie) ;
Affecter le chargement : force répartie (FORCE_CONTOUR) sur le haut de la plaque. Le plus simple est de définir une charge unitaire (FY=1.0) , que l'on multipliera ensuite par une fonction rampe ;
Créer une première fonction rampe RAMPE linéaire variant entre $0.$ et $1000.$ pour appliquer le chargement mécanique (DEFI_FONCTION) ;
Créer la discrétisation temporelle à l'aide de DEFI_LIST_REEL (30 pas de temps) et de DEFI_LIST_INST en activant la découpe automatique du pas de temps : ECHEC=_F(EVENEMENT='ERREUR',ACTION='DECOUPE',) ;
Utiliser STAT_NON_LINE pour le calcul élasto-plastique (COMPORTEMENT/RELATION=' VMIS_ISOT_TRAC ') avec la liste d'instant définie précédemment.

9.2.2 Calculs à réaliser

On propose trois calculs différents :

Calcul élastique :
Si on indique INST_FIN=10. dans le mot-clef INCREMENT de STAT_NON_LINE , en utilisant la FONC_MULT RAMPE dans EXCIT , on aura bien appliqué une force de 10MPa ;
Vérifier qu'on retrouve les mêmes résultats que dans la modélisation A ;

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Calcul élasto-plastique en charge :
Si on indique INST_FIN= 23 0. dans le mot-clef INCREMENT de STAT_NON_LINE , en utilisant la FONC_MULT RAMPE dans EXCIT , on aura bien appliqué une force de 230MPa ;
On doit avoir plastification de la structure car la contrainte résultante dans une partie de la structure est supérieure à la limite élastique (qui vaut 200MPa) ;

Calcul élasto-plastique en charge et décharge :
On définit une nouvelle rampe en forme de chapeau : 1. $F=0.$ pour $t=0$; 2. $F=230.$ pour $t=230.$; 3. $F=0.$ pour $t=300.$;
Définir une nouvelle la liste d'instants en rapport : DEFI_LIST_REEL (30 pas de temps jusqu'à $t=230.$, puis 10 pas de temps jusqu'à $t=300.$) et de DEFI_LIST_INST en activant la découpe automatique du pas de temps : ECHEC=_F(EVENEMENT='ERREUR',ACTION='DECOUPE',) ;
Faites un nouveau calcul (un nouveau STAT_NON_LINE) en prenant INST_FIN= 30 0. dans le mot-clef INCREMENT de STAT_NON_LINE , et en oubliant pas d'utiliser la nouvelle rampe et la nouvelle liste d'instant ;

9.2.3 Analyse des résultats

On pourra utiliser le module VISU de Salomé pour visualiser les champs de déplacements, de contraintes et de variables internes. On pourra ensuite utiliser l'explorateur de résultats (Module Stanley) dans Salomé, pour visualiser d'autres champs (déformations totales EPSI_ELNO par exemple), et pour tracer l'évolution de SIYY le long du segment BD .

Cas élastique

Voici quelques éléments à vérifier :

Vérifier qu'on retrouve les mêmes résultats que dans la modélisation A : déplacements et contraintes ;
Vérifier l'indicateur de plasticité (composante V1 de VARI_ELGA) . Il doit être nul partout, idem pour la déformation plastique cumulée (composante V2) ;
Observer le tableau de convergence : nombre d'itérations de Newton ;
Faites varier la discrétisation temporelle (nombre de pas de temps) ;
Comparer la contrainte $\sigma_{\theta\theta}$ sur le bord du trou et comparer avec la solution analytique (voir § 10) ;

Cas plastique en charge

Avec la discrétisation en 30 pas de temps du chargement et l'activation de la découpe du pas de temps, il n'y aura pas de convergence. L'algorithme de Newton échoue. Pour essayer de faire converger, vous pouvez jouer sur plusieurs paramètres :

Augmenter la discrétisation du chargement (attention à ne pas aller trop loin, moins de 100 pas) pour que le calcul ne soit pas trop long!) ;
Augmenter le nombre d'itérations maximum de Newton qui vaut 10 par défaut (

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

CONVERGENCE/ITER_GLOB_MAXI) ;
Activer la recherche linéaire (RECH_LINEAIRE=_F()) ;
Augmenter le nombre de subdivisions possibles du pas de temps dans la gestion de la non-convergence (DEFI_LIST_INST/ECHEC/SUBD_ NIVEAU) ;
La combinaison de toutes les techniques précédentes ;

Une combinaison qui fonctionne :

Discrétisation du chargement en 50 pas ;
ITER_GLOB_MAXI = 20 ;
RECH_LINEAIRE activée ;
Découpe jusqu'à cinq sous-niveaux (DEFI_LIST_INST/ECHEC/SUBD_ NIVEAU=5) ;

Avec cette combinaison, on obtient la convergence en 358 pas (au lieu des 30 initiaux, à cause des découpes) et plus de 4300 itérations.

On pourra post-traiter de plusieurs manières suivant les propositions du §10 par exemple. Quelques résultats intéressants à observer :

- A l'instant final du calcul, pour le chargement maximum, on peut remarquer sur les isovaleurs de déformation plastique cumulée, la localisation des déformations plastiques (variable interne V1) au voisinage de B. On pourra utiliser la visualisation aux points de Gauss pour visualiser la déformation plastique équivalente cumulée aux lieux où elle est calculée ;
- Pour un chargement inférieur à $66,7\,MPa$, il n'y a pas de plastification ;
- Jusqu'à $230\,MPa$, on est constamment en charge.
- La valeur maximum du critère de Von Mises aux points de Gauss est toujours inférieure ou égale à $270\,Mpa$, ce qui montre que la solution vérifie bien la loi de comportement.

Observons le tableau de convergence à un pas quelconque :

```
 Instant de calcul:  2.297250000000e+02 - Niveau de découpe: 2

-------------------------------------------------------------------------------------------------------------
|     NEWTON     |     RESIDU     |     RESIDU     |  RECH.  LINE.  |  RECH.  LINE.  |     OPTION     |
|    ITERATION   |     RELATIF    |     ABSOLU     |    NB. ITER    |  COEFFICIENT   |   ASSEMBLAGE   |
|                | RESI_GLOB_RELA | RESI_GLOB_MAXI |                |      RHO       |                |
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------
|     0        X | 1.81843E-04  X | 4.64155E-01    |     0          | - SANS OBJET - |TANGENTE        |
|     1        X | 5.17708E-05  X | 1.32145E-01    |     1          | 1.12982E+00    |                |
|     2        X | 2.67685E-05  X | 6.83265E-02    |     1          | 1.46356E+00    |                |
|     3        X | 1.01270E-05  X | 2.58491E-02    |     1          | 1.36817E+00    |                |
|     4        X | 4.14516E-06  X | 1.05805E-02    |     1          | 1.58835E+00    |                |
|     5        X | 2.49245E-06  X | 6.36199E-03    |     1          | 1.46980E+00    |                |
|     6        X | 1.35865E-06  X | 3.46796E-03    |     1          | 1.68851E+00    |                |
|     7          | 8.04731E-07    | 2.05407E-03    |     1          | 1.52519E+00    |                |
```

Nous sommes à l'instant 229.725, on a découpé deux fois la liste initiale et on converge en 8 itérations de Newton. On remarque :

- La recherche linéaire n'a pas été très coûteuse : une itération seulement (par défaut ITER_LINE_MAXI=3). On voit également qu'il n'y a pas de recherche linéaire en prédiction ;
- La convergence est testé e sur le critère RESI_GLOB_RELA . Sans changer les valeurs par défaut de STAT_NON_LINE , on doit donc avoir RESI_GLOB_RELA inférieur à 1.0×10^{-6} pour atteindre la convergence ;

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- La matrice tangente n'est calculée qu'en prédiction, sur plusieurs pas de temps, on voit qu'elle est toujours calculée à la première itération. Ceci correspond bien au réglage par défaut de STAT_NON_LINE : REAC_INCR=1 et REAC_ITER = 0

Il est possible de demander à STAT_NON_LINE d'afficher plus d'informations : suivre la valeur d'un degré de liberté (mot-clef SUIVI_DDL), ou demander à afficher l'endroit où le critère de convergence est le plus mauvais (mot-clef AFFICHAGE/INFO_RESIDU='OUI'). Ce dernier réglage permet, par exemple, de savoir quel endroit de la structure pilote la convergence.
A la fin du transitoire des informations statistiques sont affichées :

```
  Statistiques sur tout le transitoire.
    * Nombre de pas de temps                      : 358
    * Nombre d'itérations de Newton               : 4353
    * Nombre de factorisations de la matrice      : 358
    * Nombre d'intégrations du comportement       : 8715
    * Nombre de résolutions K.U=F                 : 4353

    * Nombre d'itérations de recherche linéaire   : 4004

    Temps CPU consommé dans le transitoire        : 2 m 29 s
dont temps "perdu" dans les découpes   : 55.640 s -> la liste d'instant est efficace à 62.8 %
    * Temps assemblage matrice                    : 0.790 s
    * Temps construction second membre            : 5.690 s
    * Temps total factorisation matrice           : 1.390 s
    * Temps total intégration comportement        : 2 m  4 s
    * Temps total résolution K.U=F                : 3.030 s
    * Temps autres opérations                     : 14.120 s
```

Nous n'allons pas détailler toutes les informations mais faire quelques remarques :

- Pour ce on voit que le poste le plus consommateur est l'intégration de la loi de comportement, bien devant la factorisation et la résolution du système. C'est souvent le cas en 2D, mais c'est surtout lié au fait qu'on utilise une version non complète de Newton. La matrice n'est factorisée qu'une fois par pas de temps (on le voit aussi sur le nombre de factorisations : 358, comme le nombre de pas de temps) ;
- La liste de temps initiale découpé en 5 0 pas de temps n'était pas la plus efficace : le temps perdu dans le calcul à cause des échecs de convergence et donc de la redécoupe du pas de temps est d'environ un tiers du temps total ;

Pour améliorer substantiellement la convergence, il suffit d'activer le Newton complet : NEWTON/REAC_ITER=1 . Sur 50 pas de temps on obtient les résultats suivants :

```
 Statistiques sur tout le transitoire.
    * Nombre de pas de temps                      : 50
    * Nombre d'itérations de Newton               : 152
    * Nombre de factorisations de la matrice      : 152
    * Nombre d'intégrations du comportement       : 202
    * Nombre de résolutions K.U=F                 : 152


  Temps CPU consommé dans le transitoire          : 5.330 s
    * Temps assemblage matrice                    : 0.220 s
    * Temps construction second membre            : 0.520 s
    * Temps total factorisation matrice           : 0.650 s
    * Temps total intégration comportement        : 3.280 s
    * Temps total résolution K.U=F                : 0.110 s
    * Temps autres opérations                     : 0.550 s
```

En plus de l'augmentation de la vitesse de convergence (30 fois plus rapide), on observe aucune découpe du pas de temps. On peut découper encore plus grossièrement la liste d'instants.

Cas plastique en charge puis décharge

Si on reprend la stratégie permettant de mener le calcul jusqu'au bout en plasticité (c'est-à-dire jusqu'à $p=230\,MPa$), en minimisant la découpe temporelle (exercice précédent), on

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

s'aperçoit que cette stratégie doit être améliorée sur la partie décharge plastique car elle ne converge pas avec ces réglages.

On rappelle que la décharge se fait de manière élastique et crée une déformation inélastique lorsque le chargement est nul. Pour que le calcul converge, il est donc nécessaire d'activer la matrice élastique en prédiction (`NEWTON/PREDICTION='ELASTIQUE'`).

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

10 Modélisation C

10.1 Déroulement du TP

Il s'agit de mener à bien le calcul élasto-plastique avec écrouissage isotrope donné par une courbe de traction telle que la contrainte uniaxiale tende vers une valeur constante ($270\,MPa$).

Il existe donc une charge limite pour cette structure dont une borne inférieure est connue : $p_{\lim} > 243\,MPa$. Dans cette modélisation, on va montrer comment mener le calcul au delà de cette charge limite grâce au pilotage.

10.2 Détection de la charge limite

10.2.1 Mise en données

On définira dans le fichier de commandes, à l'aide d'Eficas, lancé dans Salomé. Le fichier de commande est presque identique à la modélisation B. La seule différence est que nous proposons ici d'activer la gestion automatique de la liste d'instants, c'est-à-dire que la discrétisation temporelle est entièrement gérée par STAT_NON_LINE.

Lire le maillage au format MED (LIRE_MAILLAGE) ;
Orienter le maillage sur le bord affecté par le chargement de Neumann (MODI_MAILLAGE/ORIE_PEAU_2D) ;
Affecter la modélisation en $2D$ contraintes planes (AFFE_MODELE/ C_PLAN) ;
Lire la courbe de traction fournie dans le fichier forma03c.21 (LIRE_FONCTION) ;
Définir le matériau (D EFI_MATERIAU/ ELAS+ TRACTION puis AFFE_MATERIAU) ;
Affecter les conditions aux limites cinématiques (conditions de symétrie sur le quart de plaque par AFFE_CHAR_CINE par exemple) : pour cela dans EFICAS, on peut sélectionner pour chaque mot-clé GROUP_MA une entité géométrique (groupe créé à partir de la géométrie) ;
Affecter le chargement : force répartie (FORCE_CONTOUR) sur le haut de la plaque. Le plus simple est de définir une charge unitaire (FY=1.0), que l'on multipliera ensuite par une fonction rampe ;
Créer une fonction rampe RAMPE linéaire variant entre $0.$ et $1000.$ pour appliquer le chargement mécanique (DEFI_FONCTION) ;
Activer la gestion automatique du pas de temps avec DEFI_LIST_INST : DEFAUTO=DEFI_LIST_INST(DEFI_LIST=_F(METHODE='AUTO', VALE=(0., 50., 243), PAS_MINI=1.e-6, PAS_MAXI=100.)) La liste VALE donne les trois instants de passage obligatoire de la liste automatique.
Utiliser STAT_NON_LINE pour le calcul élasto-plastique (COMPORTEMENT/RELATION=' VMIS_ISOT_TRAC ') avec la liste d'instant définie précédemment.

10.2.2 Calculs à réaliser

On propose d'abord de constater « à la main » la charge limite. La charge limite correspond au moment où un point de Gauss atteint la valeur équivalente de Von Mises d'environ $270\mathrm{MPa}$. Par le calcul analytique (voir §4), on a déterminé une borne inférieure du

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

chargement qui provoque une plastification à cette valeur limite de 270MPa (autour du trou).
Pour cela, procéder comme dans la modélisation B mais faites un chargement au delà de $p=230\text{MPa}$. Dans un premier temps, une valeur de $p=245\text{MPa}$ est une bonne référence.

10.2.3 Analyse des résultats

On pourra utiliser le module VISU de Salomé pour visualiser les champs de déplacements, de contraintes et de variables internes. On pourra ensuite utiliser l'explorateur de résultats (Module Stanley) dans Salomé, pour visualiser d'autres champs (déformations totales EPSI_ELNO par exemple), et pour tracer l'évolution de SIYY le long du segment BD .

On voit qu'au delà d'un certain chargement, la matrice tangente devient singulière : c'est le signe qu'on a atteint la charge limite et donc une tangente horizontale sur la courbe de traction. Le code va tenter de découper le pas de temps pour aller au-delà de ce point limite. Par dichotomie (découpe du pas de temps), il va s'approcher de la valeur de chargement limite. Selon les maillages, on trouve que $p_{\lim}\approx 243\text{MPa}$.

La cause de la convergence difficile est bien la proximité de la charge limite. C'est pourquoi il faut subdiviser le pas de temps. On peut s'en rendre compte par la valeur du chargement et par la courbe contrainte-déplacement en haut de la structure : on peut constater que pour $p=240\,MPa$ la charge limite n'est pas complètement atteinte (pas d'asymptote horizontale) mais que l'on s'en rapproche. Les isovaleurs de p montrent une zone de concentration de déformation plastique (assimilable à une ligne de glissement) inclinée de $53°$ environ par rapport à la verticale, allant du point B au bord droit. Ceci correspond assez bien à la théorie qui dit que les lignes de glissement sont inclinées de $54{,}44°$ (voir [bib2]). On a ici bien sûr une approximation de la ligne de glissement qui est en théorie d'épaisseur nulle. On peut aussi relever le déplacement vertical maximum suivant Y du point G . Il est d'environ 5.7mm .

10.3 Calcul de la charge limite par pilotage

La meilleure solution si on souhaite atteindre le chargement limite et même aller au-delà (par la résolution d'un problème élastoplastique incrémental) est d'utiliser le pilotage de la contrainte imposée par le déplacement d'un point. C'est ce qu'on propose ici. On pourra utiliser par exemple le déplacement DY du point G pour piloter la contrainte σ_{yy} imposée sur FG . On l'augmentera jusqu'à $6\,mm$ par exemple (dans le calcul précédent, on a observé que le déplacement maximum suivant Y du point G était d'environ 5.7mm , 6mm est donc bien au-delà de la charge limite). On prendra un coefficient égal à 1. On utilisera donc un temps fictif t tel que $\Delta t=\Delta U_Y(G)\times 1$. Donc le temps varie ici entre 0 et $6\,s$ (pour représenter un déplacement entre 0 et $6\,mm$).

Remarque : en alternative à ce type de calcul, une méthode de calcul de la charge limite est disponible dans Code_Aster (en 3D , axisymétrique et déformation plane): elle utilise un matériau de Norton-Hoff, des éléments quasi-incompressibles et des méthodes directes d'analyse limite fournissant un encadrement de la charge limite (cf. les documents [U2.05.04] et [R7.07.01]).

10.3.1 Mise en données

On définira dans le fichier de commandes, à l'aide d'Eficas, lancé dans Salomé. L e début du fichier de commande est identique à la modélisation B :

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Lecture du maillage au format MED (LIRE_MAILLAGE) ;
Orientez le maillage sur le bord affecté par le chargement de Neumann (MODI_MAILLAGE/ORIE_PEAU_2D) ;
Affectez la modélisation en $2D$ contraintes planes (AFFE_MODELE/ C_PLAN) ;
Lecture de la courbe de traction fournie dans le fichier forma03c.21 (LIRE_FONCTION) ;
Définissez le matériau (DEFI_MATERIAU/ ELAS+ TRACTION puis AFFE_MATERIAU) ;
Affectez les conditions aux limites cinématiques (conditions de symétrie sur le quart de plaque par AFFE_CHAR_CINE par exemple) : pour cela dans EFICAS, on peut sélectionner pour chaque mot-clé GROUP_MA un e entité géométrique (groupe créé à partir de la géométrie) ;
Créez la discrétisation temporelle à l'aide de DEFI_LIST_REEL (10 pas de temps jusqu'à $t=4$) et de DEFI_LIST_INST en activant la découpe automatique du pas de temps : ECHEC=_F(EVENEMENT='ERREUR',ACTION='DECOUPE',) ;
Modifiez le type du chargement (force répartie) : dans STAT_NON_LINE utilisez EXCIT/TYPE_CHARGE=' FIXE_PILO ' pour la force appliquée ;
Activation du pilotage : mot-clef facteur PILOTAGE : •TYPE='DDL_IMPO' ; •COEF_MULT=1.0 ; •GROUP_NO='G' ; •NOM_CMP='DY' ;
Utiliser STAT_NON_LINE pour le calcul élasto-plastique (COMPORTEMENT/RELATION=' VMIS_ISOT_TRAC ').

10.3.2 Analyse des résultats

Observer dans le fichier « message » la valeur du paramètre ETA_PILOTAGE. On obtient en principe une bonne approximation de la charge limite (par valeur supérieure) que l'on pourra comparer à la borne inférieure analytique ($243\ MPa$).

On pourra tracer, en poursuite, la courbe force résultante-déplacement en G en fonction du temps. On devrait retrouver sur cette courbe la valeur de la charge limite donnée par 'ETA_PILOTAGE'.
On peut visualiser avec Salomé, la déformée, les isovaleurs de contraintes $SIYY$ et de la déformation plastique équivalente cumulée. A l'instant 6 , on peut remarquer sur les isovaleurs de déformation plastique cumulée, la localisation des déformations au voisinage de B .

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

11 Modélisation D

Cette modélisation permet d'illustrer le recalage des coefficients matériau, et l'utilisation de ces coefficients pour le calcul de la plaque trouée. Pour ce faire, on utilisera `astk` en mode externe (hors de Salomé) car il faut définir des fichiers autres que les commandes et le maillage. Plus précisément, il s'agit de trouver les paramètres R_∞ et b du comportement `VMIS_CIN1_CHAB` qui suffisent ici pour ne modéliser que l'écrouissage isotrope. On résume ici les principales équations du modèle. La fonction seuil vaut :

$$F(\sigma, R, X) = (\tilde{\sigma} - X)_{eq} - R(p) \tag{7}$$

La fonction d'écrouissage isotrope $R(p)$ est définie par :

$$R(p) = R_\infty + (R_0 - R_\infty) e^{-bp} \tag{8}$$

On définit aussi une loi de normalité (c'est une loi associée) :

$$\dot{\varepsilon}^p = \dot{\lambda} . \frac{\partial F}{\partial \sigma} = \frac{3}{2} . \dot{\lambda} . \frac{\tilde{\sigma} - X}{(\tilde{\sigma} - X)_{eq}} \tag{9}$$

$\tilde{\sigma}$ représente le déviateur des contraintes et $()_{eq}$ la valeur équivalente au sens de von Mises. X est le tenseur d'écrouissage isotrope, il s'écrit :

$$X = \frac{2}{3} . C . \alpha \tag{10}$$

Avec la loi d'évolution :

$$\dot{\alpha} = \dot{\varepsilon}^p - \gamma . \alpha . \dot{p} \tag{11}$$

Le multiplicateur plastique :

$$\dot{p} = \dot{\lambda} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}^p : \dot{\varepsilon}^p} \text{ et } \begin{cases} \text{si } F < 0 \text{ ou } \dot{F} < 0 & \dot{\lambda} = 0 \\ \text{si } F = 0 \text{ et } \dot{F} = 0 & \dot{\lambda} \geq 0 \end{cases} \tag{12}$$

En choisissant $C = 0$, on ne fait pas apparaître d'écrouissage cinématique. On se contentera ici de représenter l' écrouissage isotrope, via la fonction $R(p)$, et de recaler les deux paramètres $Rinf$ et b.

11.1 Déroulement du TP

En ce qui concerne le recalage, deux fichiers de commandes sont à créer : le fichier dit « maître » et le fichier dit « esclave ».

Le fichier dit « maître » (on pourra prendre comme exemple le test `ZZZZ159A`) contient :

La définition des paramètres à recaler, leurs valeurs initiales et leurs bornes ,avec la syntaxe suivante :

```
parametres = [['R_INF__',150.,200.,500.],
              ['b__',11.,10.,100.],]
```

La courbe expérimentale (on prendra la courbe de traction de la modélisation A). Attention à la définition de cette courbe : on utilise des tableaux Numeric Python, sous la forme :

```
experience = [Numeric.array([
                  [ 1.00000E-03 , 2.00000E+02  ],
```


Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

```
                                [ 6.00000E-03 , 2.15275E+02  ],
                                [ 1.10000E-02 , 2.27253E+02  ],
                                [ 1.60000E-02 , 2.36630E+02  ],
                                [ 2.10000E-02 , 2.43964E+02  ],
                                [ 2.60000E-02 , 2.49694E+02  ],
                                [ 3.10000E-02 , 2.54168E+02  ],
                                [ 3.60000E-02 , 2.57659E+02  ],
                                [ 4.10000E-02 , 2.60382E+02  ],
                                [ 4.60000E-02 , 2.62506E+02  ],
                                [ 5.10000E-02 , 2.64161E+02  ],
                                [ 5.60000E-02 , 2.65451E+02  ],
                                [ 6.10000E-02 , 2.66457E+02  ],
                                [ 6.60000E-02 , 2.67240E+02  ],
                                [ 7.10000E-02 , 2.67850E+02  ],
                                [ 7.60000E-02 , 2.68325E+02  ],
                                [ 8.10000E-02 , 2.68696E+02  ],
                                [ 8.60000E-02 , 2.68984E+02  ],
                                [ 9.10000E-02 , 2.69209E+02  ],
                                [ 9.60000E-02 , 2.69384E+02  ],
                                [ 1.01000E-01 , 2.69520E+02  ],
                                [ 1.06000E-01 , 2.69626E+02  ],
                                [ 1.11000E-01 , 2.69709E+02  ],
                                [ 1.16000E-01 , 2.69773E+02  ],
                                [ 1.21000E-01 , 2.69823E+02  ],
                                [ 1.26000E-01 , 2.69862E+02  ],
                                [ 1.31000E-01 , 2.69893E+02  ],
                                [ 1.36000E-01 , 2.69917E+02  ],
                                [ 1.41000E-01 , 2.69935E+02  ],
                                [ 1.46000E-01 , 2.69949E+02  ],
                                [ 1.51000E-01 , 2.69961E+02  ],
                                [ 1.56000E-01 , 2.69969E+02  ],
                                [ 1.61000E-01 , 2.69976E+02  ],
                                [ 1.66000E-01 , 2.69981E+02  ],
                                [ 1.71000E-01 , 2.69986E+02  ],
                                [ 1.76000E-01 , 2.69989E+02  ],
                                [ 1.81000E-01 , 2.69991E+02  ],
                                [ 1.86000E-01 , 2.69993E+02  ],
                                [ 1.91000E-01 , 2.69994E+02  ],
                                [ 1.96000E-01 , 2.69996E+02  ],
                                [ 2.00000E-01 , 2.69996E+02  ],])]
```

Les noms des paramètres de la table résultant du calcul dit « esclave », qui définissent la courbe « numérique » calculée par la simulation :

```
                                calcul = [['RESU1','INST','SIYY'],]
```

L'appel à MACR_RECAL (préciser UNITE_RESU pour informations sur les paramètres et leur sensibilité, et éventuellement GRAPHIQUE, pour visualiser l'écart entre la courbe expérimentale et les différentes courbes numériques évoluant avec les paramètres recalés :

```
RESU=MACR_RECAL(
         UNITE_ESCL       =3,
         UNITE_RESU       =91,
         RESU_EXP         =experience,
         LIST_PARA        =parametres,
         RESU_CALC        =calcul,
         GRAPHIQUE = _F(UNITE=90 ),
);
```

Le fichier dit « esclave » permettant de simuler, pour un jeu de paramètres donnés, l'essai de traction simple avec Code_Aster. Pour ce faire , on pourra utiliser SIMU_POINT_MAT qui

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

permet de simuler un essai à déformation (ou contrainte) imposée sur un point matériel. Il suffit de fournir les paramètres du matériau (ici, CIN1_CHAB), la fonction définissant l'évolution de la déformation imposée en fonction du temps, et les instants de calcul.

Les paramètres à recaler doivent être suffixés par deux « _ » :

```
# paramètres à recaler (les valeurs fournies n'ont pas d'importance pour
le recalage)
                R_INF__    = 200 ;
                b__        = 20.0;

                MA=DEFI_MATERIAU(ELAS=_F(E=200000.0,  NU=0.3,),
                                 CIN1_CHAB=_F(R_0=200.,
                                              R_I=R_INF__,
                                              B=b__,
                                              C_I=0.,    G_0=1.,);
```

La fonction définissant l'évolution de la déformation imposée en fonction du temps peut s'écrire ici simplement :

```
EPSIMP=DEFI_FONCTION(NOM_PARA='INST',VALE=(0.0,0.0, 1.,1.))
```

La liste d'instants de calcul entre 0. et 0.2 :

```
LI1=DEFI_LIST_REEL(DEBUT=0, INTERVALLE=_F(JUSQU_A=0.2,…,))
```

Il reste à faire appel à SIMU_POINT_MAT. Le résultat est une table contenant, pour chaque instant calculé, les 6 composantes des déformations, des contraintes, et des variables internes. C'est pourquoi dans le fichier « maître », le nom de la table RESULTAT est RESU1, et les paramètres sont EPYY, SIYY, ce qui permet de construire une courbe de traction (contrainte en fonction de la déformation totale) :

```
RESU1=SIMU_POINT_MAT(  COMPORTEMENT=_F(RELATION='VMIS_CIN1_CHAB',
                                       ITER_INTE_MAXI=100,),
                       MATER=MATER,
                       INCREMENT=_F(LIST_INST=LI1,),
                       NEWTON=_F(REAC_ITER=1,),
                       EPSI_IMPOSE=_F(EPYY=EPSIMP,),);
```

Avant de lancer l'optimisation, il est utile de **vérifier que ce calcul fonctionne seul** . Lancer l'optimisation, en associant à ce fichier esclave l'unité 3. (le calcul peut prendre 100s à 200s). Observer la convergence et les valeurs des paramètres dans le fichier 91. On effectuera ensuite le calcul de la plaque trouée, comme pour la modélisation A, avec le comportement VMIS_CIN1_CHAB , et les p aramètres recalés. On pourra vérifier que l'on obtient des résultats similaires à ceux de la modélisation A.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

12 Synthèse des résultats

Ce test permet de montrer comment mener le calcul d'une structure élasto-plastique et son dépouillement, et en particulier de mettre en évidence le bénéfice à utiliser le pilotage pour un problème de charge limite. On peut retenir de ce test quelques idées :

- Même en dehors d'un comportement élasto-plastique parfait, il peut exister une charge limite. C'est le cas avec toutes les courbes de traction réelles. Il faut alors adapter la méthode de résolution à la solution mécanique et par exemple utiliser le pilotage ;
- Le découpage en petits incréments de charge est souvent nécessaire pour intégrer correctement la relation de comportement. Cela peut aider aussi à la convergence, il est donc conseillé d'utiliser le redécoupage automatique du pas de temps ;
- La recherche linéaire peut être utilisée pour aider à la convergence, ainsi que la subdivision automatique des pas de temps. En cas de décharge, la prédiction élastique est une solution efficace.

Copyright 2015 EDF R&D - Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)