

SSNP131 - Identification du paramètre énergétique G_p en 2D et en 3D

Résumé

Ce test de mécanique quasi-statique non linéaire permet de présenter le calcul du paramètre G_p issu de l'approche énergétique de la rupture élastoplastique et l'identification des valeurs critiques correspondant à des valeurs de ténacité expérimentale données. Il nécessite de représenter la fissure par une entaille et de mailler finement le voisinage du fond d'entaille. Il nécessite également de calculer l'énergie élastique sur la zone de propagation virtuelle de l'entaille, découpée en « copeaux ».

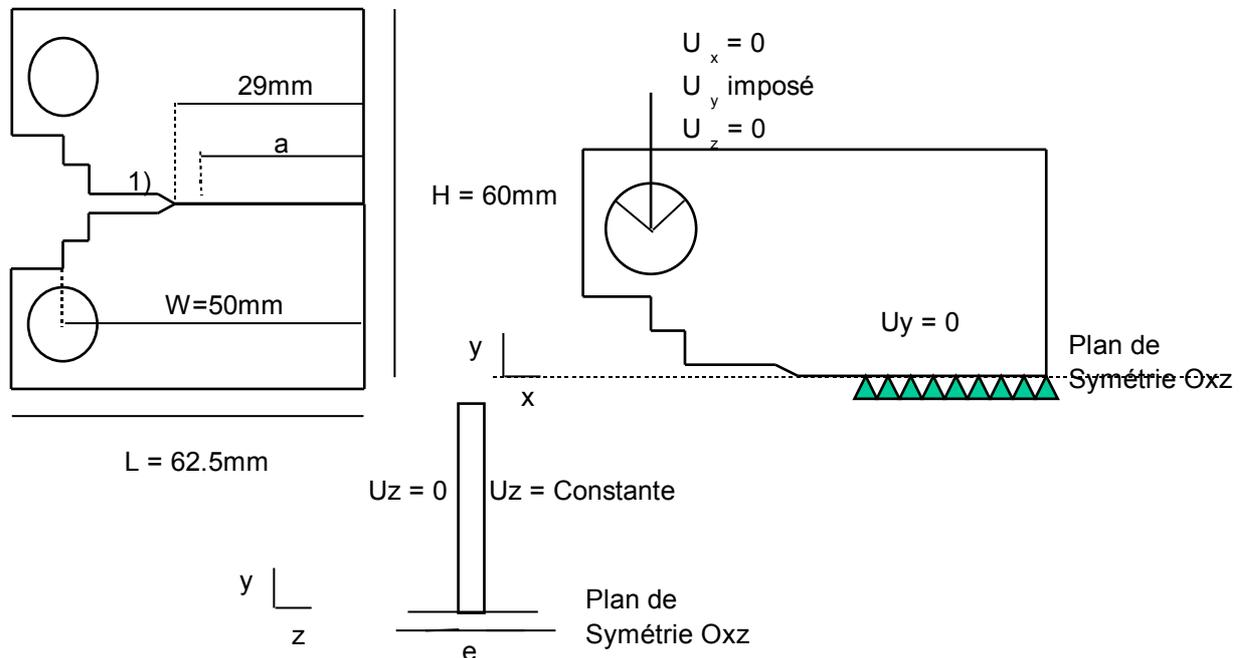
La modélisation A est réalisée avec des éléments 2D quadratiques, en déformation plane. Le maillage représente les zones dites copeaux ; le calcul du paramètre est effectué en utilisant les propriétés du maillage (POST_GP et CALC_GP) ou par création automatique de ces zones (CALC_GP).

La modélisation B est identique à la modélisation A, mais utilise un maillage quelconque ; seule la définition automatique des copeaux est utilisés (CALC_GP)

La modélisation C est réalisée avec des éléments 3D quadratiques et teste la phase de prédiction (on vérifie que la valeur de G_p est bien identique en 2D et 3D).

1 Problème de référence

1.1 Géométrie



On considère une éprouvette *CT25* avec une longueur de ligament : $a = 27.5 \text{ mm}$ ($a/W = 0.55$).
 Suivant l'axe z , l'épaisseur est $e = 1 \text{ mm}$. L'éprouvette *CT25* est modélisée tout d'abord en déformations planes, puis en 3D. Par raison de symétrie, une moitié de celle-ci est représentée en 2D et un quart en 3D.

1.2 Propriétés de matériaux

Module d'Young : 214100 *Mpa*

Coefficient de Poisson : $\nu = 0.3$. La courbe de traction utilisée est présentée dans le tableau suivant :

ϵ	σ (MPa)
0.003439678	740.6632663
0.004628373	842.148772
0.00607988	876.3117064
0.007654628	895.2063119
0.010417548	911.0718694
0.014178015	925.022448
0.017543214	935.2135771
0.021942493	945.6948965
0.027416704	960.732311
0.033866984	975.8041996
0.040205805	988.2450325
0.046616375	1000.143035
0.052903597	1010.004051
0.058235889	1017.5664

Tableau 1.1

1.3 Conditions aux limites et chargements

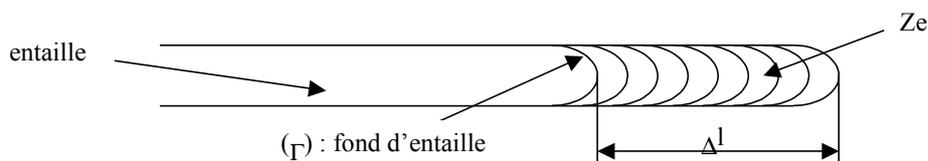
En 2D , le chargement est de type déplacement imposé en un point situé au centre de la goupille qui est modélisée par quatre secteurs angulaires indéformables. La moitié de l'éprouvette étant modélisée, une condition de symétrie est appliquée sur le ligament ($y=0$).

En 3D , le chargement est de type déplacement imposé sur les segments situés sur l'axe de la goupille qui est modélisée par quatre secteurs angulaires indéformables. Le quart de l'éprouvette étant modélisé, une condition de symétrie est appliquée sur la face correspondant au ligament ($y=0$), et une autre sur la face $z=0$.

2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul utilisée pour la solution de référence en 2D

On utilise la méthode énergétique de la rupture élastoplastique basée sur le paramètre G_p [1], [2]. Le fond d'entaille est formé d'un demi-cercle de rayon R . La zone Z_e de longueur Δl correspond à la propagation virtuelle de l'entaille et est découpée en « copeaux ».



On y détermine à chaque instant l'évolution de la quantité $G_p(\Delta l)$ définie par :

$$G_p(\Delta l) = 2[W_{elas}(\Delta l)]/\Delta l$$

où $W_{elas}(\Delta l)$ est l'énergie élastique calculée sur la zone Z_e . On doit ensuite calculer le maximum de cette quantité par rapport à Δl , que l'on appelle « G_p ».

$$G_p = \underset{\Delta l}{Max}\{G_p(\Delta l)\}$$

L'instant critique où s'amorcera la propagation du défaut est alors celui où la ténacité $K_j = K_{j,crit}$. On dit alors que G_p atteint la valeur critique « G_{pc} ».

2.2 Méthode de calcul utilisée pour la solution de référence en 3D

Le fond d'entaille est rectiligne. Le front correspondant est décrit par des tranches. Chaque tranche est constituée de copeaux. Cette zone correspond à la propagation virtuelle de l'entaille.

On détermine dans chaque copeau à chaque instant l'évolution de la quantité $G_p(\Delta S)$ définie par :

$$G_p(\Delta S) = 2[W_{elas}(\Delta S)]/\Delta S$$

où $W_{elas}(\Delta S)$ est l'énergie élastique calculée sur la zone cumulée de copeau selon une tranche et ΔS est la surface des copeaux cumulée du fond d'entaille au copeau concerné. Puis on calcule sur chaque tranche le maximum de cette quantité appelée « G_p » par rapport à ΔS .

$$(G_p)_{tranche_i} = \underset{\Delta S}{Max}\{G_p(\Delta S)\}$$

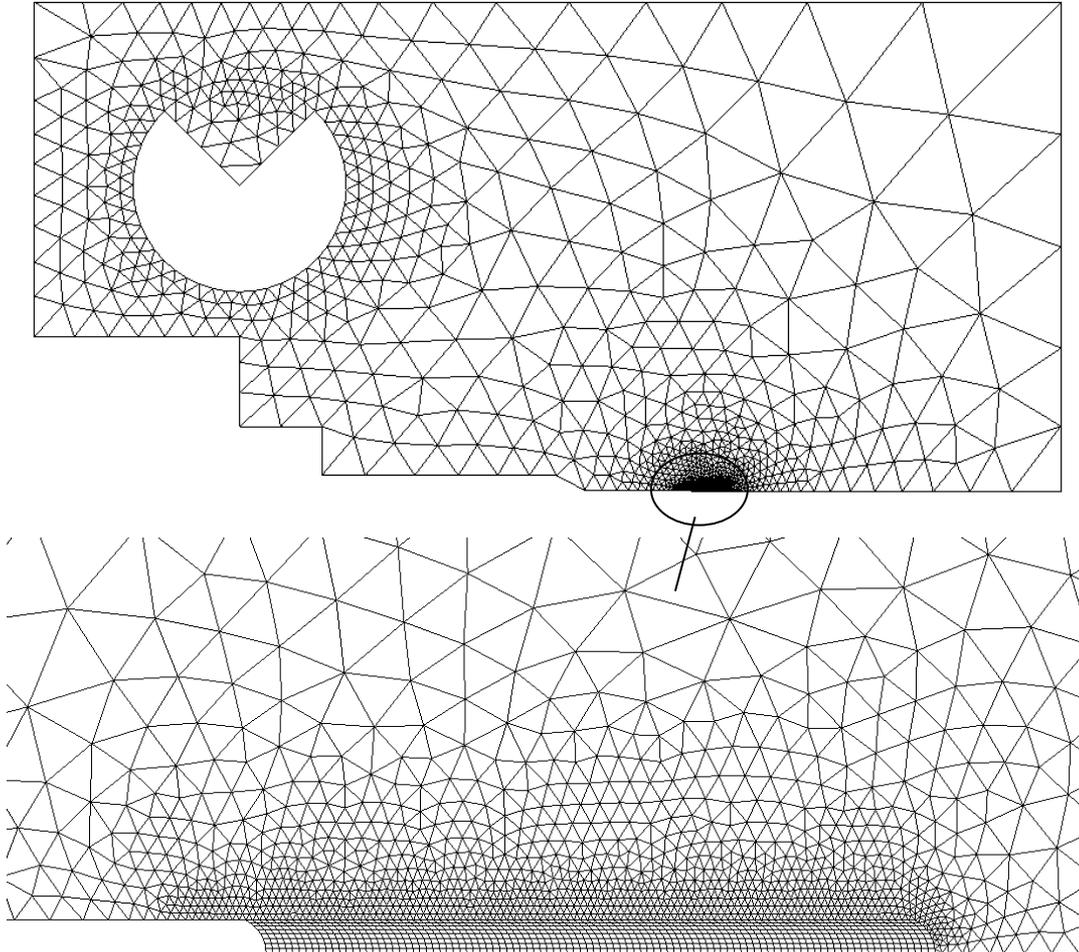
A chaque copeau, est associée une distance ΔL qui correspond à la distance intérieure du copeau au fond d'entaille.

2.3 Références bibliographiques

- 1) WADIER Y. : « Présentation succincte de l'approche énergétique de la rupture élastoplastique appliquée à la rupture par clivage », Note EDF R&D HT-64/03/001/A, janvier 2003.
- 2) WADIER Y., LORENTZ E. : « Mécanique de la rupture en présence de plasticité : modélisation de la fissure par une entaille ». C.R.A.S. t. 332, série IIb, 2004.

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation



La fissure est modélisée par une entaille de rayon 100 microns. La zone Z_e de 2 mm de longueur est divisée en couches d'éléments de 20 microns d'épaisseur (appelés aussi « copeaux »).

3.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de noeuds : 9368

Nombre de mailles et types : 3350 TRIA6, 800 QUAD8

3.3 Grandeurs testées et résultats

3.3.1 Valeurs testées

Avec l'opérateur `CALC_GP` et définition des copeaux par le maillage :

Identification	Référence Aster	Tolérance (%)
G_p à l'instant 4 au copeau 8	0.023662413	0.010
G_p à l'instant 40 au copeau 3	0.727738207	0.010

Avec l'opérateur `CALC_GP` et définition automatique des copeaux

Identification	Référence Aster	Tolérance (%)
G_p à l'instant 4 au copeau 8	0.0234148559	0.010
G_p à l'instant 40 au copeau 3	0.674949376	0.010

Avec l'opérateur POST_GP

Identification	Référence Aster	Tolérance (%)
G_{PC} tel que $K_j(t) = K_j c_1$	0.678875	0.010
G_{PC} tel que $K_j(t) = K_j c_2$	0.812359	0.010
G_{PC} tel que $K_j(t) = K_j c_3$	0.929797	0.010

3.3.2 Remarque

Les résultats observés pour s'assurer de la non-régression du code sont les valeurs critiques du paramètre énergétique correspondant aux valeurs de ténacités critiques suivantes : $K_j c_1 = 27,2 \text{ MPa}\sqrt{m}$; $K_j c_2 = 34 \text{ MPa}\sqrt{m}$; $K_j c_3 = 40 \text{ MPa}\sqrt{m}$.

A ces valeurs correspondent des chargements critiques identifiés en calculant la quantité G par la méthode Théta qui est reliée à la ténacité via la formule d'Irwin : $G = \frac{1-\nu^2}{E} K^2$. Les couronnes choisies pour le champ Théta sont : $[0.25 \text{ mm}; 0.5 \text{ mm}]$, $[0.5 \text{ mm}; 1.0 \text{ mm}]$, $[1.0 \text{ mm}; 2.0 \text{ mm}]$, $[2.0 \text{ mm}; 5.0 \text{ mm}]$, $[5.0 \text{ mm}; 10.0 \text{ mm}]$. A ces chargements critiques correspondent les valeurs critiques du paramètre G_p dont les valeurs sont testées au §3.3.1.

La macro-commande POST_GP produit deux types de table :

- 1) Une table sous le concept produit de la macro-commande contenant pour chaque instant de calcul :
 2. module d'Young et coefficient de Poisson à la température de calcul,
 3. G et K_j déduit par Irwin pour chaque couronne i de calcul (G_i, K_i)
 4. G et K_j moyen (G_{MOY}, K_{MOY})
 5. l'indice de copeau où G_p est maximum (ICOPMAX)
 6. la distance par rapport au fond d'entaille où G_p est maximum (DELTALMAX)
 7. la valeur du G_p maximum (GPMAX)
- 2) Une table contenant le résultat de l'identification (mot-clé TABL_GPMAX) pour chaque ténacité critique :
 8. La ténacité critique $K_j c_i$,
 9. L'instant de calcul interpolé dans la table précédente où $K_j = K_j c_i$,
 10. Le G_p critique, G_{pc} , à l'instant de calcul interpolé (GP_CRIT),
 11. La quantité $K_{Gp \text{ max}}$ déduite par la relation d'Irwin (KGP_CRIT),
 12. La distance au fond d'entaille où $G_p = G_{pc}$ (DELTA_CRIT)

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

Cette modélisation est bidimensionnelle, en déformations planes. On utilise un maillage initial de CT. La fissure y est modélisée par une entaille de rayon 100 microns, avec un maillage moyennement fin. Le maillage initial comporte 2937 nœuds et 1377 éléments. Il est visible sur les Figure 4.1 et 4.2.

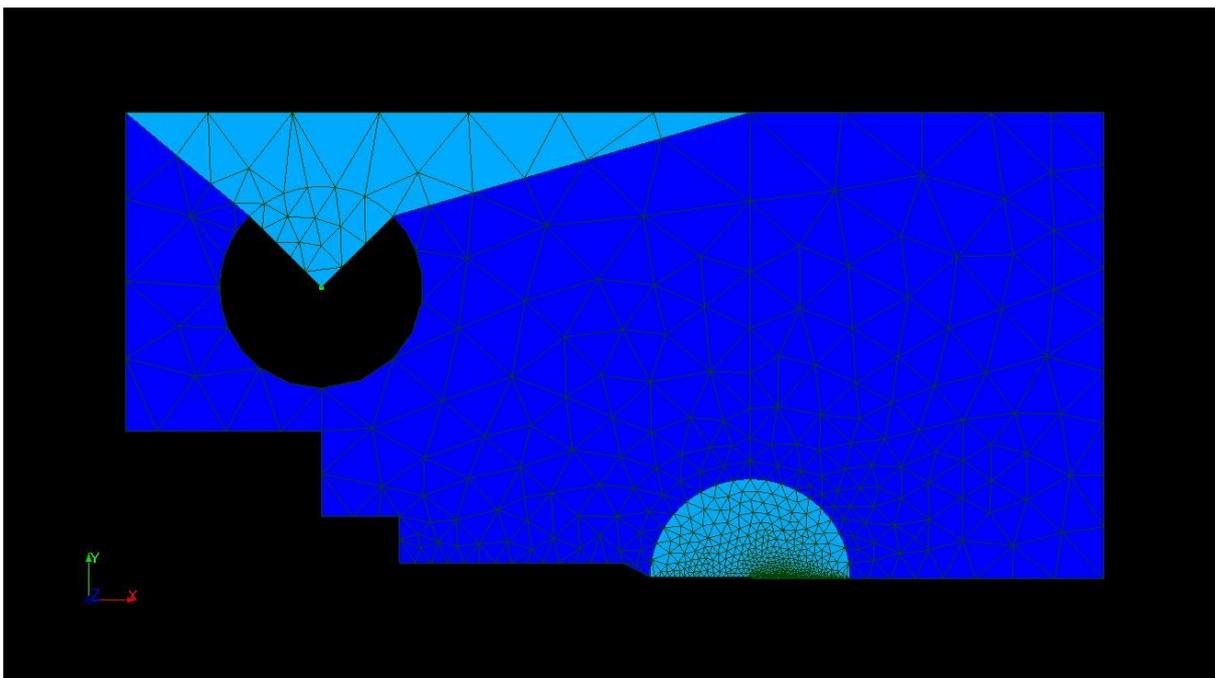


Figure 4.1 : Vue d'ensemble du maillage initial.

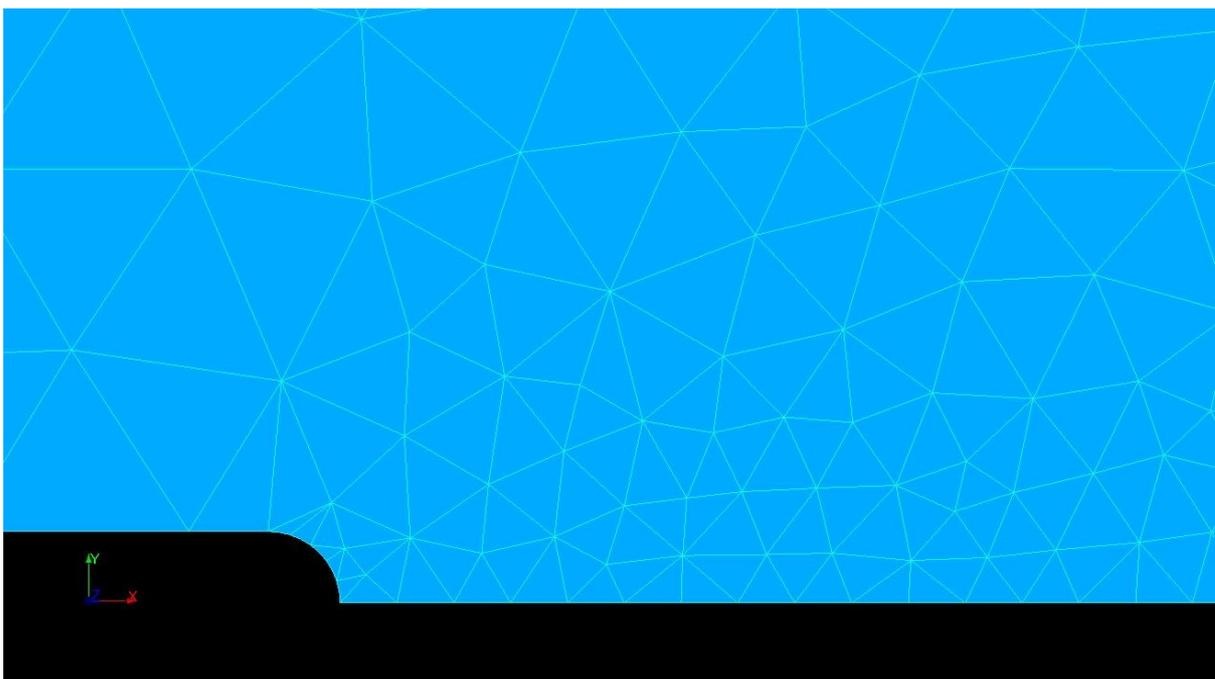


Figure 4.2 : Zoom sur l'entaille du maillage initial.

Le maillage est ensuite raffiné avec la commande RAFF_GP sur une zone de 10 copeaux de 20 microns (soit sur 0,2mm). La Figure présente le maillage finalement obtenu, comportant 4920 nœuds pour 1377 éléments.

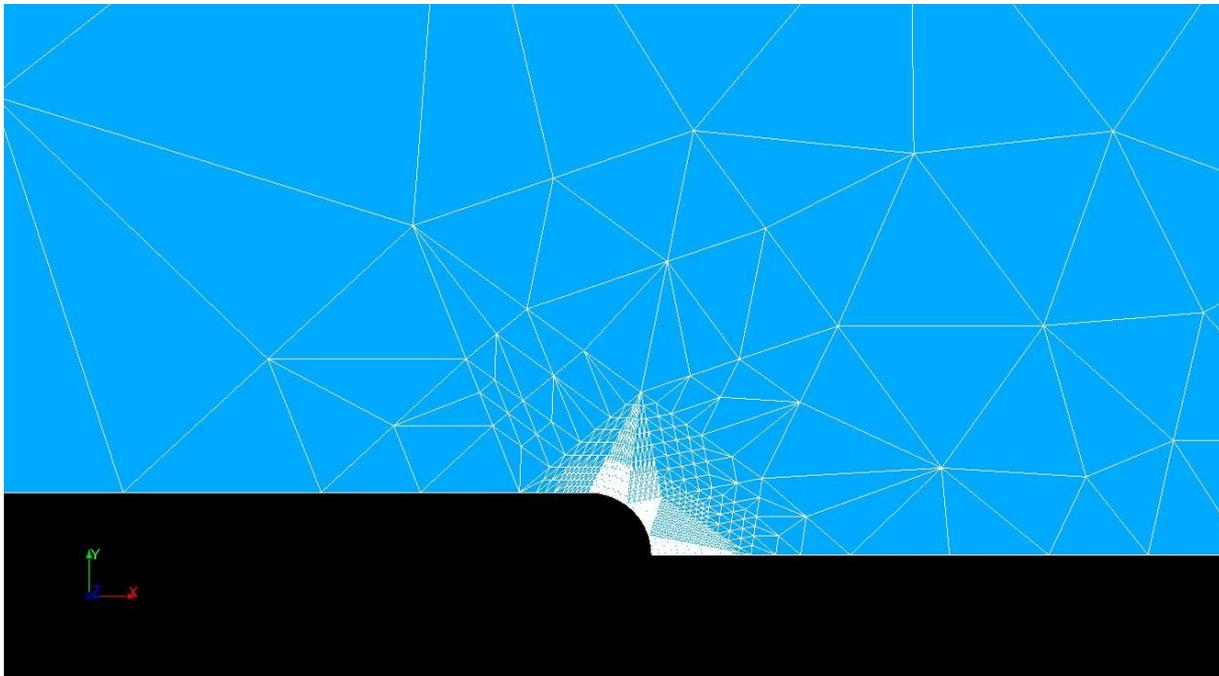


Figure 4.3 : Zoom sur l'entaille du maillage raffiné.

4.2 Grandeurs testées et résultats

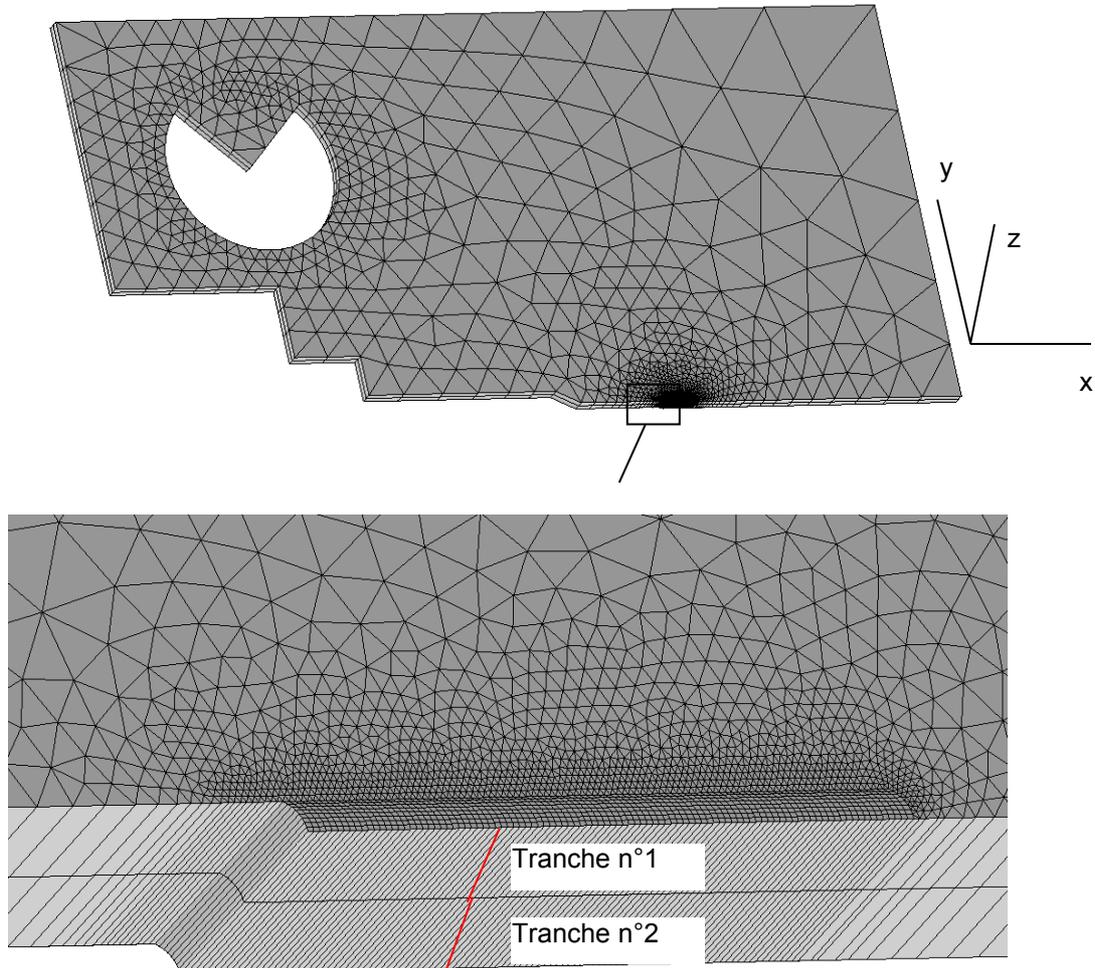
Avec l'opérateur CALC_GP et définition automatique des copeaux par le maillage :

Identification	Référence Aster	Tolérance (%)
G_p à l'instant 40 au copeau 3	0.7171792604019	0.010

Les différences remarquées entre les différentes possibilités de calcul, bien qu'assez faibles, sont dues à la géométrie différente des zones de calcul et à la singularité créée en utilisant la géométrie du maillage de la modélisation A.

5 Modélisation C

5.1 Caractéristiques de la modélisation



La fissure est modélisée par une entaille de rayon 100 microns. La zone Z_e de 2 mm de longueur et 1 mm de largeur est divisée en couches d'éléments de 20 microns d'épaisseur, et de 0,5 mm de largeur. Ces couches sont appelées « copeaux ». Par ailleurs, la zone Z_e est divisée en « tranches » suivant l'axe z .

5.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de noeuds : 33322

Nombre de mailles et types : 3544 SEG2, 10050 TRIA6, 4760 QUAD8, 1600 HEXA20 et 6700 PENTA15

5.3 Grandeurs testées et résultats

5.3.1 Valeurs testées

Ici, on ne va pas tester le mot clé « IDENTIFICATION » mais le mot-clé « PREDICTION ». On se sert de la valeur de G_{PC} tel que $K_j(t) = K_j c_1$ déterminée en 2D pour la prédiction. Le calcul n'est mené que jusqu'à l'instant δs pour ne pas augmenter inutilement la durée du calcul. A ce niveau de

chargement, les grandeurs critiques ne sont pas atteintes, la rupture ne doit pas être annoncée, donc la prédiction doit être à 0.

On teste également la valeur de G_p à cet instant par référence à la valeur déterminée en 2D .

Grandeur testée	Référence Aster 2D	Tolérance (%)
G_p pour INST=8s	2.36E-001	0.010
PREDICTION	0 (inférieure au G_{PC})	1.00E-008

5.3.2 Remarque

On note que dans ce cas-test la loi de comportement dans CALC_G (ELAS_VMIS_TRAC) diffère de la loi de comportement de STAT_NON_LINE (VMIS_ISOT_TRAC). Ceci est dû au fait que l'on veut calculer G en supposant que le chargement est monotone proportionnel. L'utilisation de la loi VMIS_ISOT_TRAC dans CALC_G aurait conduit à calculer le paramètre GTP (voir la documentation U2.82.03).

Les résultats obtenus en 3D sont très proches de la modélisation 2D en déformations planes. Cela permet de valider le fonctionnement de la macro-commande POST_GP en 3D .

6 Synthèse des résultats

Dans les deux cas (2D et 3D), les tests sont validés avec un écart inférieur à 2e-04%.
On note de plus une grande cohérence des résultats 2D et 3D .