



Matériaux et structures composites

Modélisation des composites stratifiés – TP3

Guillaume Couégnat

couegnat@lcts.u-bordeaux.fr

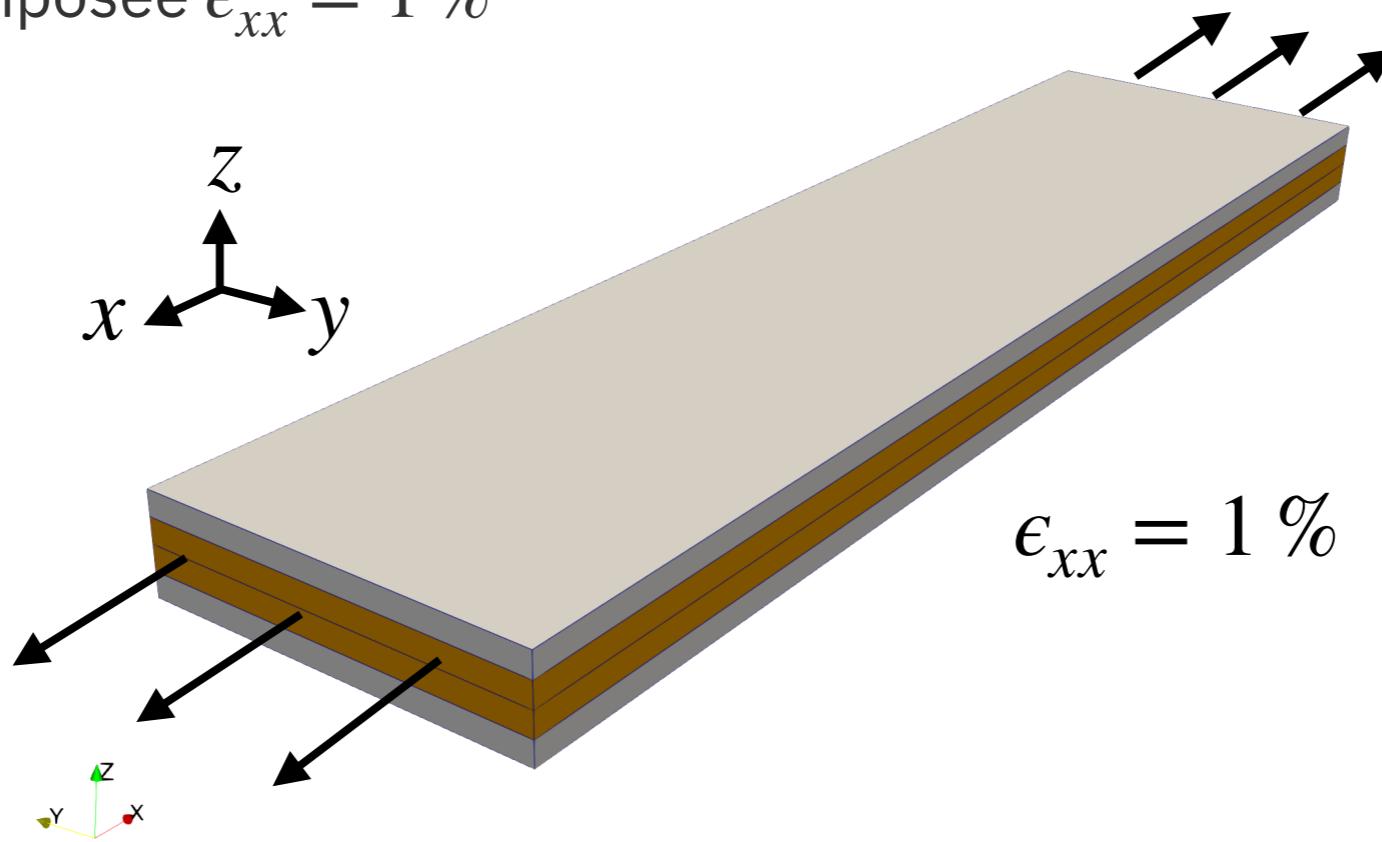
Exercice 1

Contraintes hors-plan – Effets des bords libres

L'objectif de cet exercice est de vérifier l'effet de bords libres comme source de contraintes hors-plan pour deux empilements $[0/90]_s$ et $[+45/-45]_s$

Données du problème

- Dimension éprouvette : 80 mm x 20 mm x 5 mm
- Empilement : [0/90]_s ou [+45/-45]_s
- Déformation imposée $\epsilon_{xx} = 1 \%$



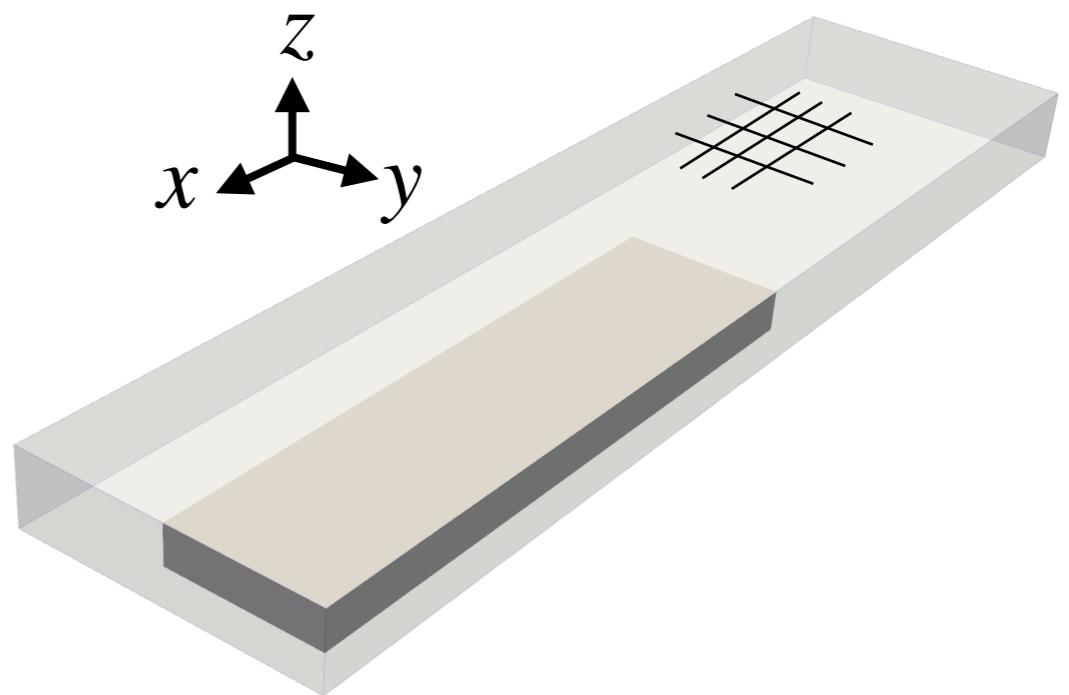
Propriétés du pli (T300/M18)

E_1	$E_2=E_3$	$\nu_{12}=\nu_{13}=\nu_{23}$	G_{12}	$G_{13}=G_{23}$
170 GPa	9 GPa	0,34	4,8 GPa	4,5 GPa

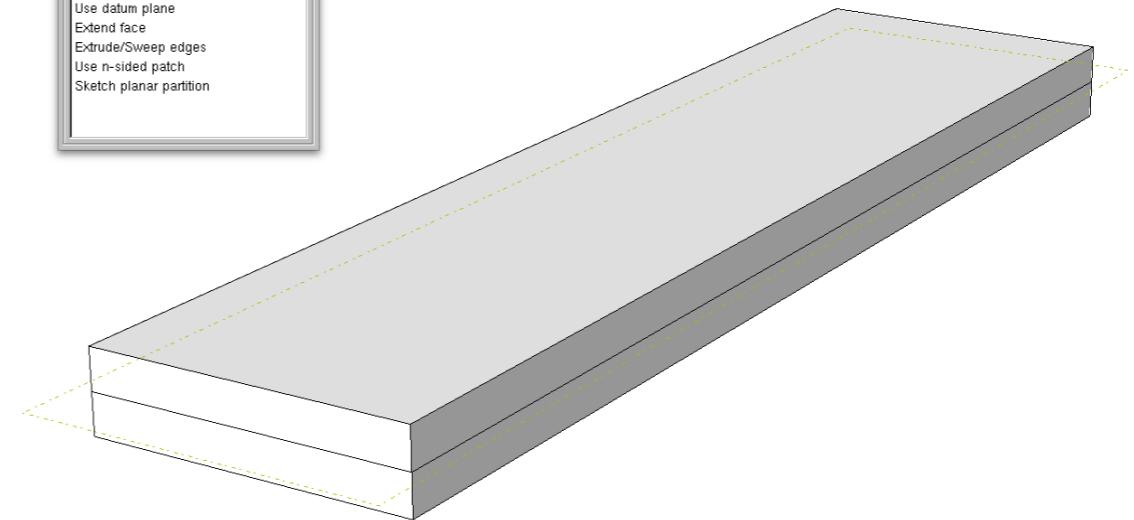
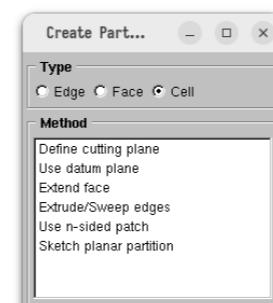
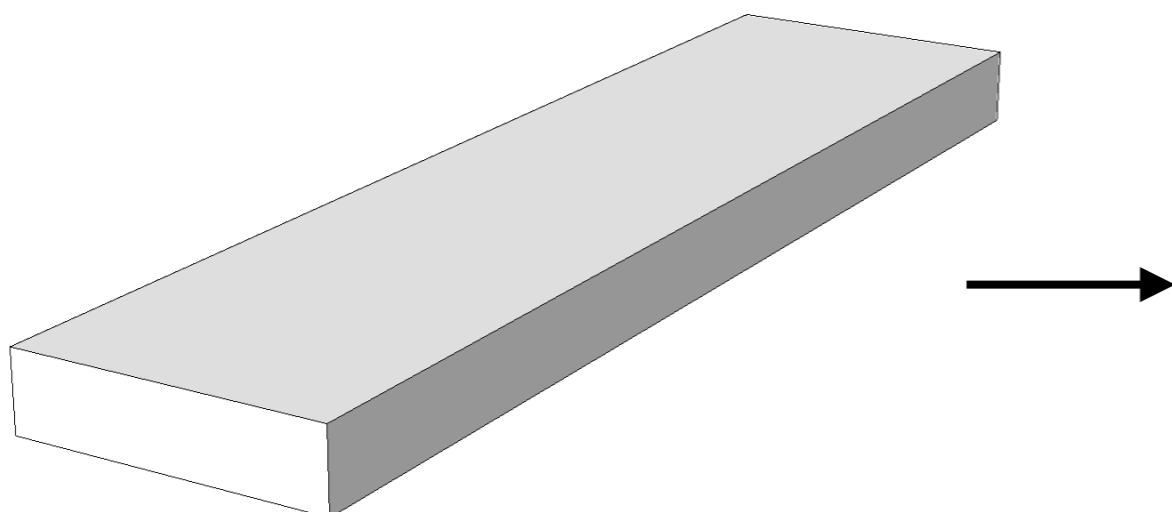
Partie 1 – Empilement [0/90]_s

ⓘ

Compte-tenu de la symétrie de l'éprouvette et du chargement, on ne modélisera que 1/8 de l'éprouvette

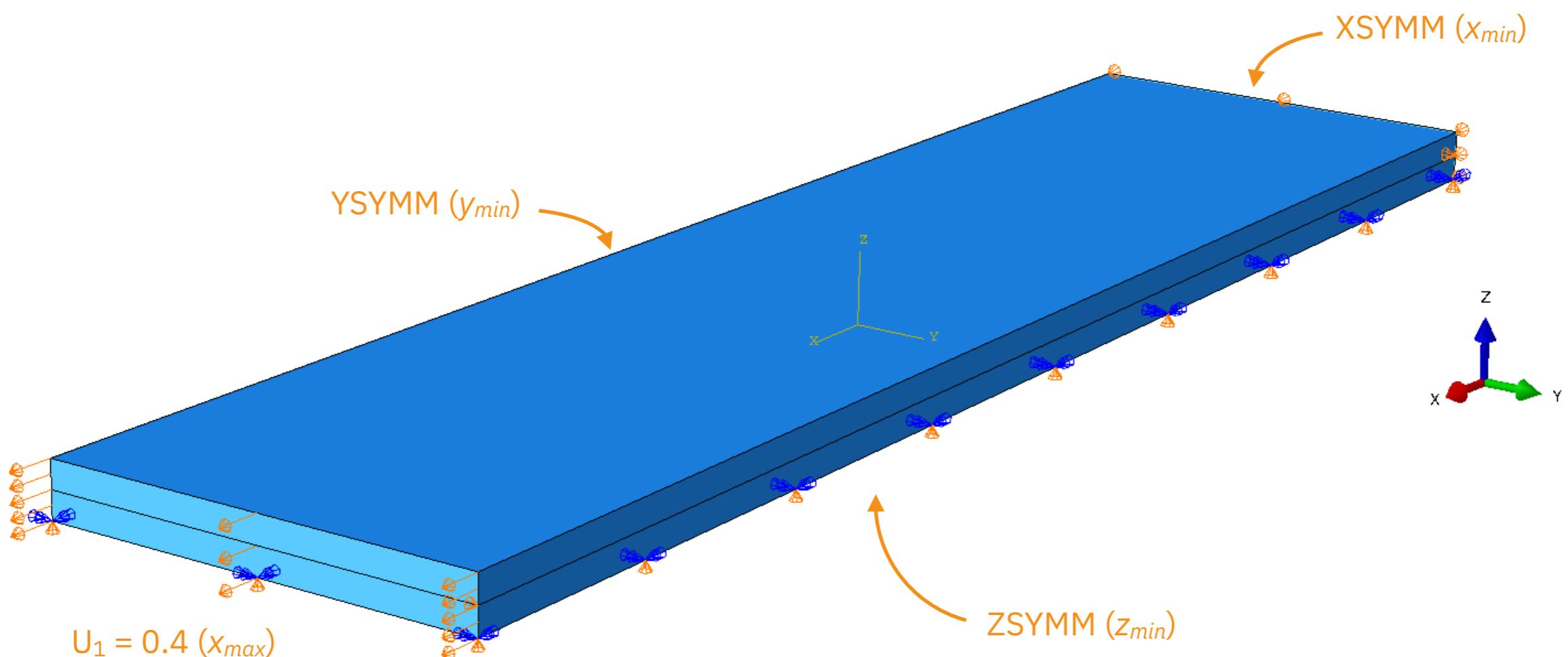
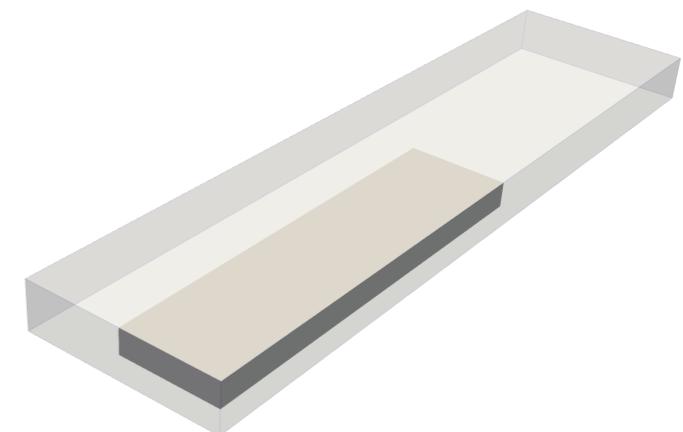


- Créer un premier modèle, puis partitionner le volume pour définir les plis à 0° et à 90°



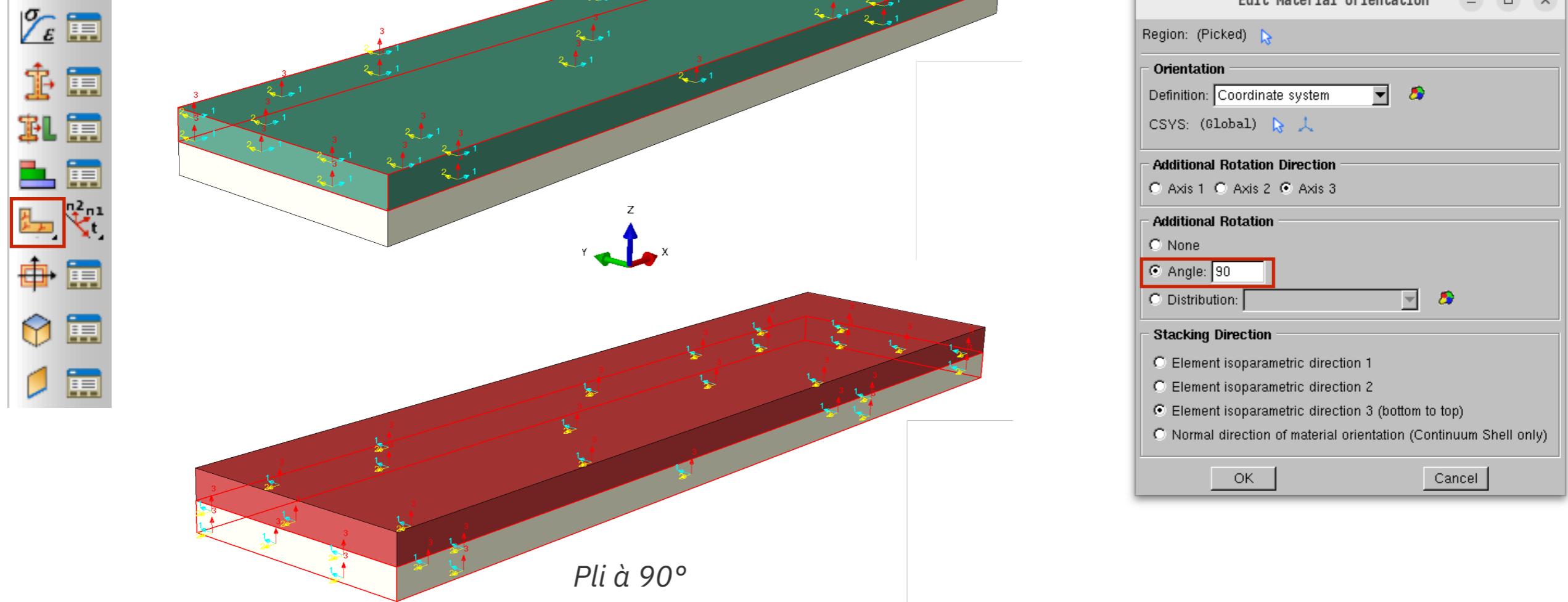
Partie 1 – Empilement [0/90]_s

- Appliquer des conditions de symétries sur les faces concernées, ainsi qu'un déplacement de 0.4 mm sur la face x_{max}



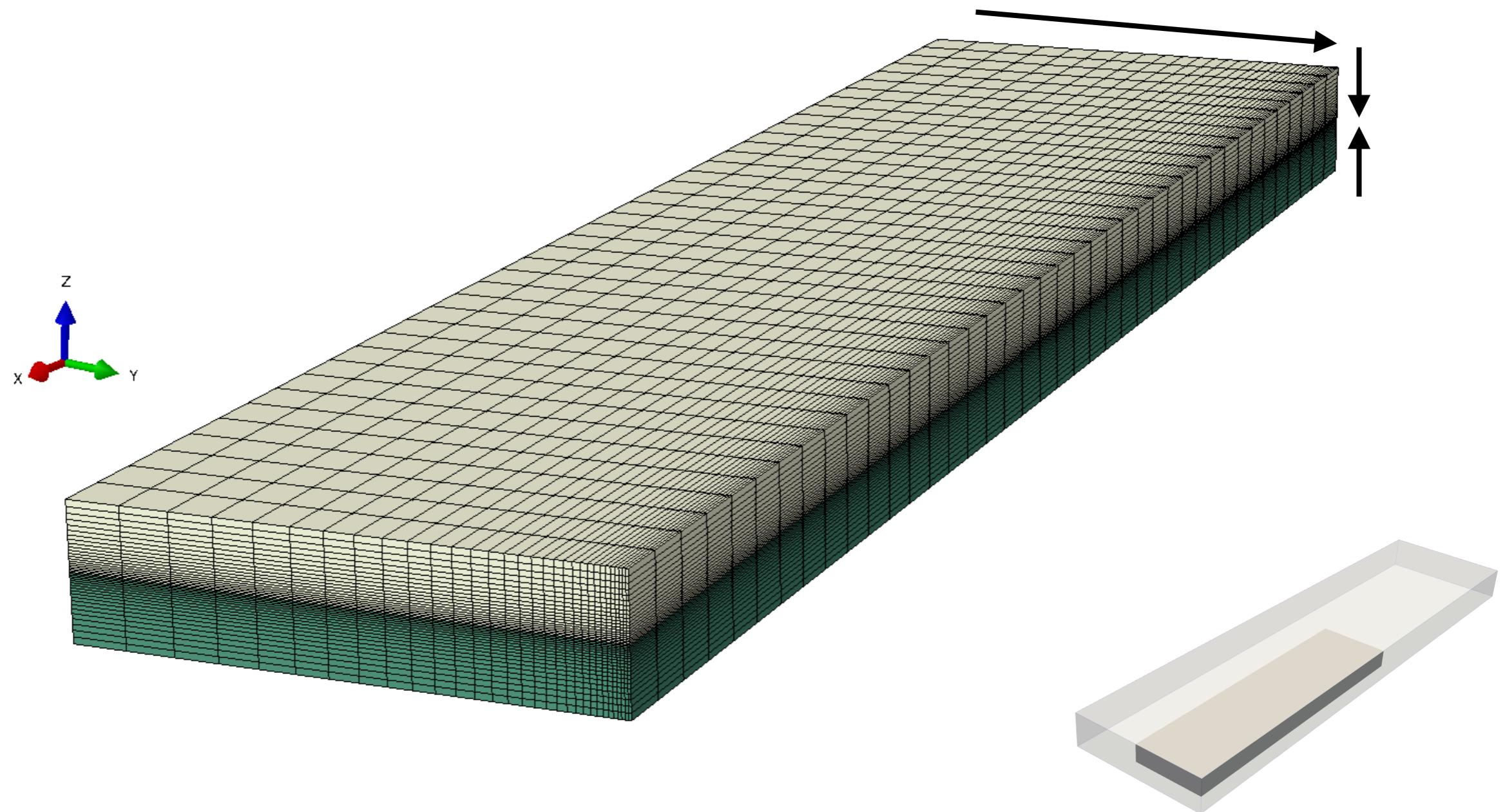
Partie 1 – Empilement [0/90]_s

- Définir le matériau du pli et attribuer les sections. Attribuer également une orientation matériau pour chaque pli (axe local 1 dans la direction des fibres)



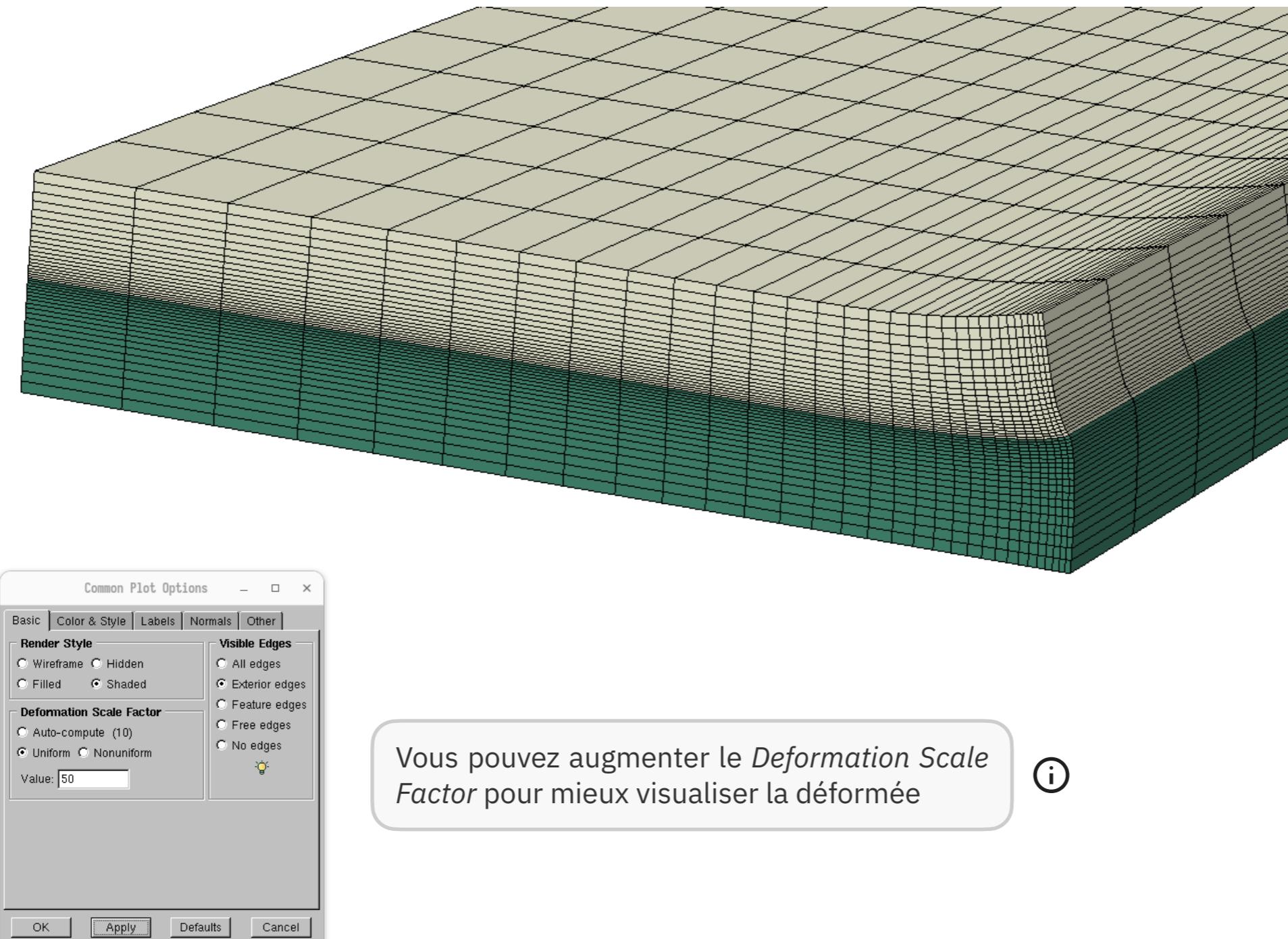
Partie 1 – Empilement [0/90]_s

- Raffiner progressivement le maillage sur le bord libre, et au niveau de l'interface entre le pli à 0° et le pli à 90°



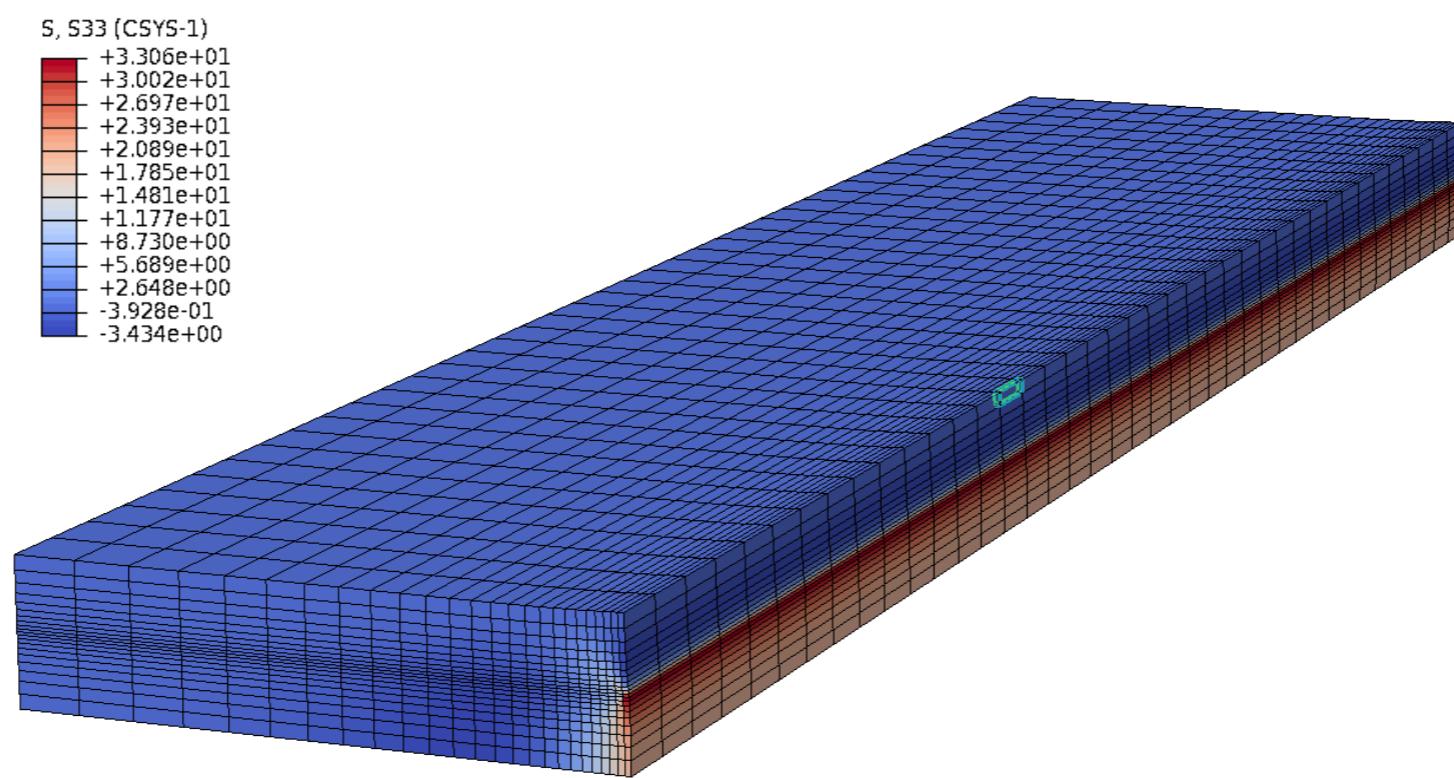
Partie 1 – Empilement [0/90]_s

- **Q1** Lancer la simulation, et observer la déformée près du bord libre.



Partie 1 – Empilement [0/90]_s

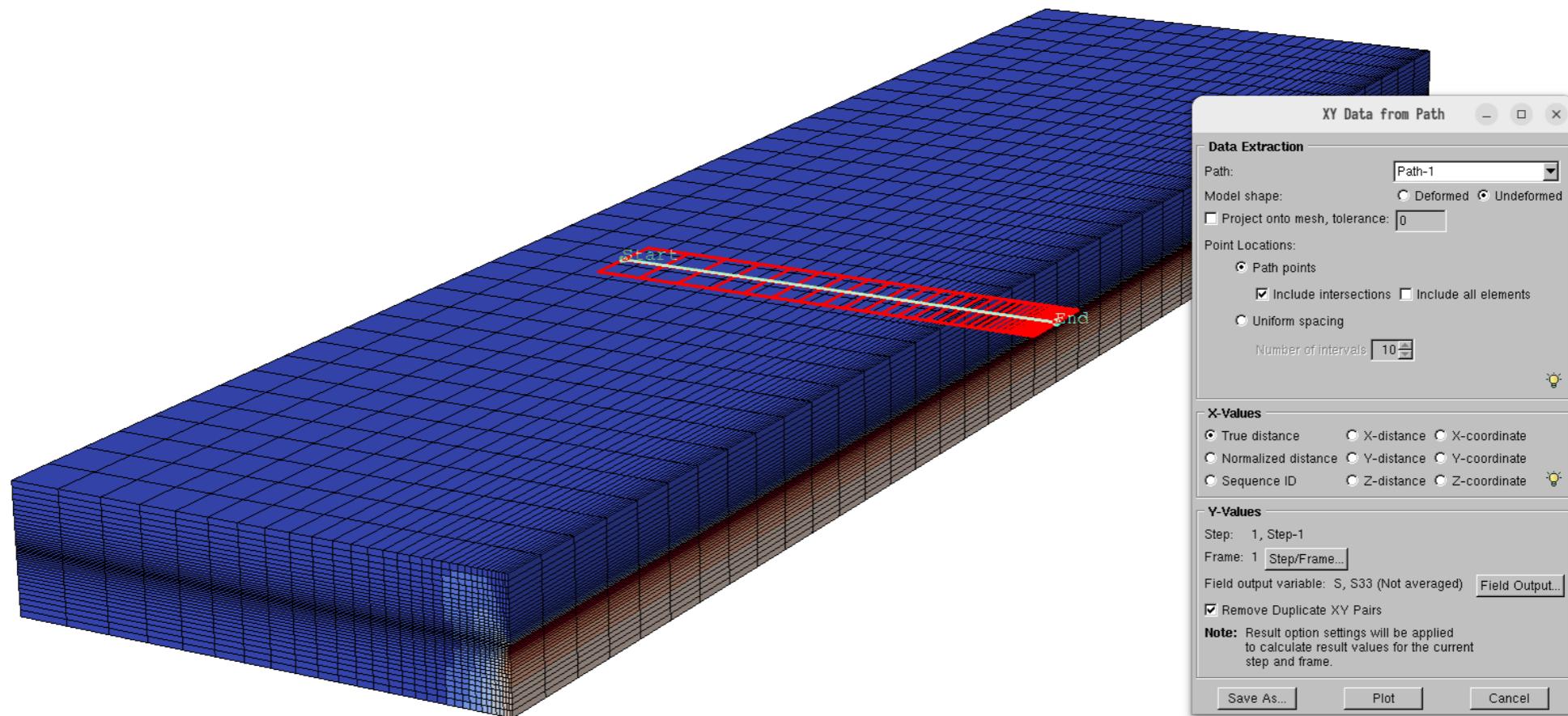
- **Q2** Afficher les contraintes hors-plan S_{33} , S_{23} , S_{13} . Attention, il faut projeter les contraintes dans un même repère (cf. Tutoriel *Projection des contraintes locales dans le repère global – création d'un système de coordonnées*).
- **Q3** Relever les niveaux de contraintes hors-plan près du bord libre. Quelles contraintes hors-plan génère le bord libre dans ce cas ?



Contrainte hors-plan σ_{zz}

Partie 1 – Empilement [0/90]_s

- **Q4** Tracer l'évolution des contraintes hors-plan dans la largeur de l'éprouvette, à proximité de l'interface.



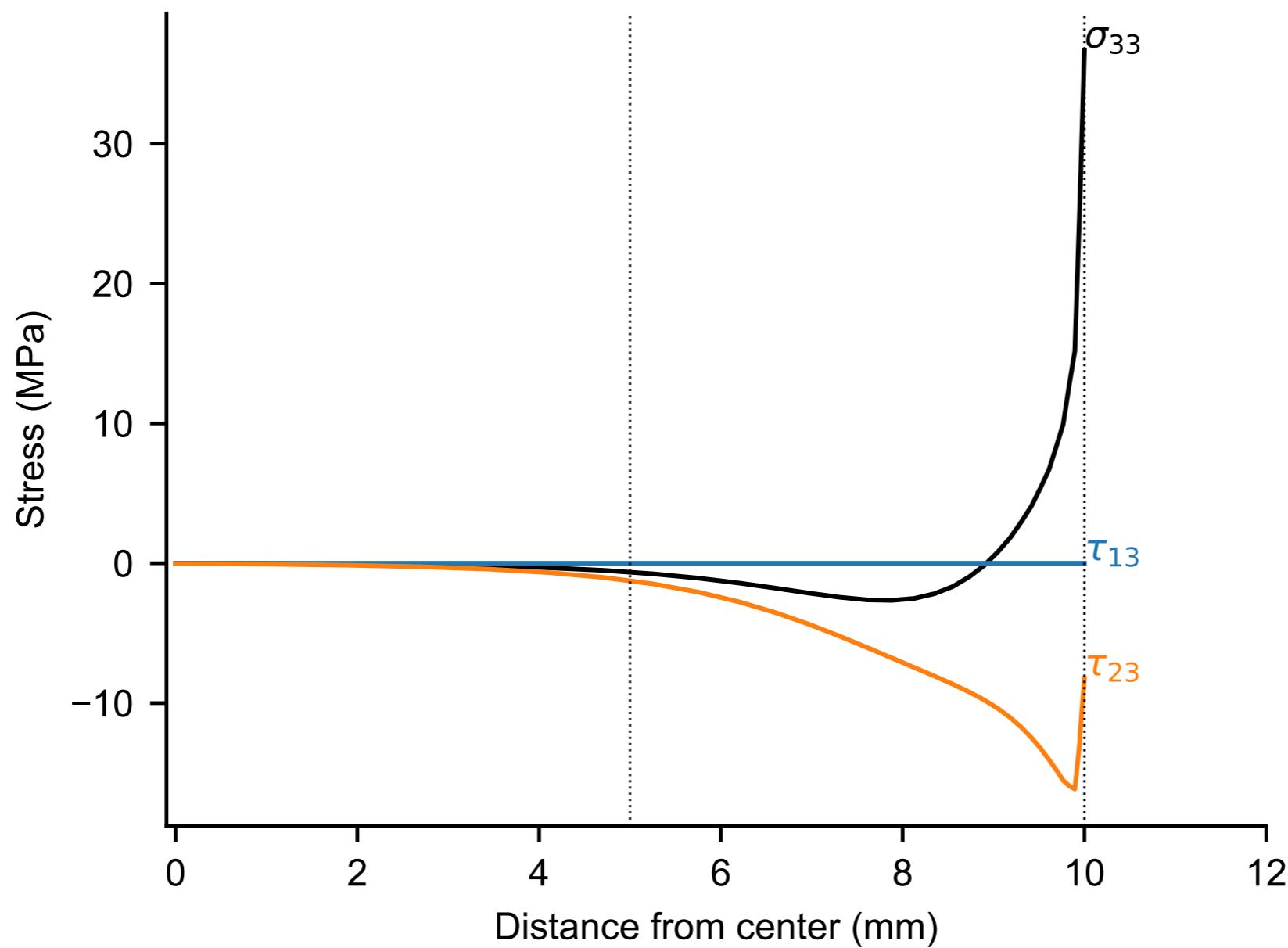
Il faut définir la *Path* très légèrement d'un côté ou de l'autre de l'interface, idéalement au milieu du premier élément au-dessus ou au-dessous de l'interface.



Les contraintes sont définies par élément, et sont discontinues au niveau de l'interface. Si l'on se place pile au niveau de l'interface, le *Path* va sélectionner aléatoirement une valeur de contrainte d'un côté ou de l'autre.

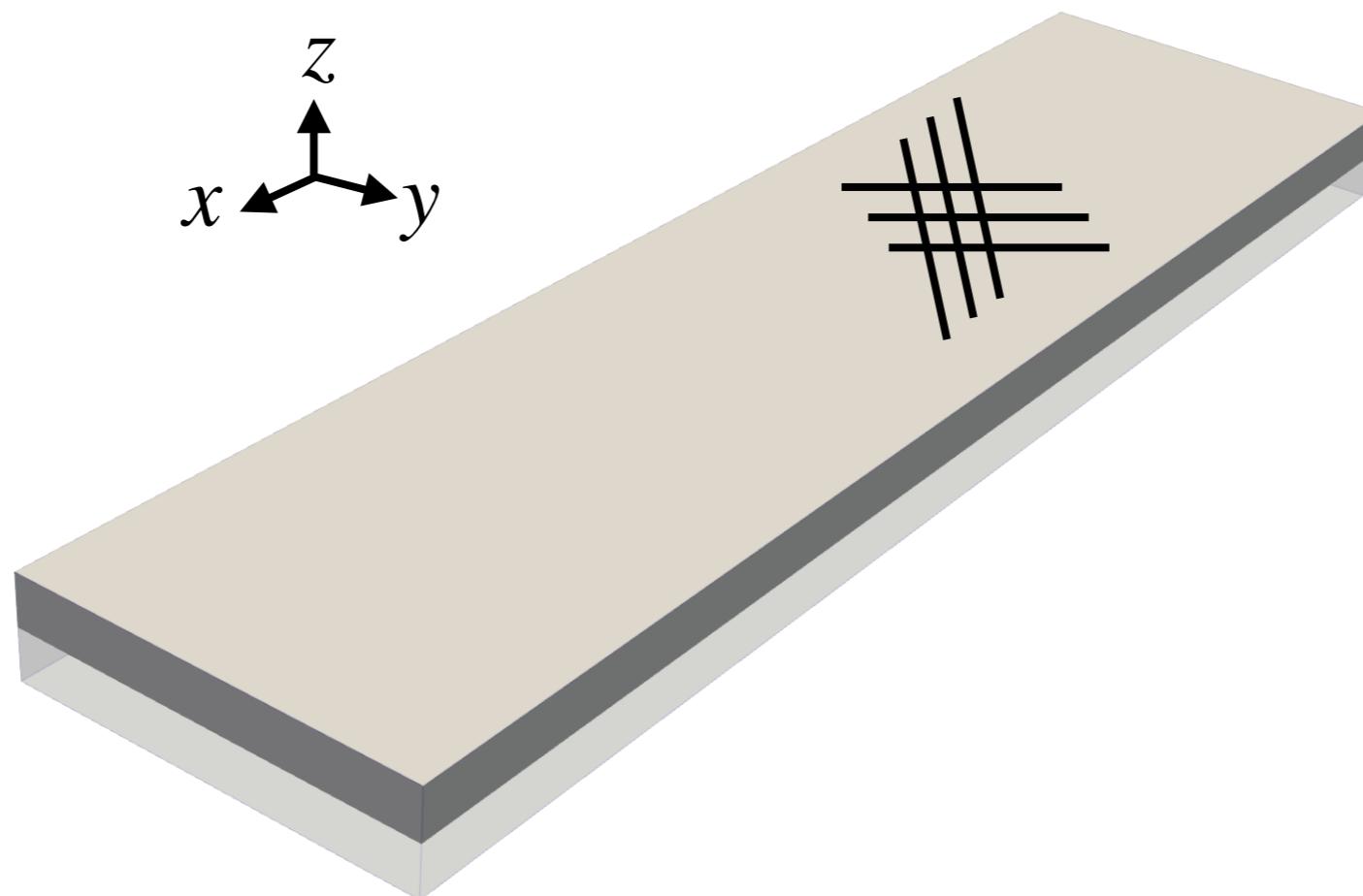
Partie 1 – Empilement [0/90]_s

- **Q5** À quelle distance du bord de l'éprouvette retrouve-t-on un état de contrainte plane compatible avec la théorie des stratifiés ? À quelle dimension de l'éprouvette cette distance correspond-t-elle ?



Partie 2 – Empilement $[+45/-45]_s$

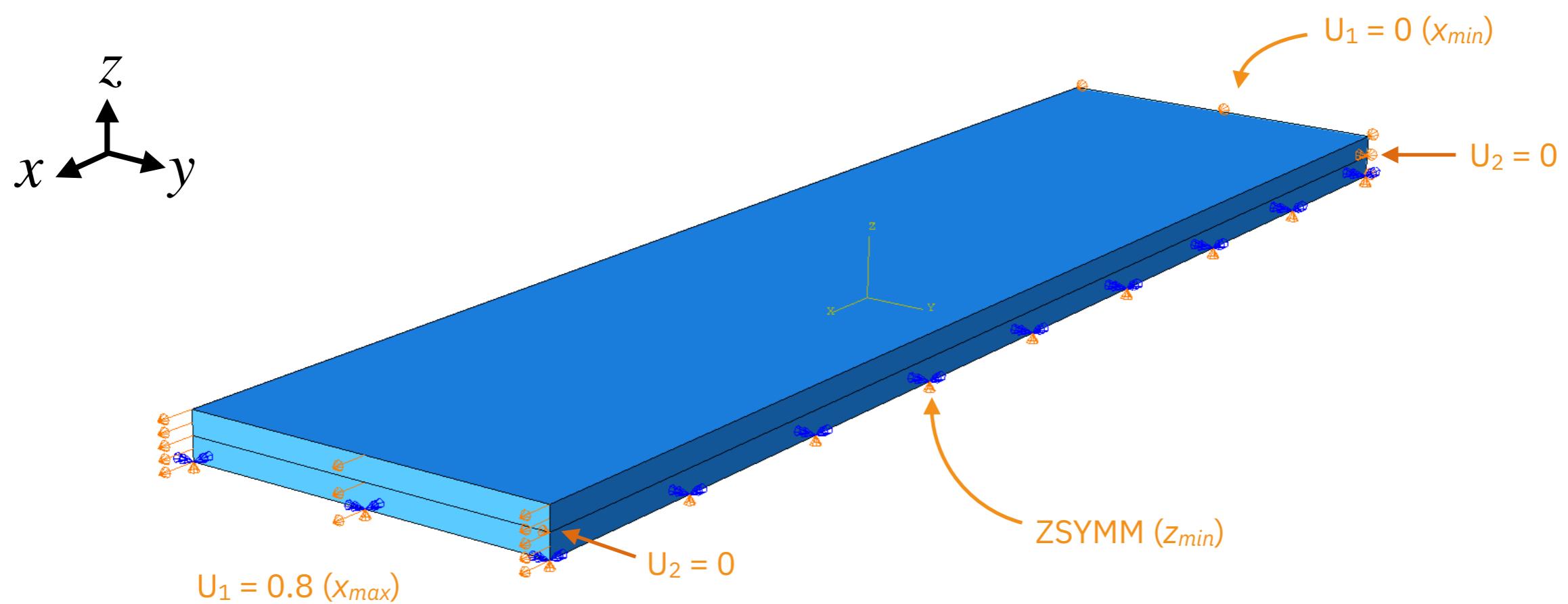
- En procédant comme précédemment, créer un nouveau modèle pour le cas $[+45/-45]_s$



Attention, l'orientation des plis n'est plus symétrique en x, ni en y. Il n'y a plus que la symétrie en z de l'empilement. On modélisera donc la $\frac{1}{2}$ de l'éprouvette dans ce cas.

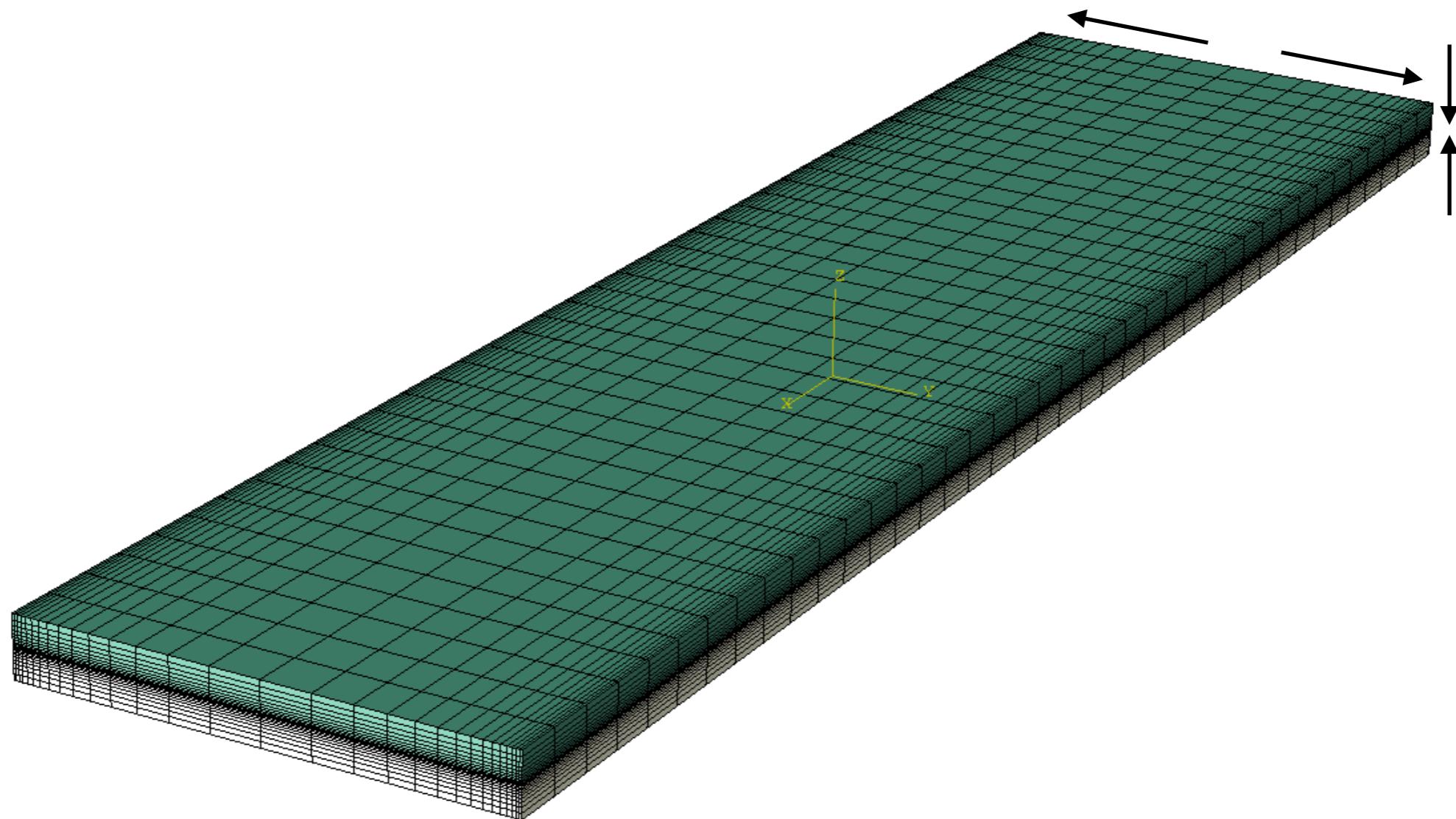
Partie 2 – Empilement $[+45/-45]_s$

- En plus de la symétrie en z sur la face z_{min} , bloquer le déplacement u_1 sur la face x_{min} , et imposer un déplacement de $u_1=0.8$ sur la face x_{max} . Pour éviter les mouvements de corps rigides, il faut également bloquer u_2 sur deux noeuds supplémentaires.



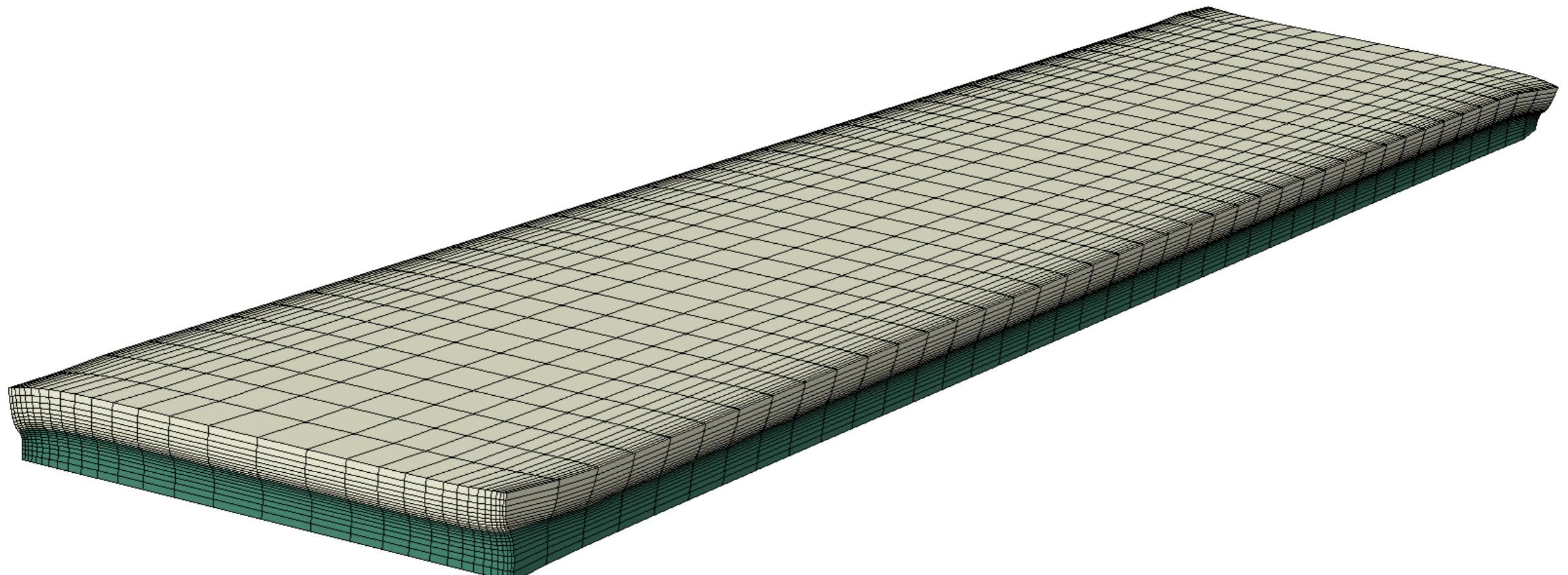
Partie 2 – Empilement $[+45/-45]_s$

- Raffiner la maillage vers les bords libres, et au niveau de l'interface.



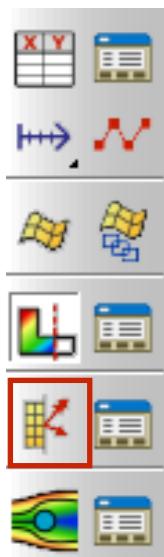
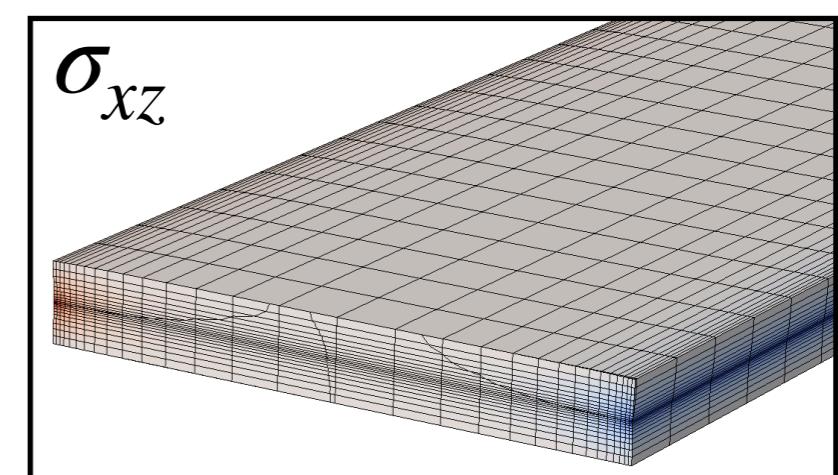
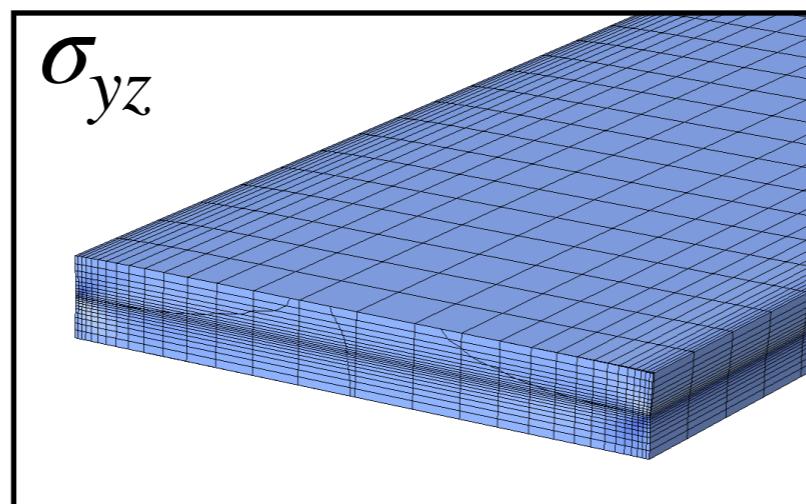
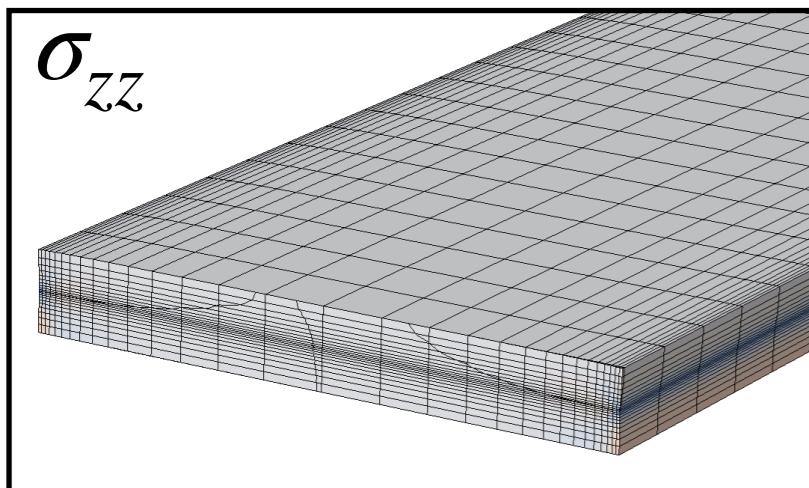
Partie 2 – Empilement $[+45/-45]_s$

- **Q6** Observer l'effet des bords libres sur la déformée de l'éprouvette



Partie 2 – Empilement $[+45/-45]_s$

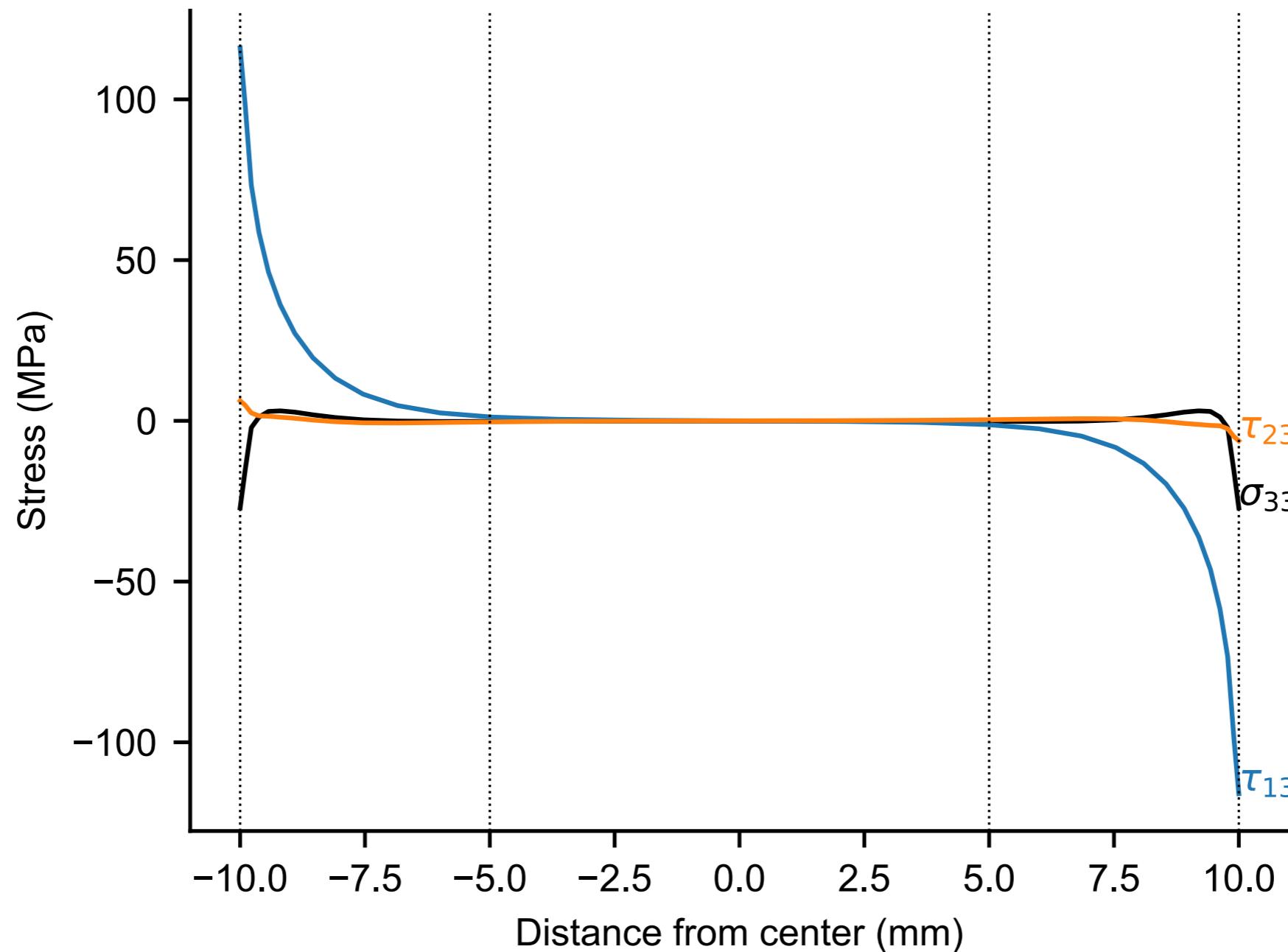
- **Q7** Comme précédemment, afficher les contraintes hors-plan et commenter leur valeur et leur localisation.



Pour ne pas être gêné par les effets des conditions limites, vous pouvez faire une coupe au milieu de l'éprouvette avec *View Cuts*.

Partie 2 – Empilement $[+45/-45]_s$

- **Q8** Tracer et commenter l'évolution des contraintes hors-plan dans la largeur de l'éprouvette, à proximité de l'interface.



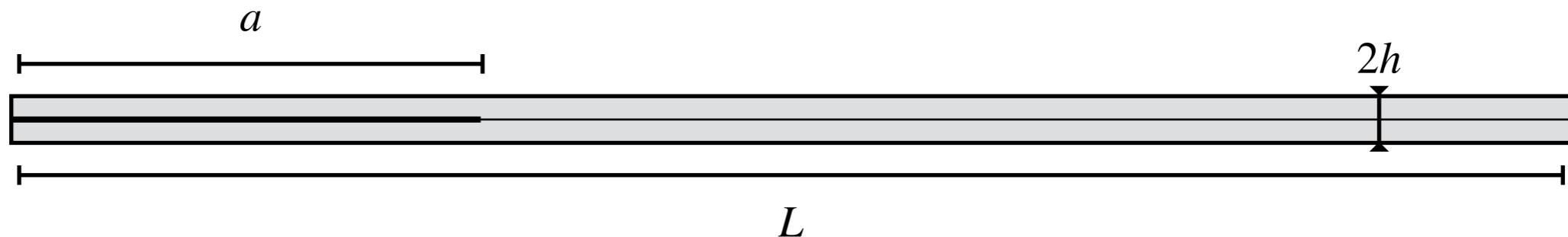
Exercice 2

Simulation d'un essai DCB

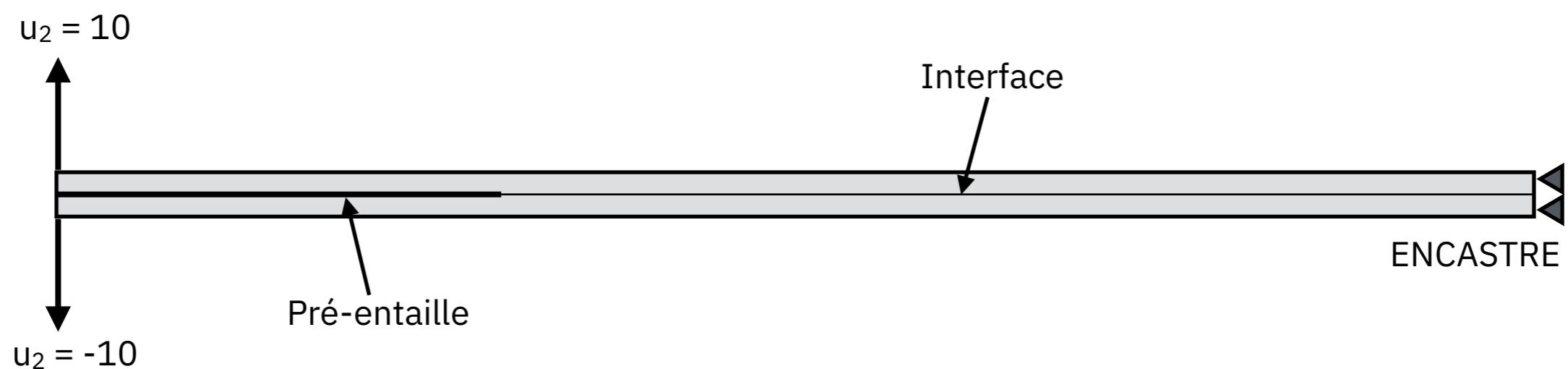
L'objectif de cet exercice est de simuler un essai DCB à l'aide d'éléments de zone cohésive

Données du problème

- Longueur $L = 100$ mm, épaisseur $2h = 3$ mm, pré-fissure $a = 30$ mm

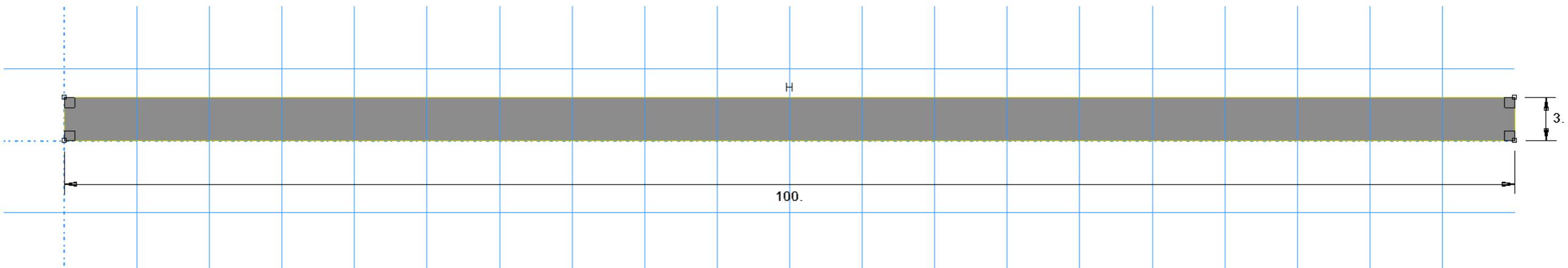


- Propriétés des plis : élastique isotrope $E = 120$ GPa, $\nu = 0.2$
- Propriétés CZM : K à définir, $\sigma_c = 100$ MPa, $G_c = 5$ mJ/mm²

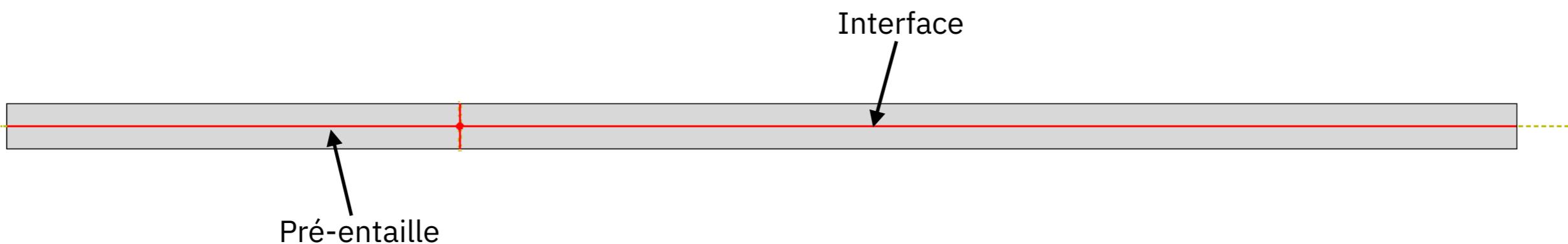


Création du modèle

- Commencer par dessiner l'éprouvette

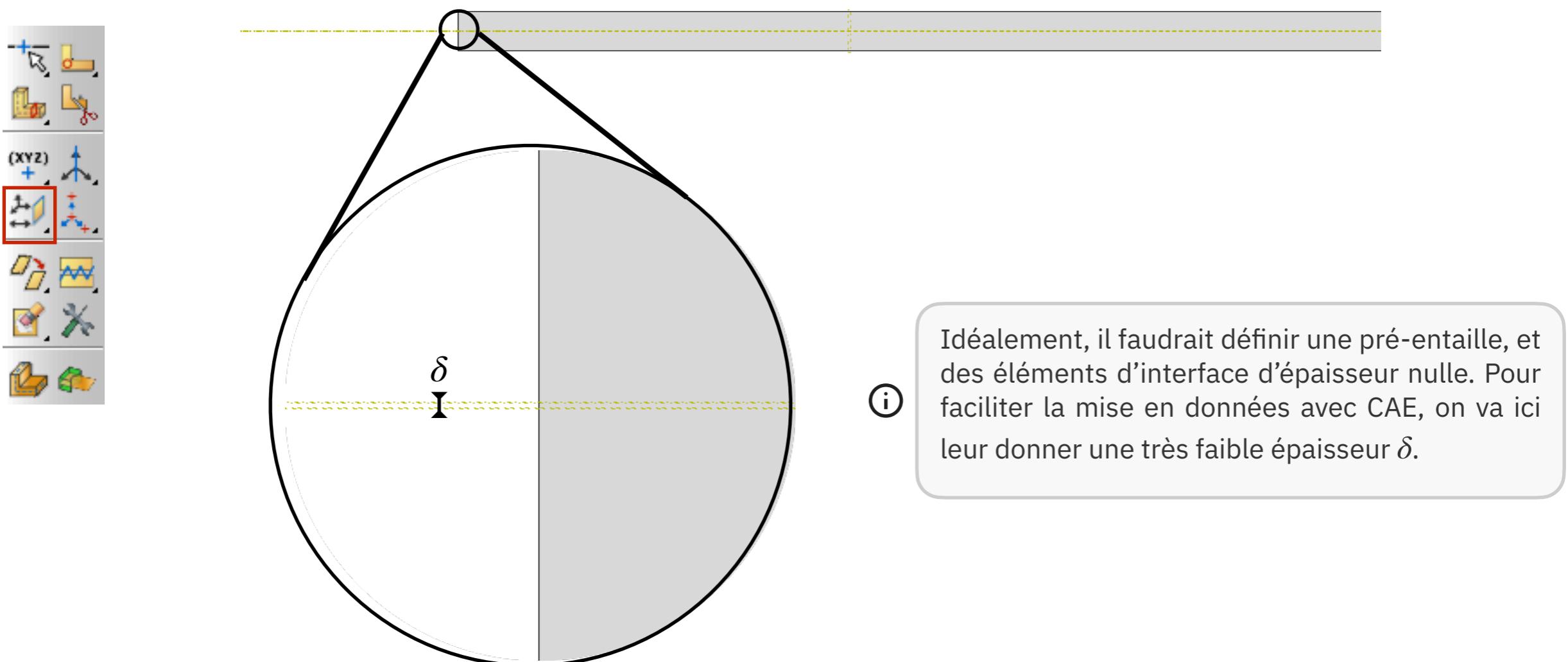


- On va ensuite partitionner et modifier la modèle pour créer la pré-entaille, ainsi que les éléments d'interface



Création du modèle

- Pour partitionner le modèle, créer d'abord trois *Datum Planes* : deux horizontaux à ± 0.0005 mm du milieu de l'éprouvette, un troisième vertical à 30 mm du bord gauche



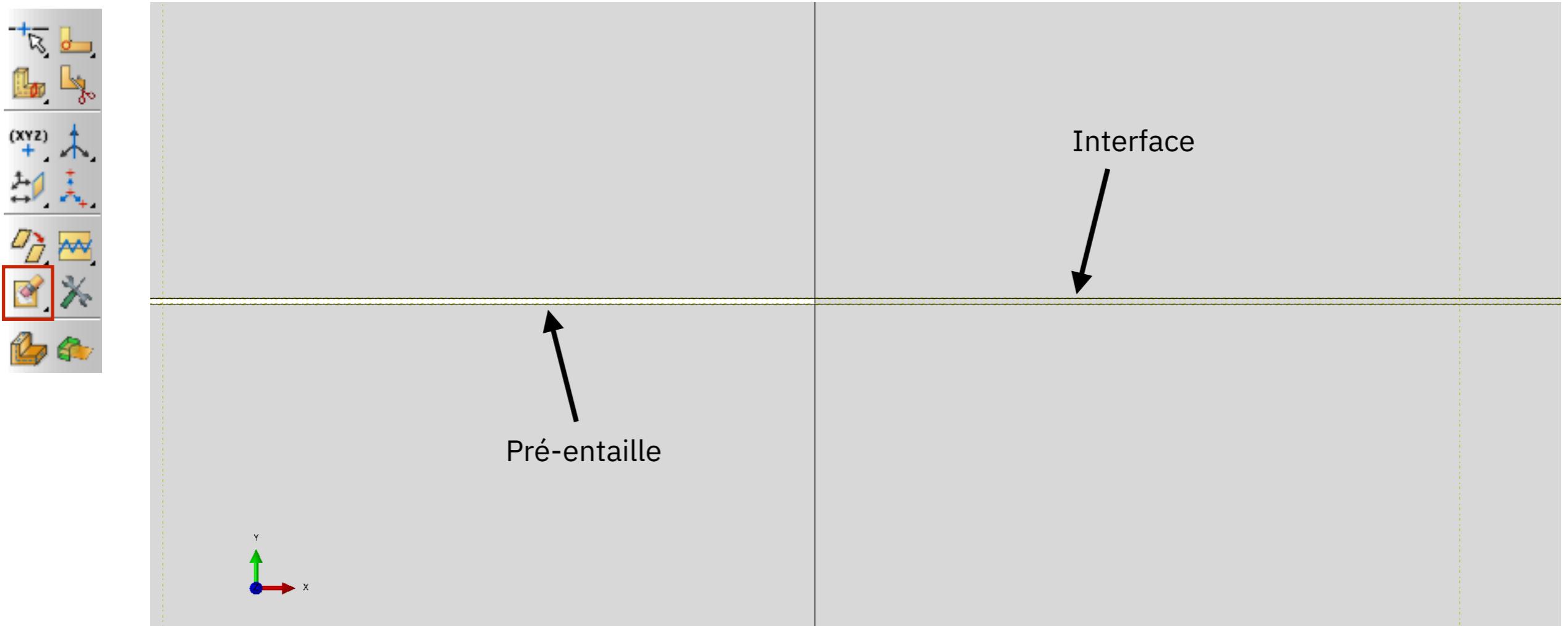
Création du modèle

- Partitionner ensuite le modèle à l'aide des *Datum Planes*.



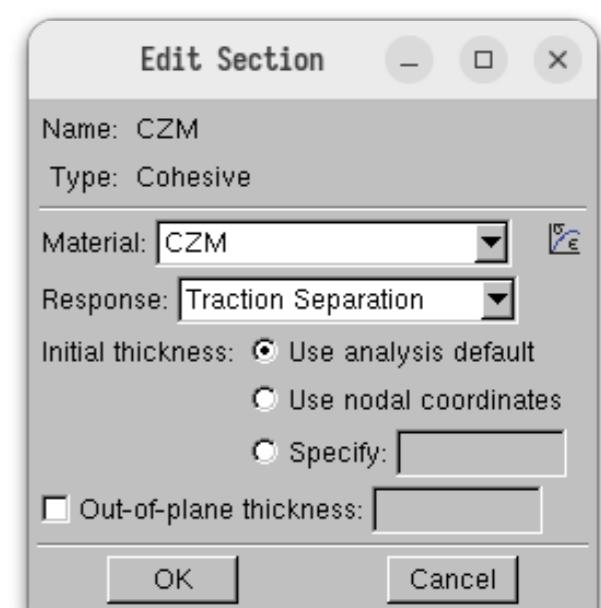
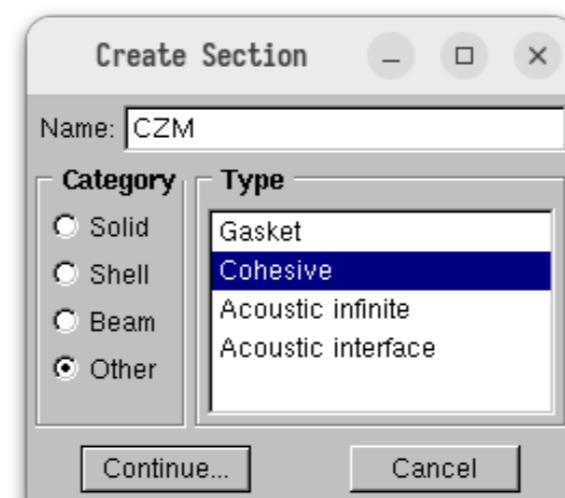
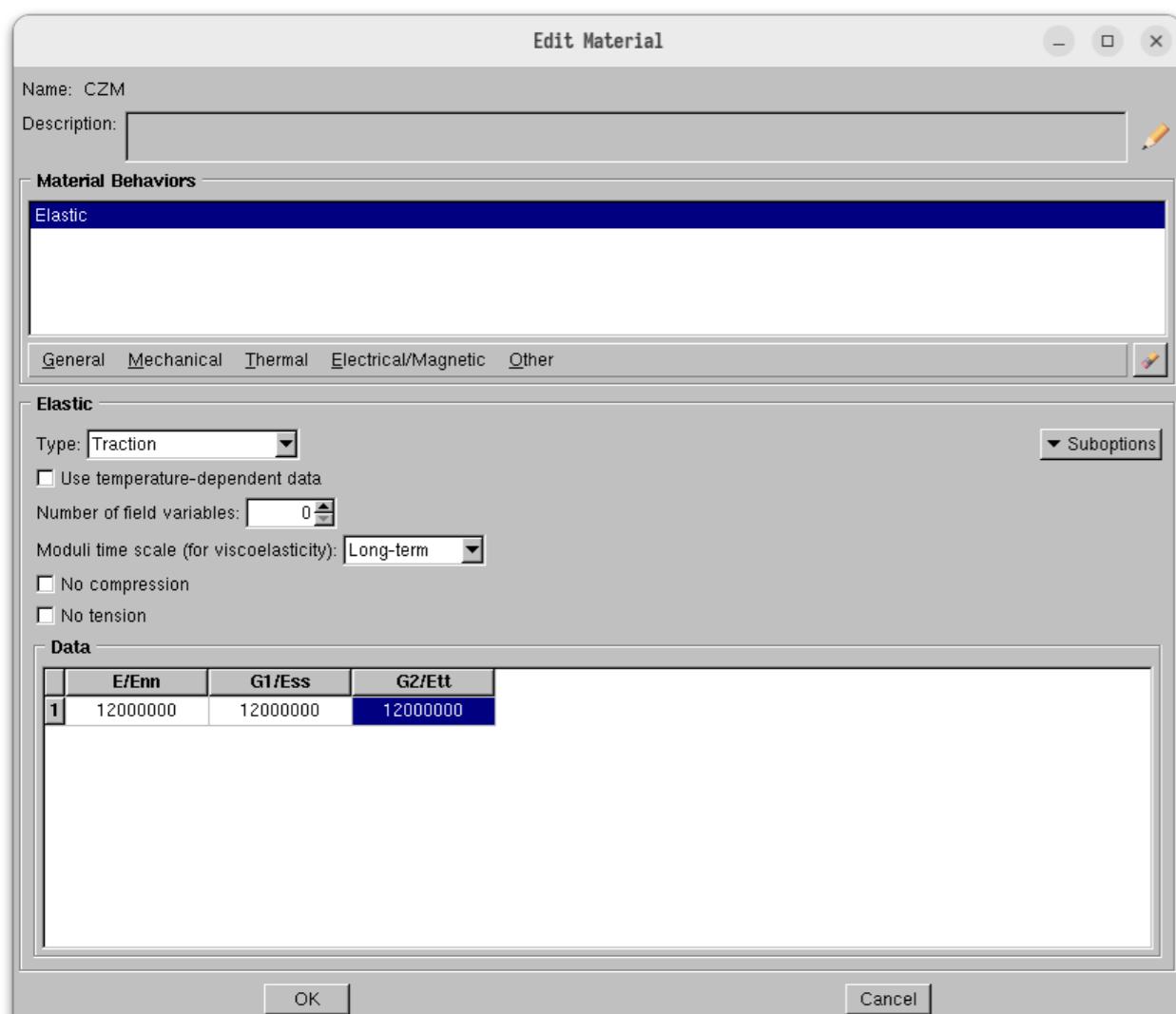
Création du modèle

- Enfin, supprimer la face correspondant à la pré-entaille



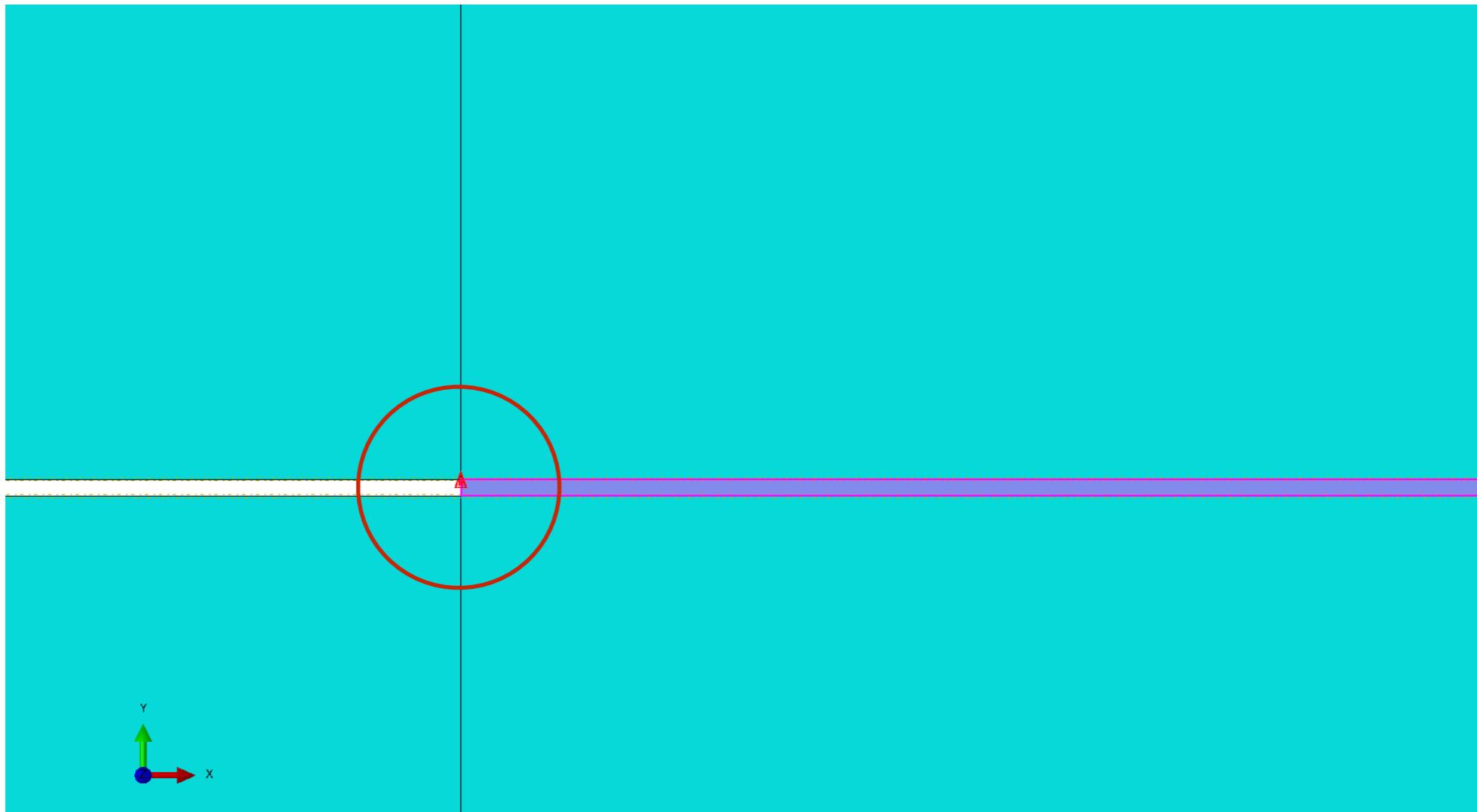
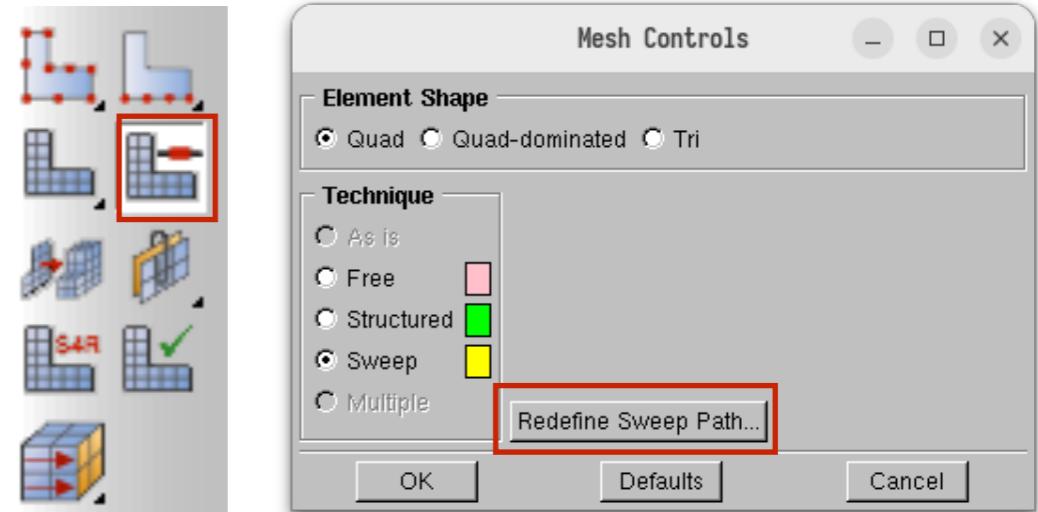
Propriétés matériau

- Pour l'interface, matériau : *Mechanical > Elastic > Traction*. Les trois paramètres correspondent aux rigidités K_n , K_s , K_t (*mettez des valeurs arbitraires pour l'instant*).
- Puis section : *Other > Cohesive > Traction Separation*.



Maillage

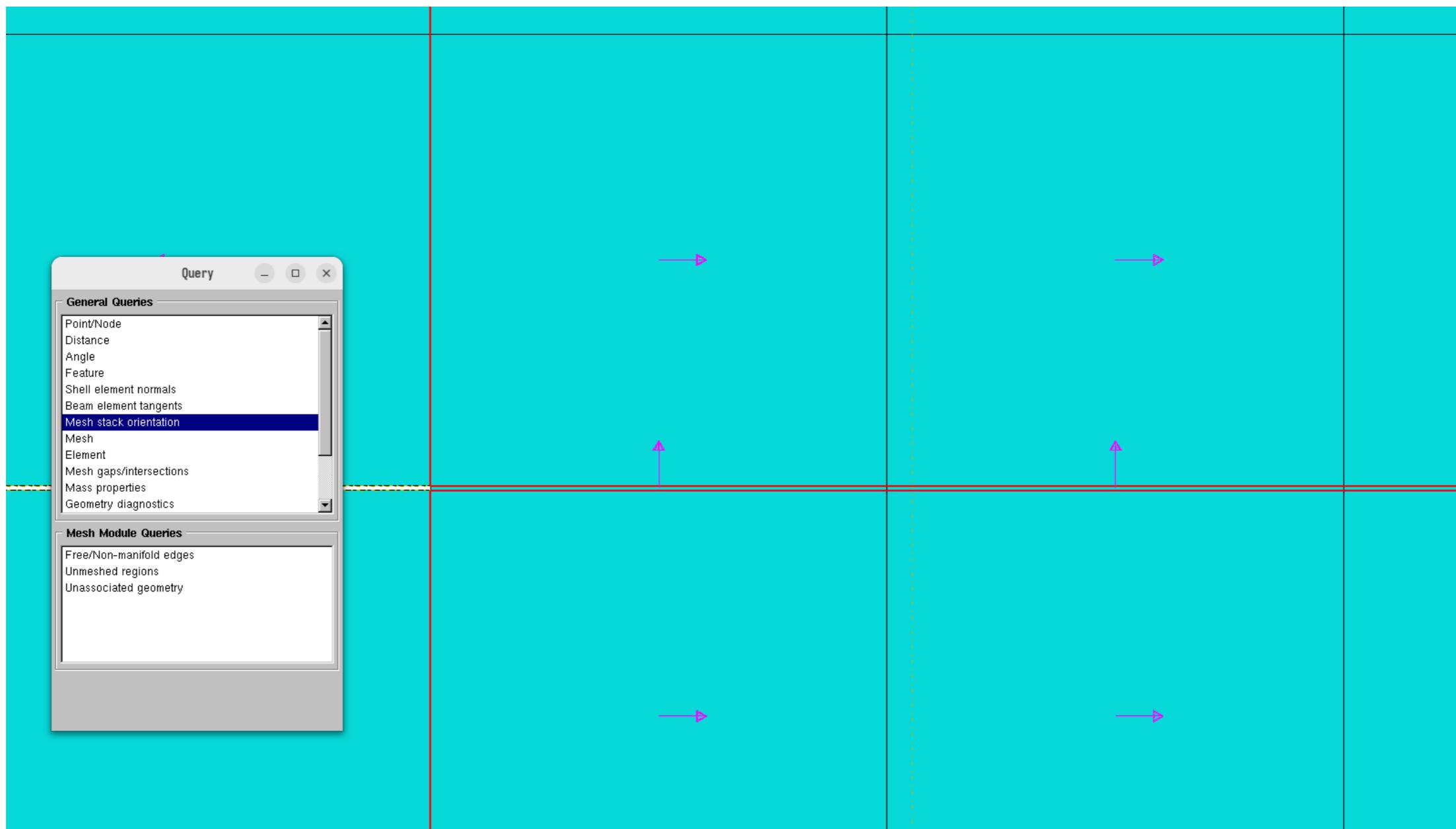
- Ajuster le *Mesh Controls* pour l'interface. Choisir *Quad > Sweep*. Puis redéfinir la direction du *Sweep Path* pour qu'il soit dans l'épaisseur de l'interface.



Cette étape permet de définir la direction normale n et plane s, t des éléments d'interfaces

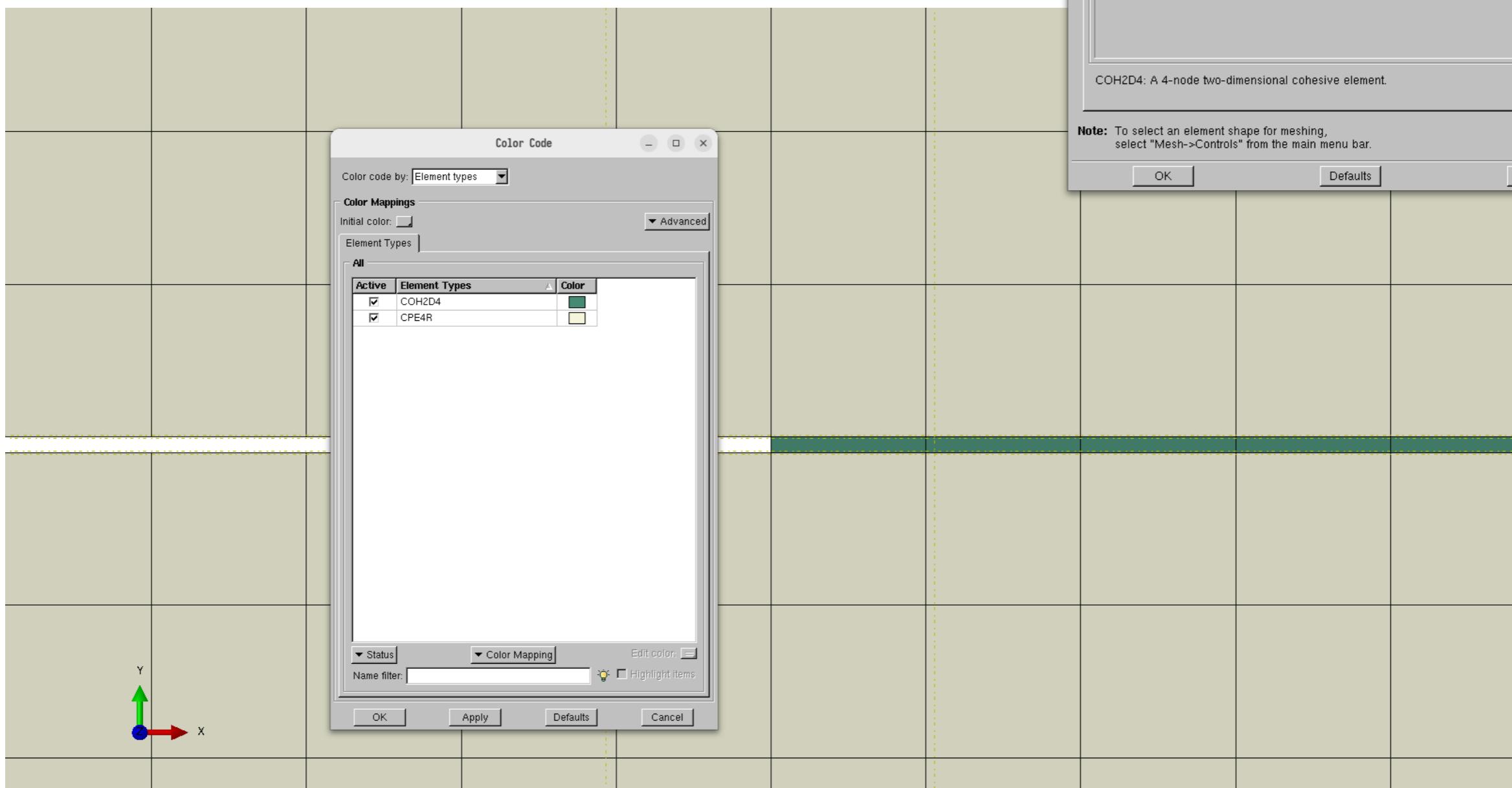
Maillage

- Vérifier la bonne orientation des éléments d'interfaces : *Tools > Query > Mesh stack orientation*. Pour les éléments de l'interface, il faut qu'elle corresponde à la direction hors-plan.



Maillage

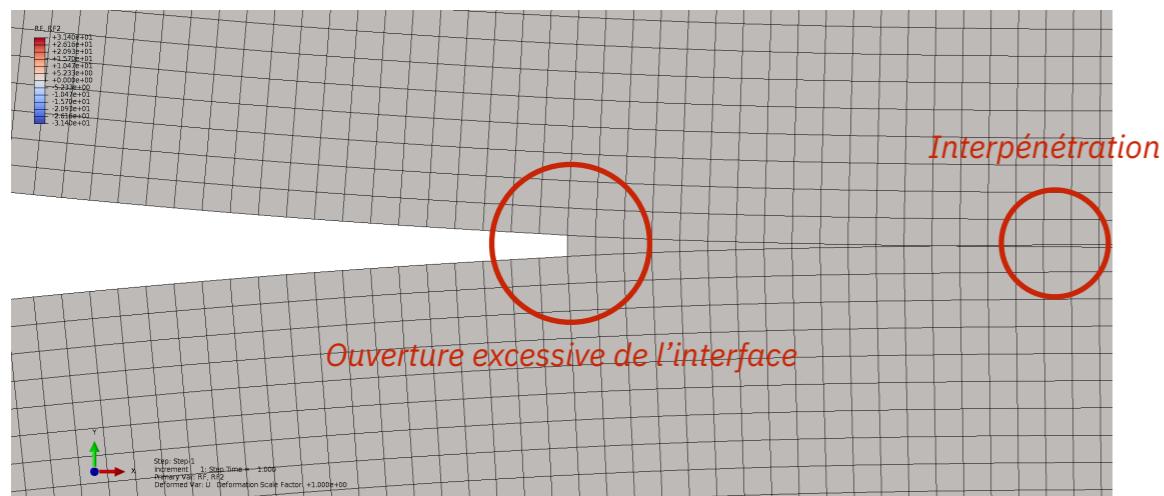
- Enfin, affecter des éléments de type *plane strain* (CPE4R) pour les plis, et des éléments cohésifs (COH2D4) pour l'interface



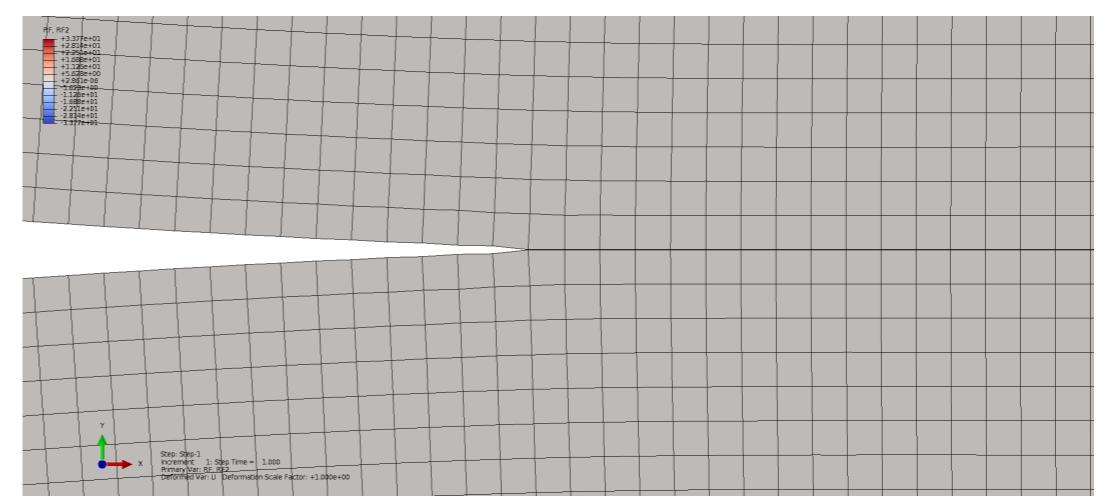
Calibration de la rigidité des interfaces

- **Q1** Simuler la réponse de l'éprouvette pour des valeurs croissantes de rigidités de l'interface en prenant par exemple $K_n = K_s = K_t = \{10^4, 10^5, \dots, 10^9\}$. Relever la force de réaction $RF2$ aux noeuds où sont appliqués les déplacements.
- **Q2** À partir de quelle valeur de K la valeur de $RF2$ se stabilise-t-elle ? Est-ce cohérent avec les propriétés des plis et l'épaisseur d'interface introduite dans le modèle ?

Pour la suite des calculs, vous utiliserez la valeur de K qui vous paraît la plus appropriée.



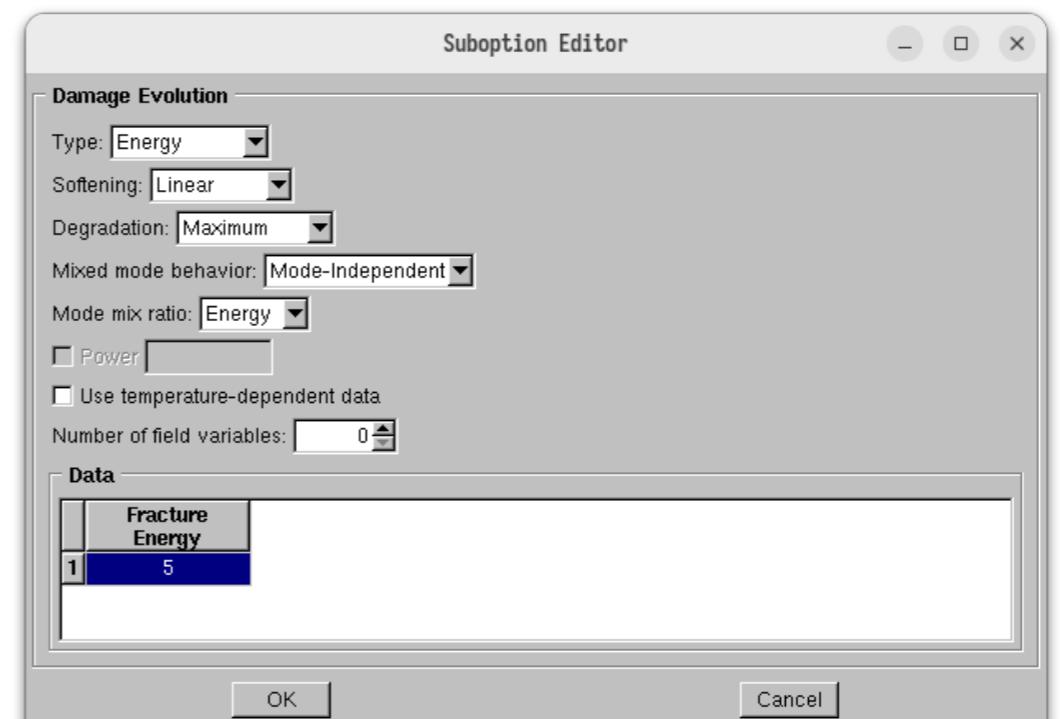
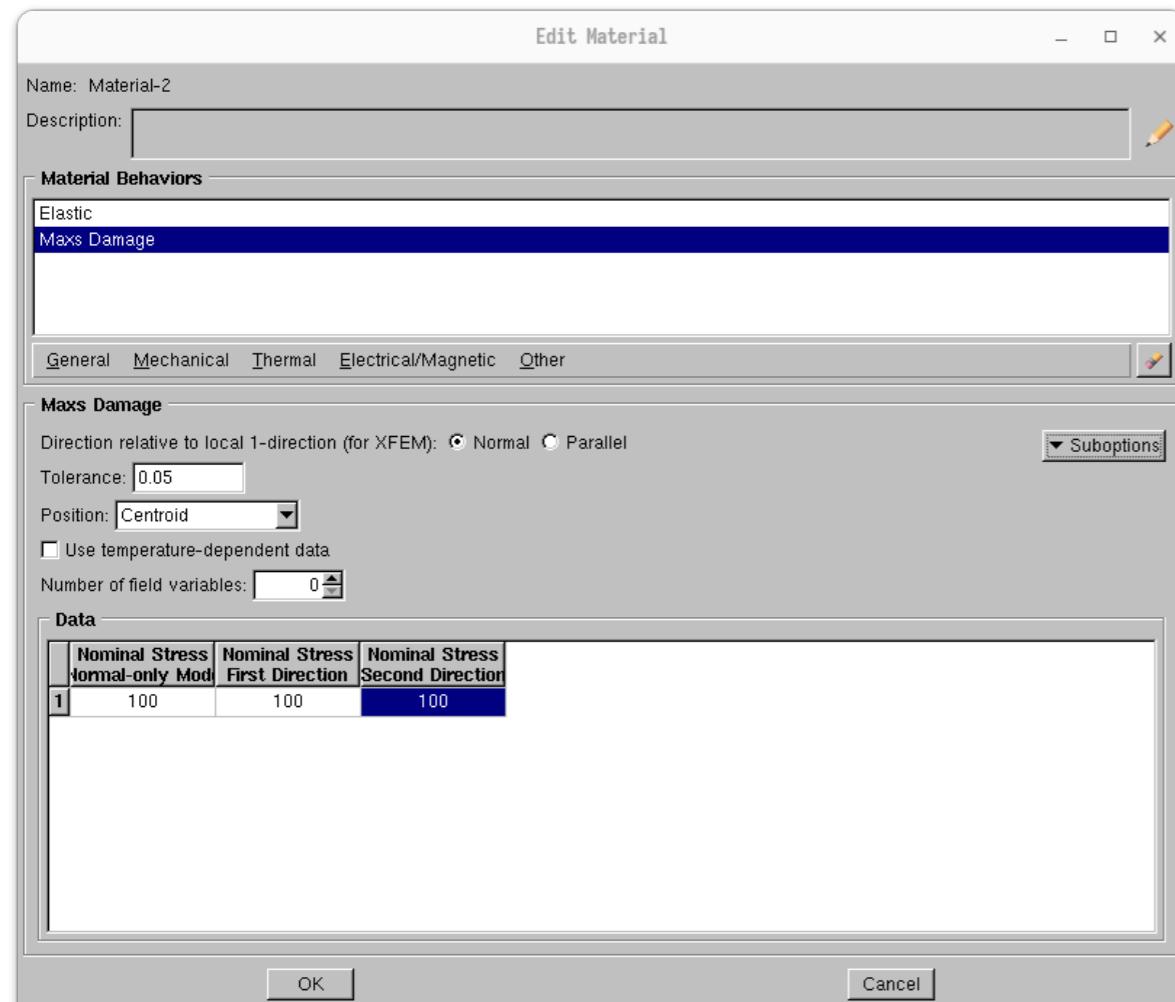
Rigidité trop faible



Rigidité correcte

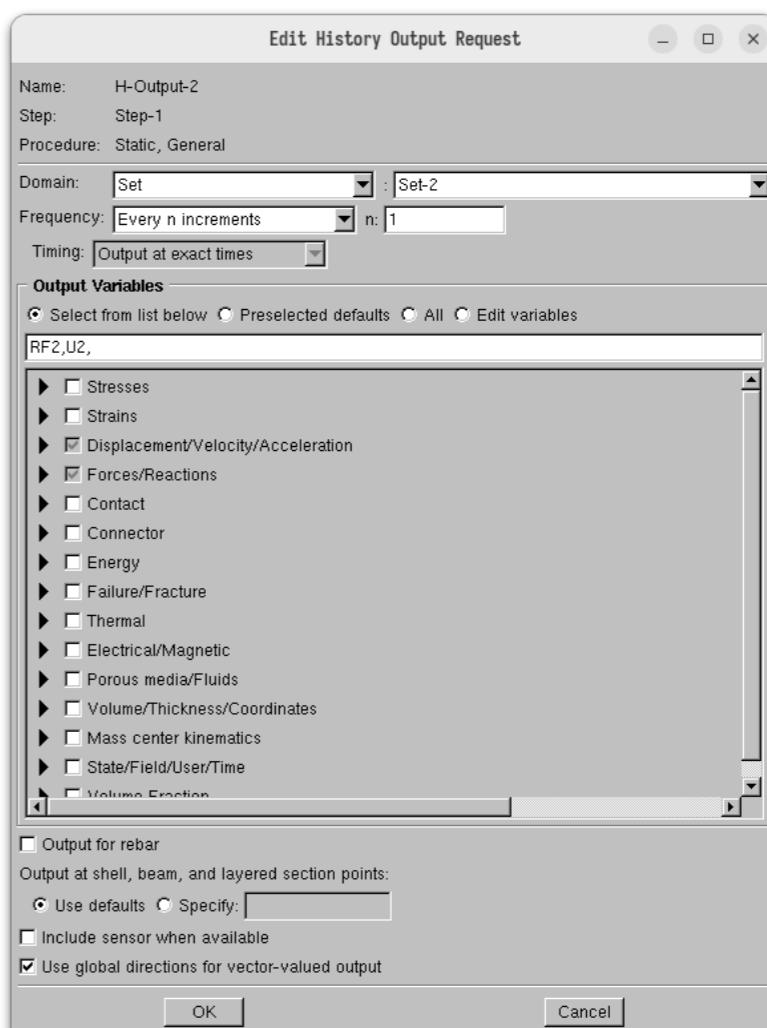
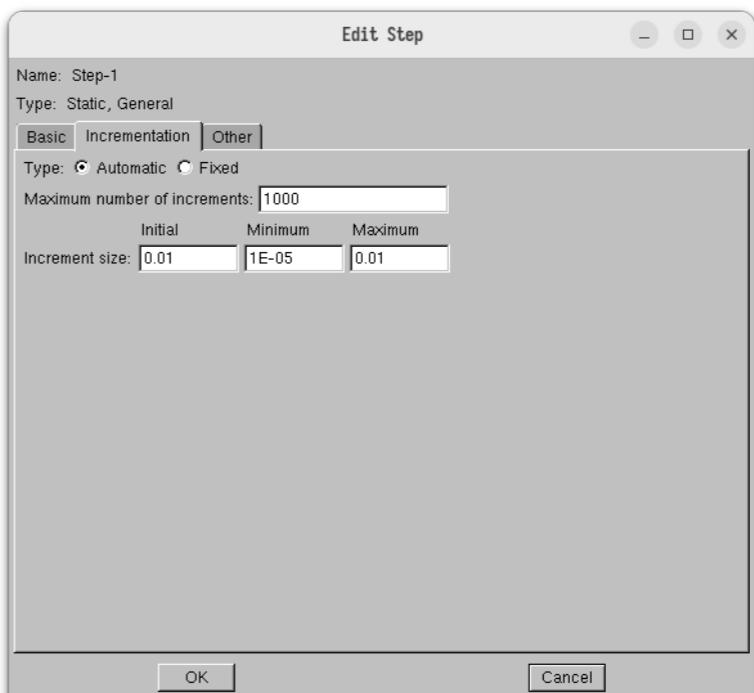
Simulation de l'essai DCB

- Modifier la matière de l'interface pour introduire l'endommagement : *Mechanical > Damage for Traction-Separartion Law > Maxs Damage*, puis *Suboptions > Damage Evolution > Energy/Linear*.



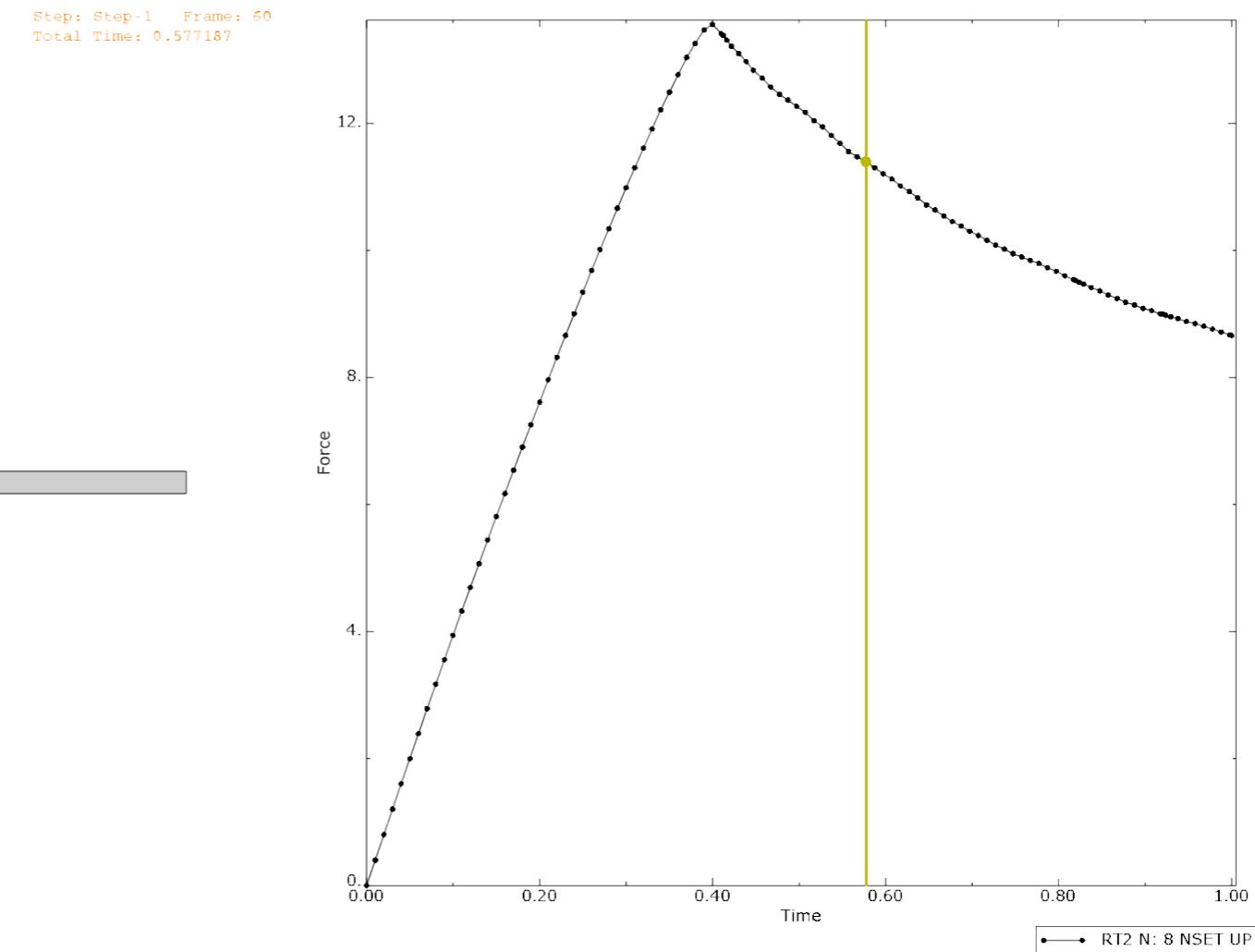
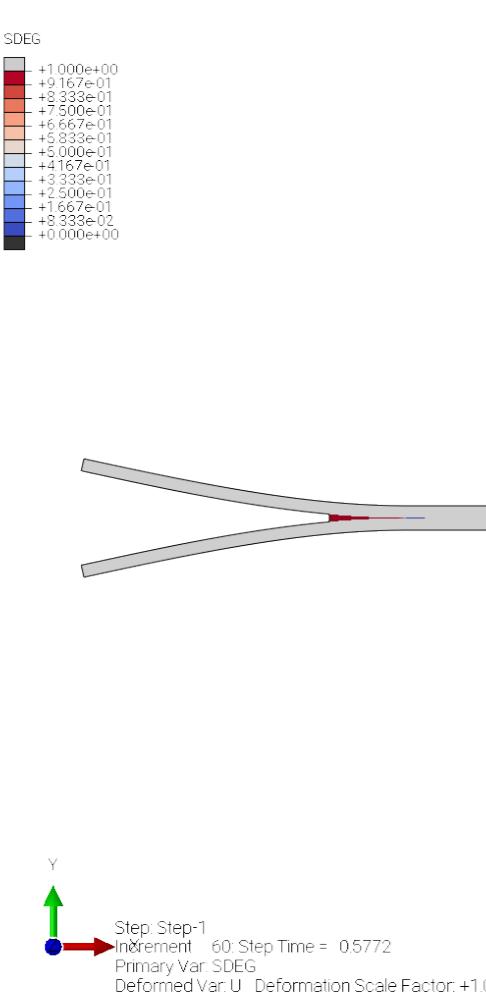
Simulation de l'essai DCB

- Modifier les incrémentations de temps du *Step-1* ($\Delta t_{ini} = 0.01$, $\Delta t_{max} = 0.01$) et augmenter la nombre d'incrémentations max. à 1000.
- Modifier le *Field Output Request* pour inclure la variable d'endommagement *SDEG* des zones cohésives.
- Créer un *History Output Request* pour sortir le déplacement U2 et la force de réaction RF2 d'un des noeuds où est appliqué le déplacement.
- Puis lancer la simulation non-linéaire

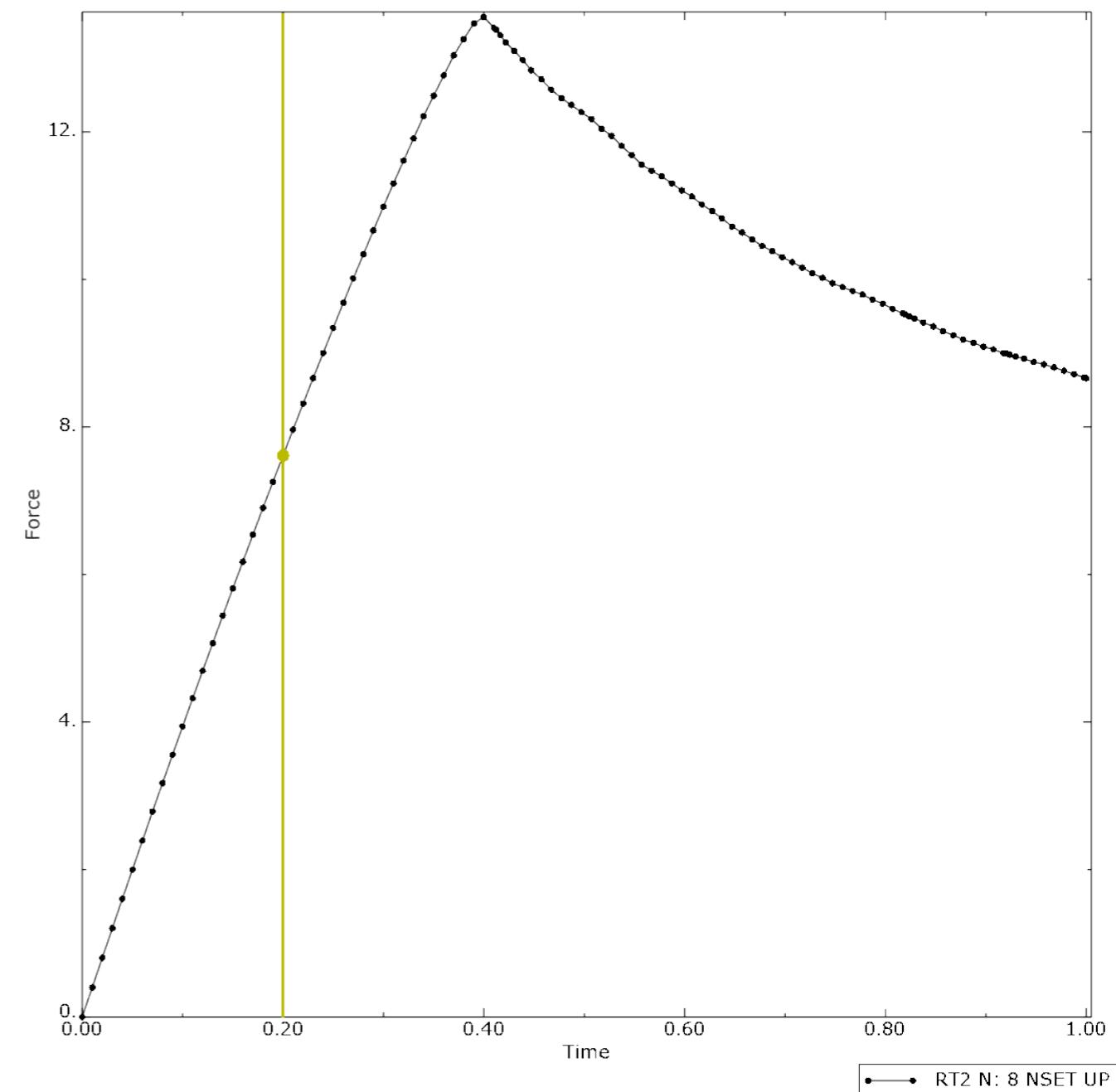
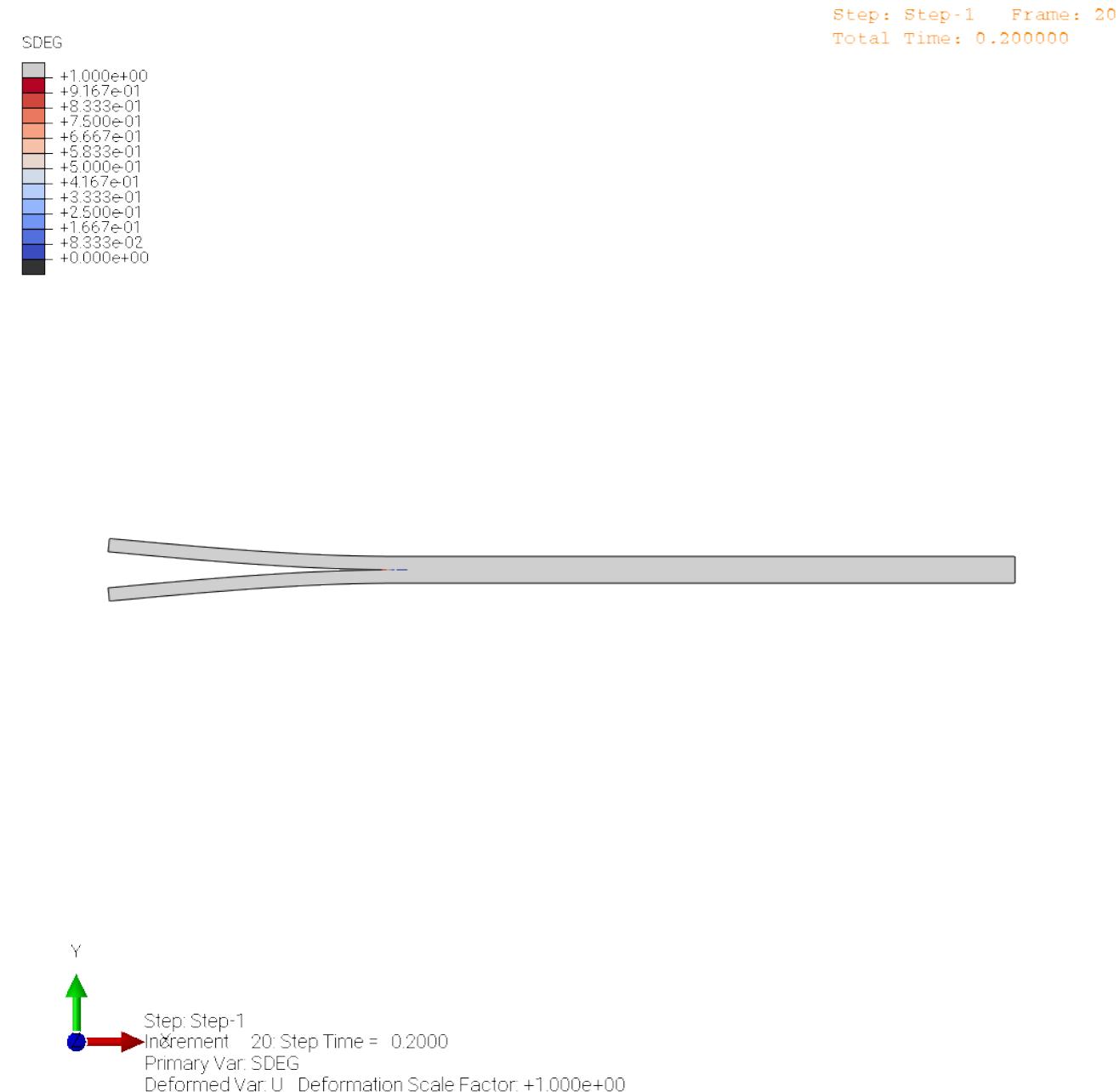


Simulation de l'essai DCB

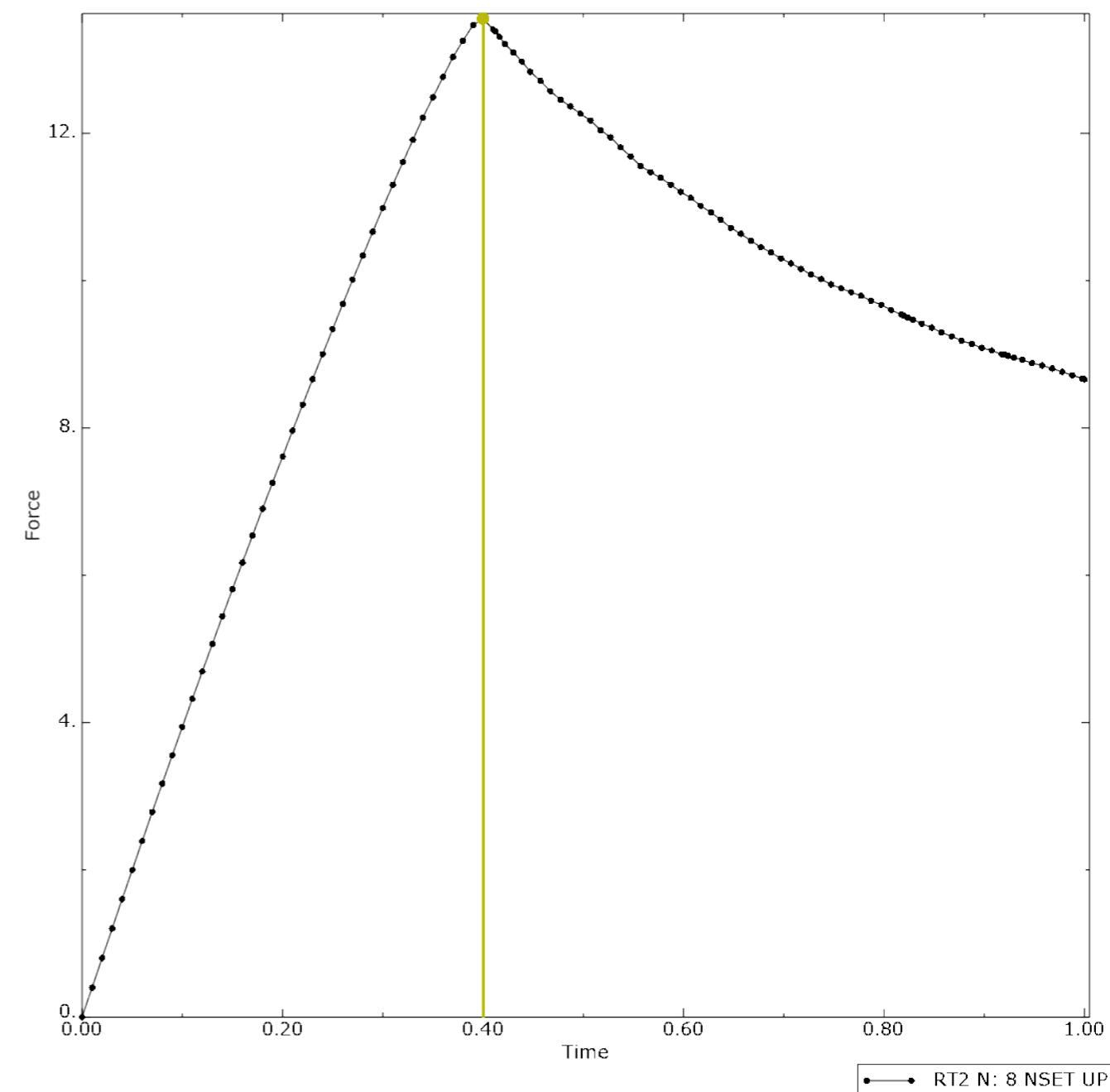
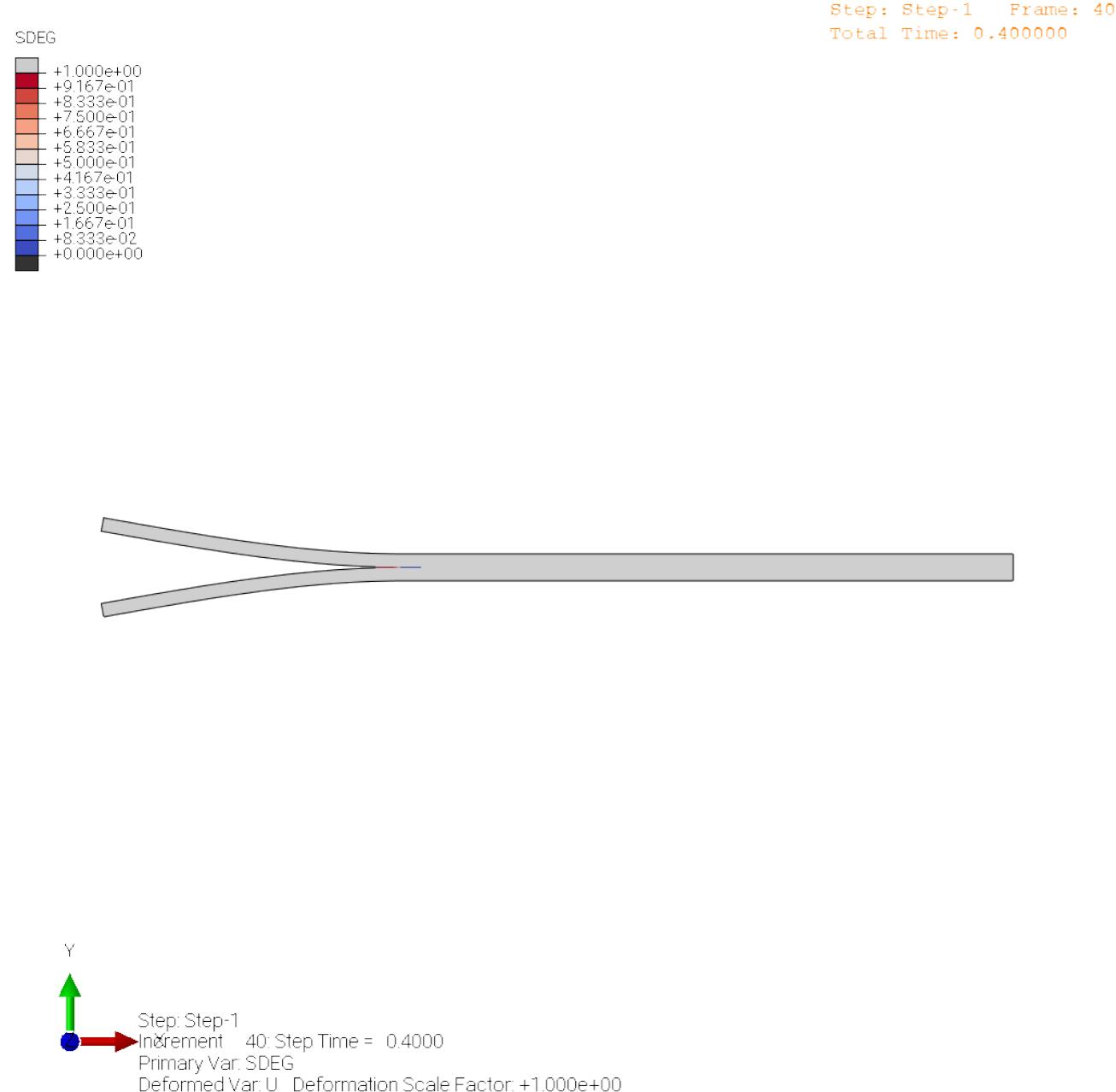
- **Q4** Observer la propagation de la pré-entaille, et la décohésion progressive de l'interface à travers l'endommagement des éléments CZM (*SDEG*).
- **Q5** Tracer la courbe force/déplacement $RF2 = f(U2)$.



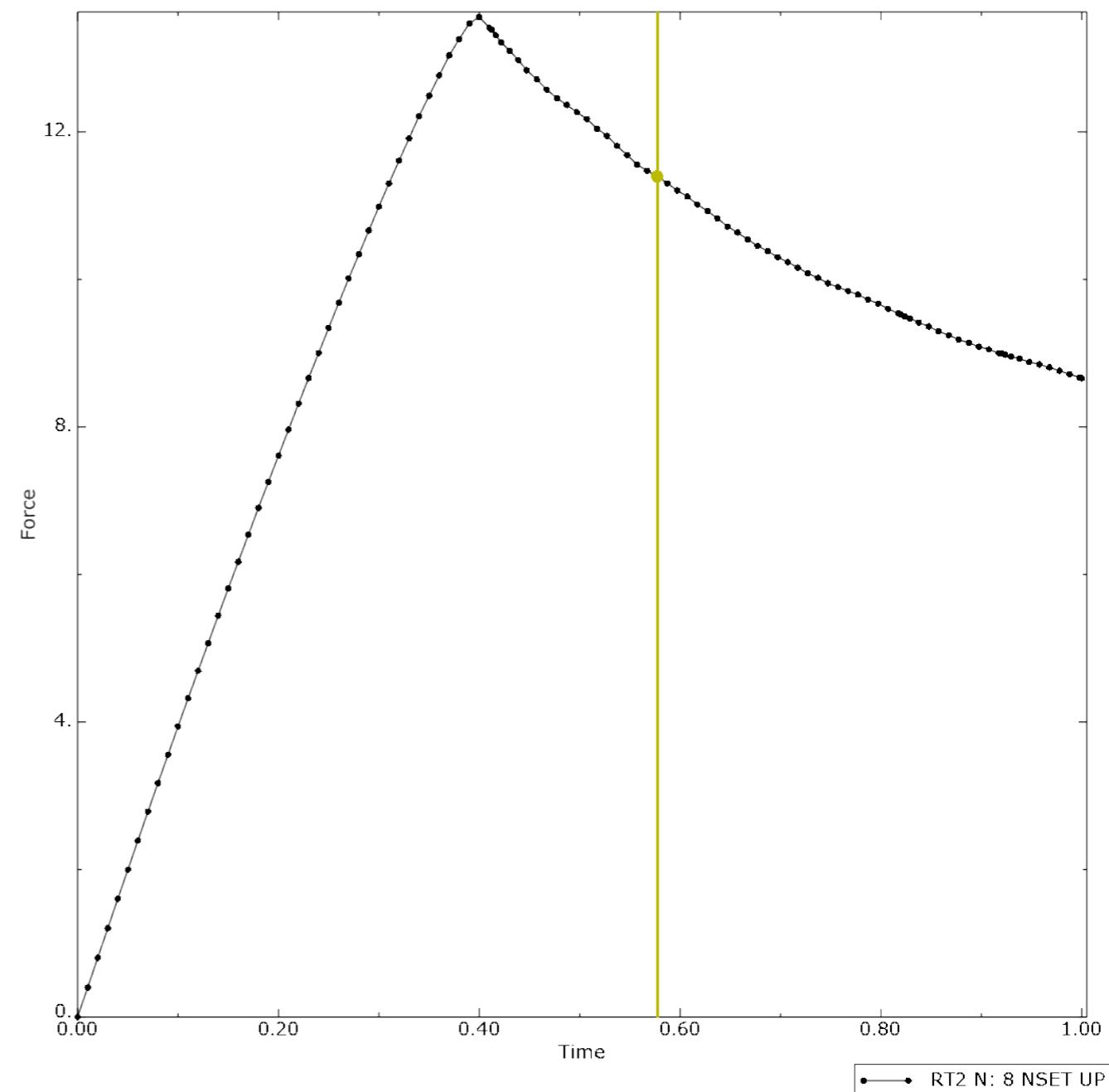
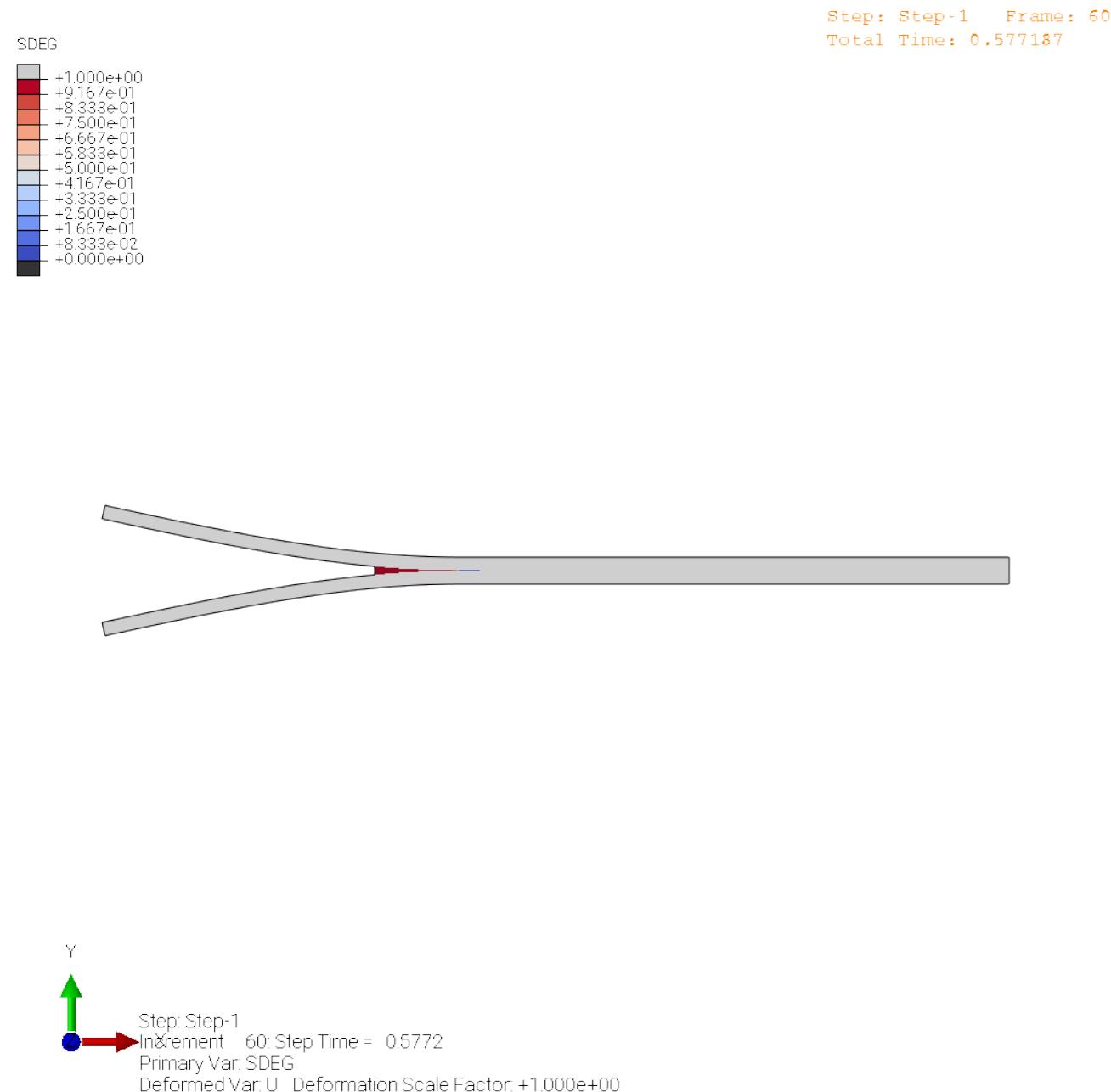
Simulation de l'essai DCB



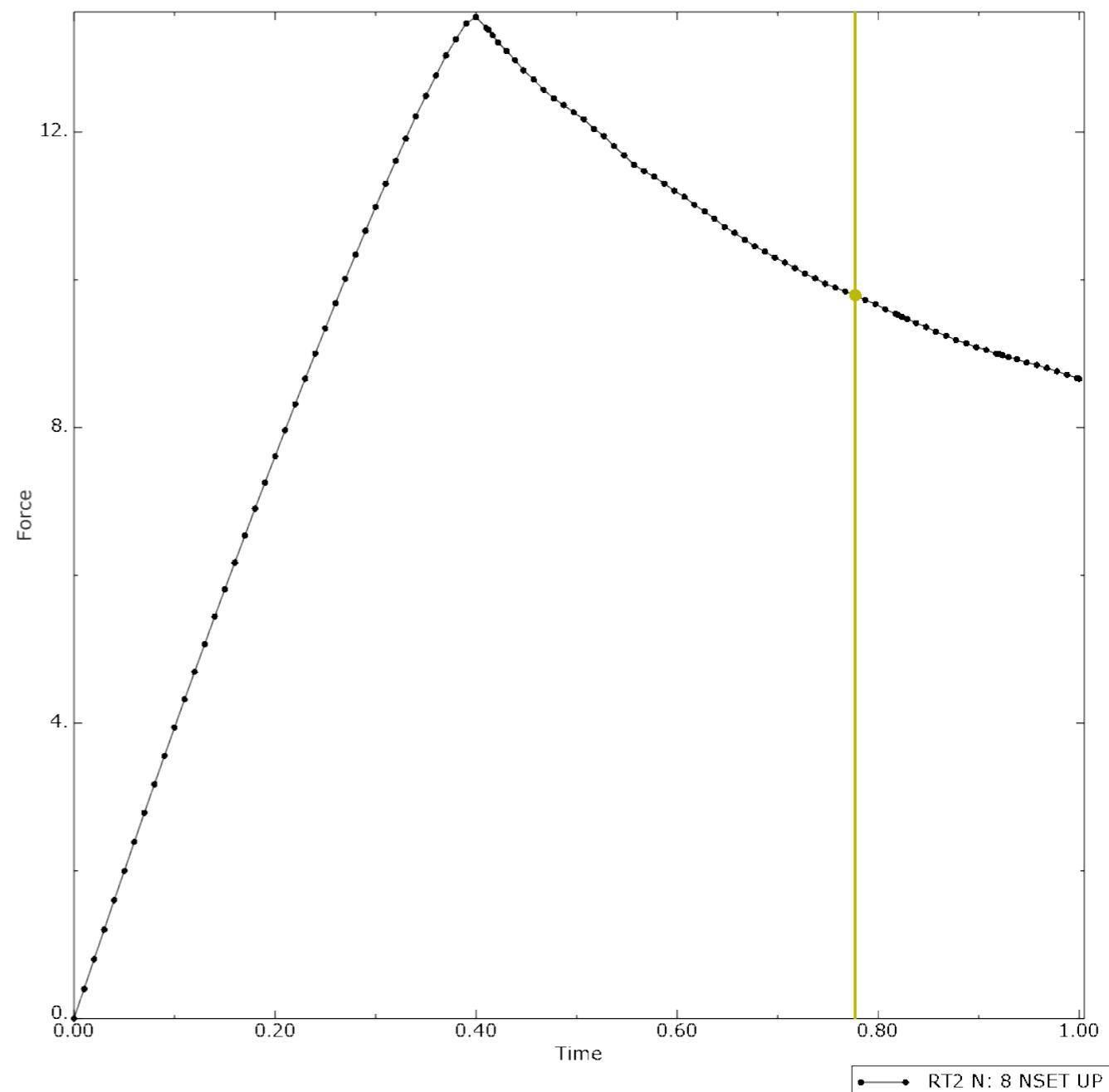
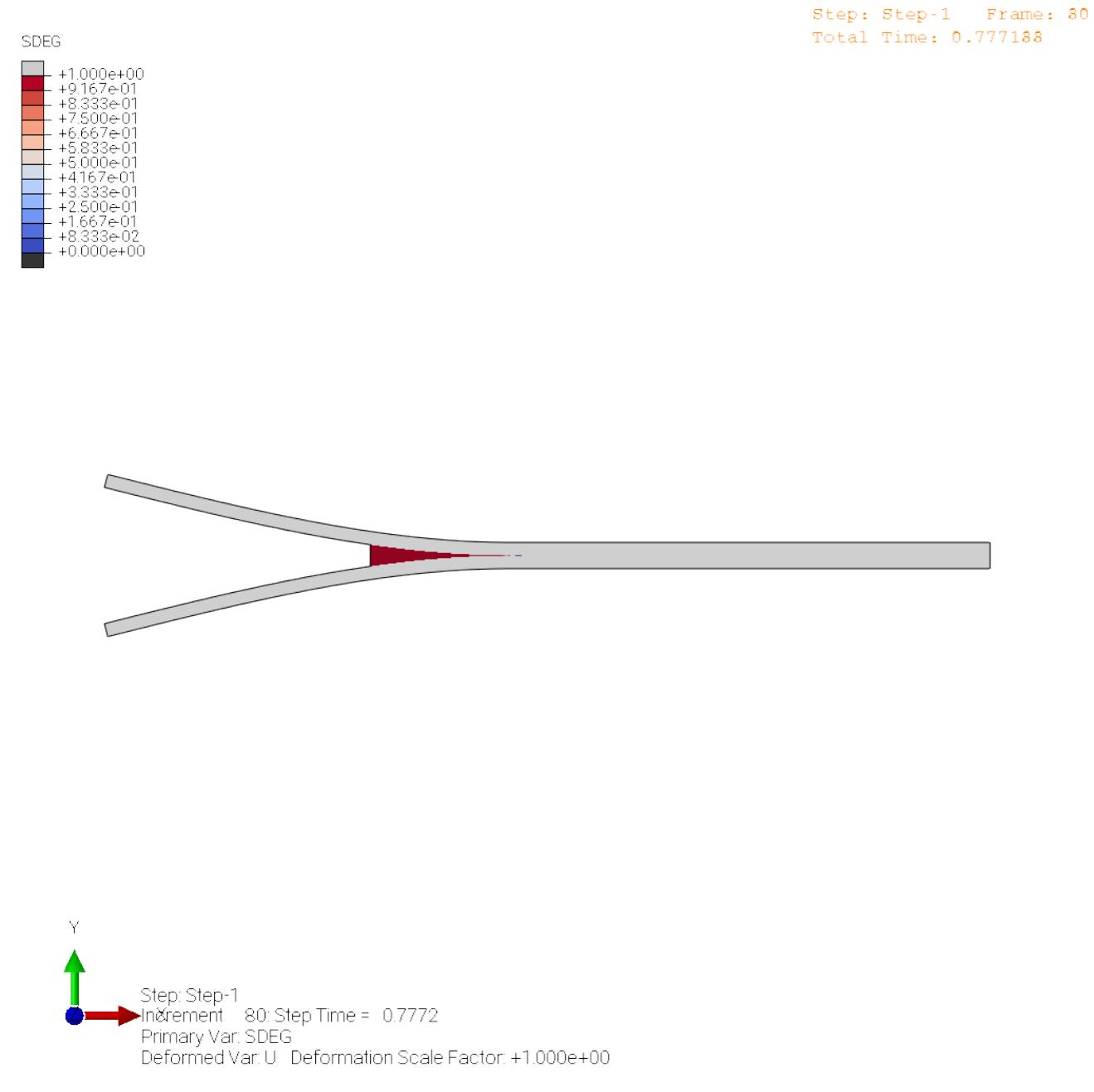
Simulation de l'essai DCB



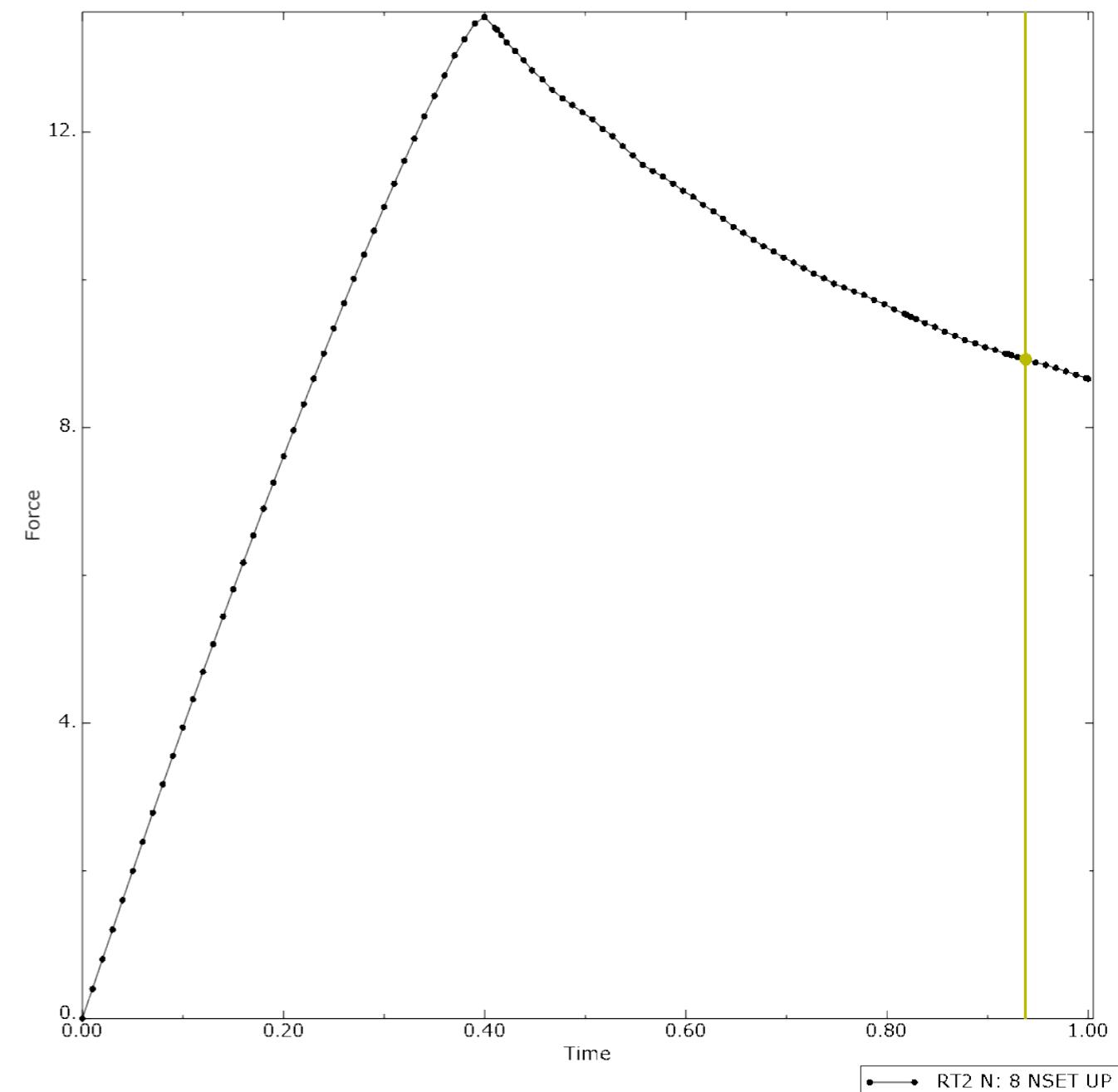
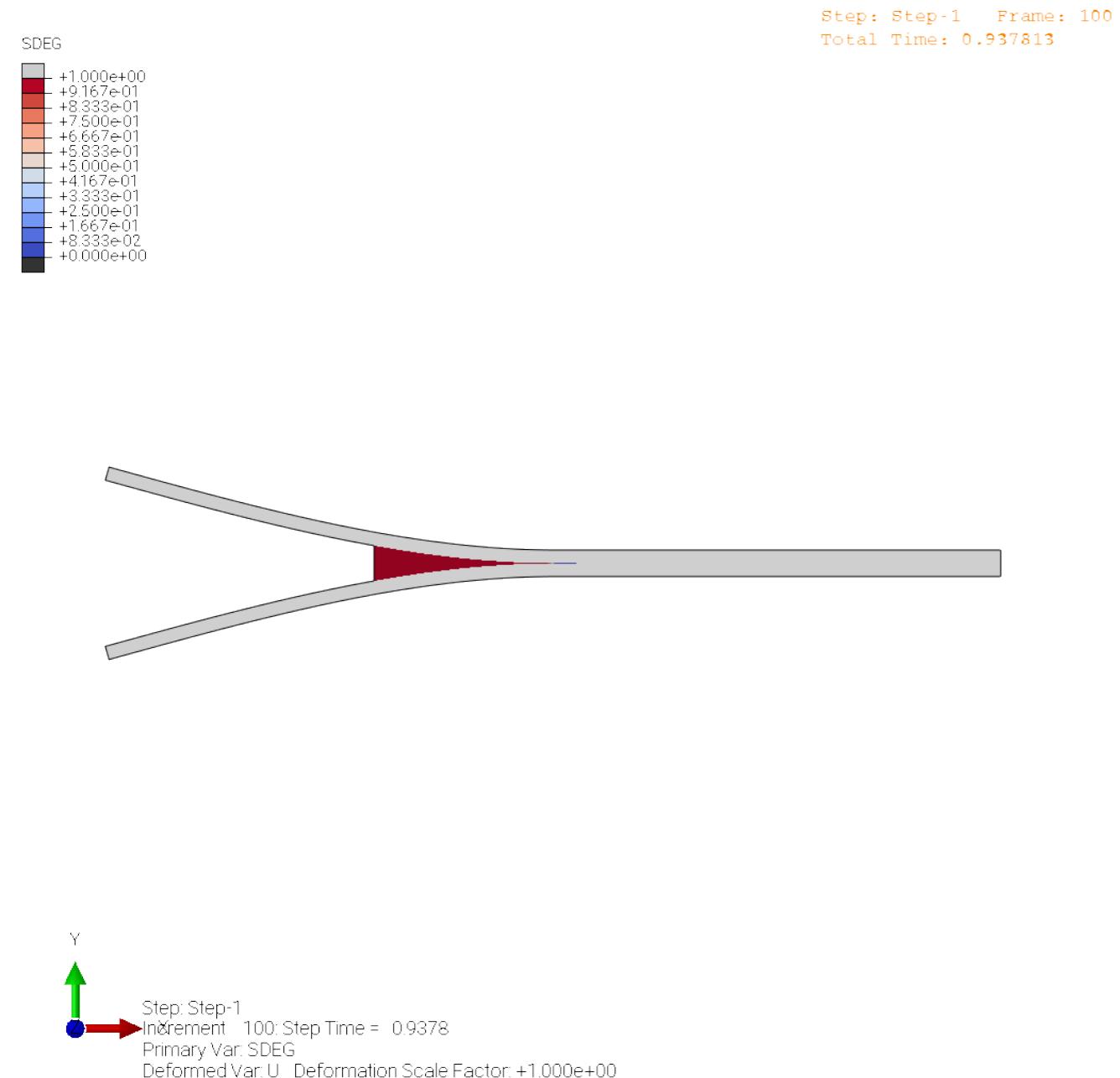
Simulation de l'essai DCB



Simulation de l'essai DCB



Simulation de l'essai DCB



Simulation de l'essai DCB

- **Q6** Comparer le résultat de la simulation avec les formules analytiques disponibles pour la partie élastique et la partie propagation

