



Matériaux et structures composites

Modélisation des composites stratifiés – TP3

Guillaume Couégnat
couegnat@lcts.u-bordeaux.fr

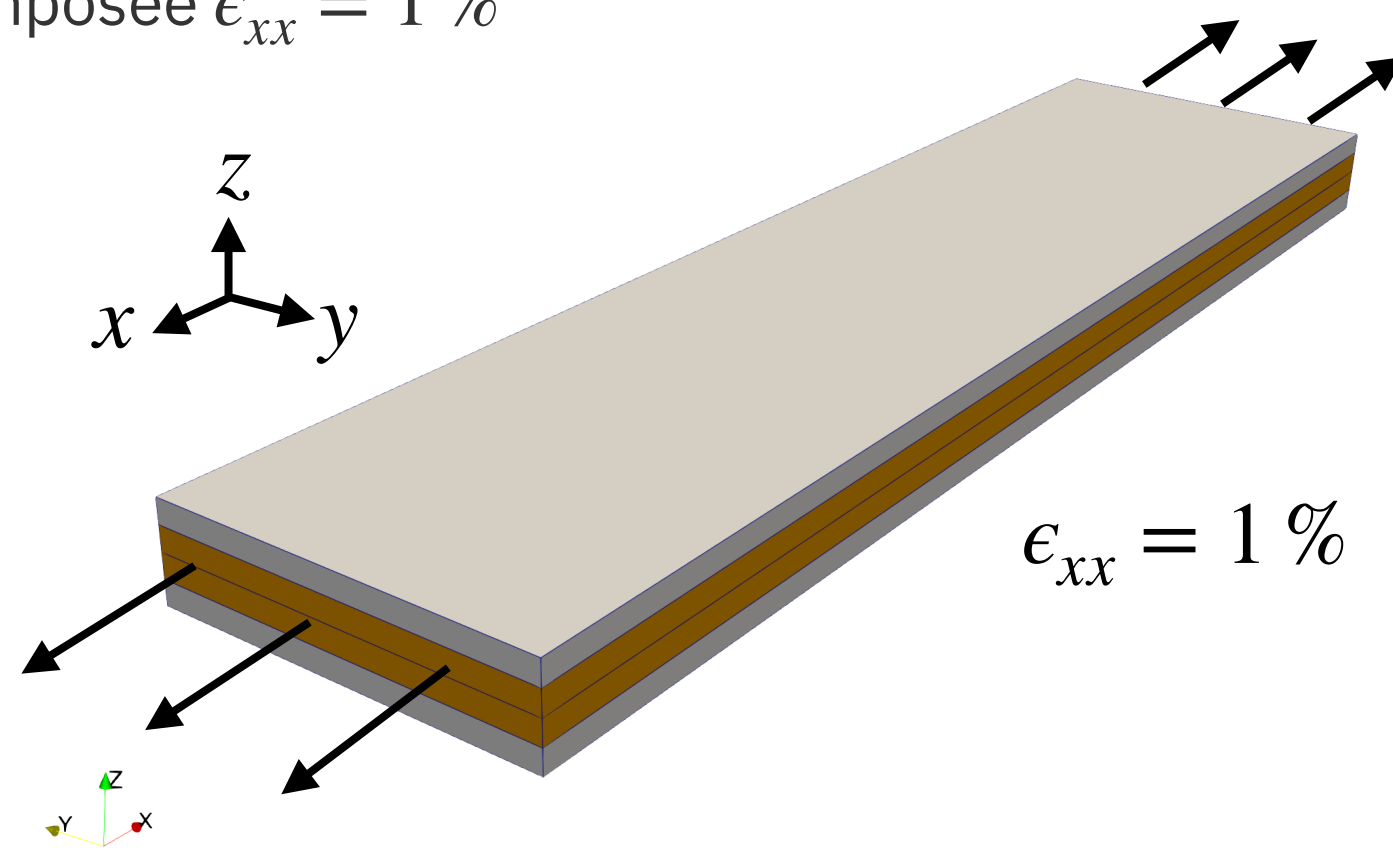
Exercice 1

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 $\epsilon_{xx} = 1 \%$



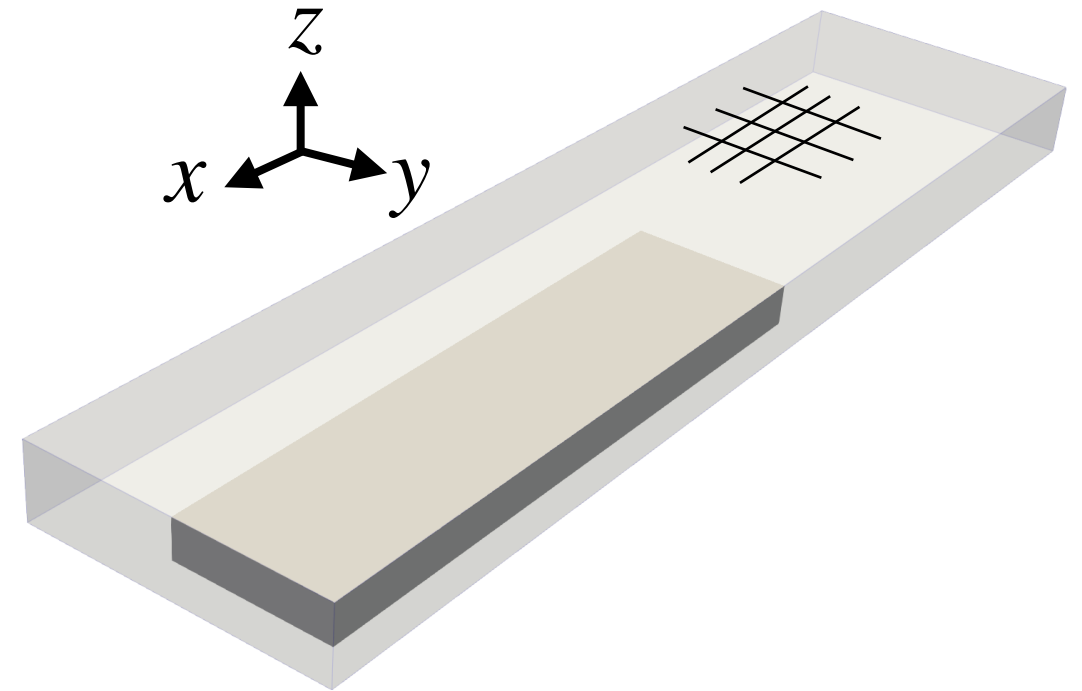
Propriétés du pli (T300/M18)

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

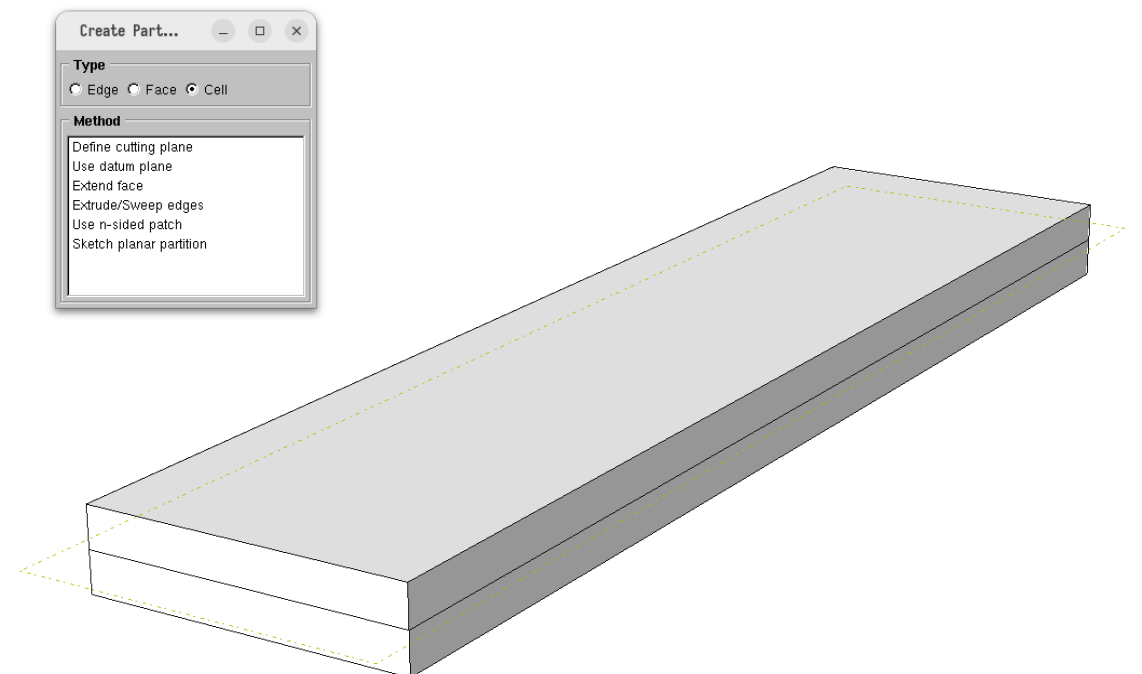
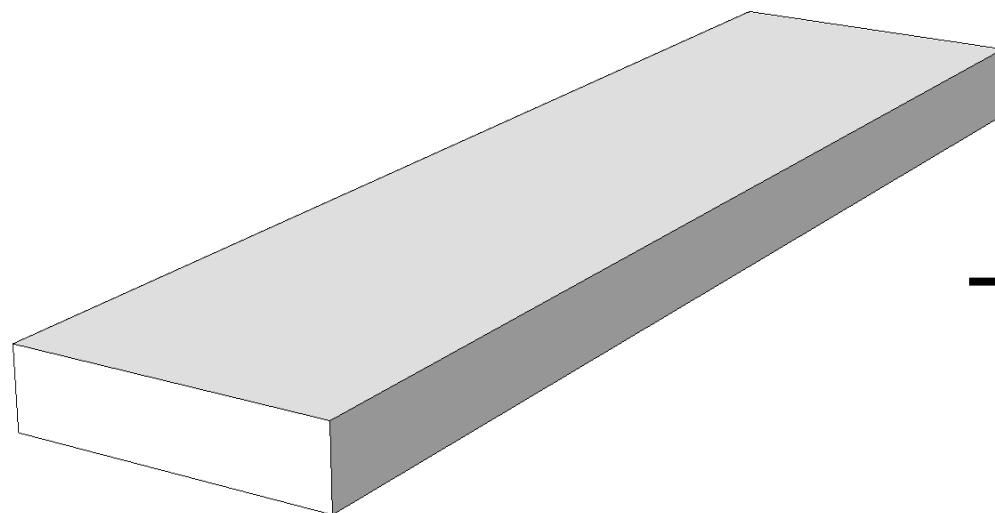
Partie 1 – Empilement $[0/90]_s$

①

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

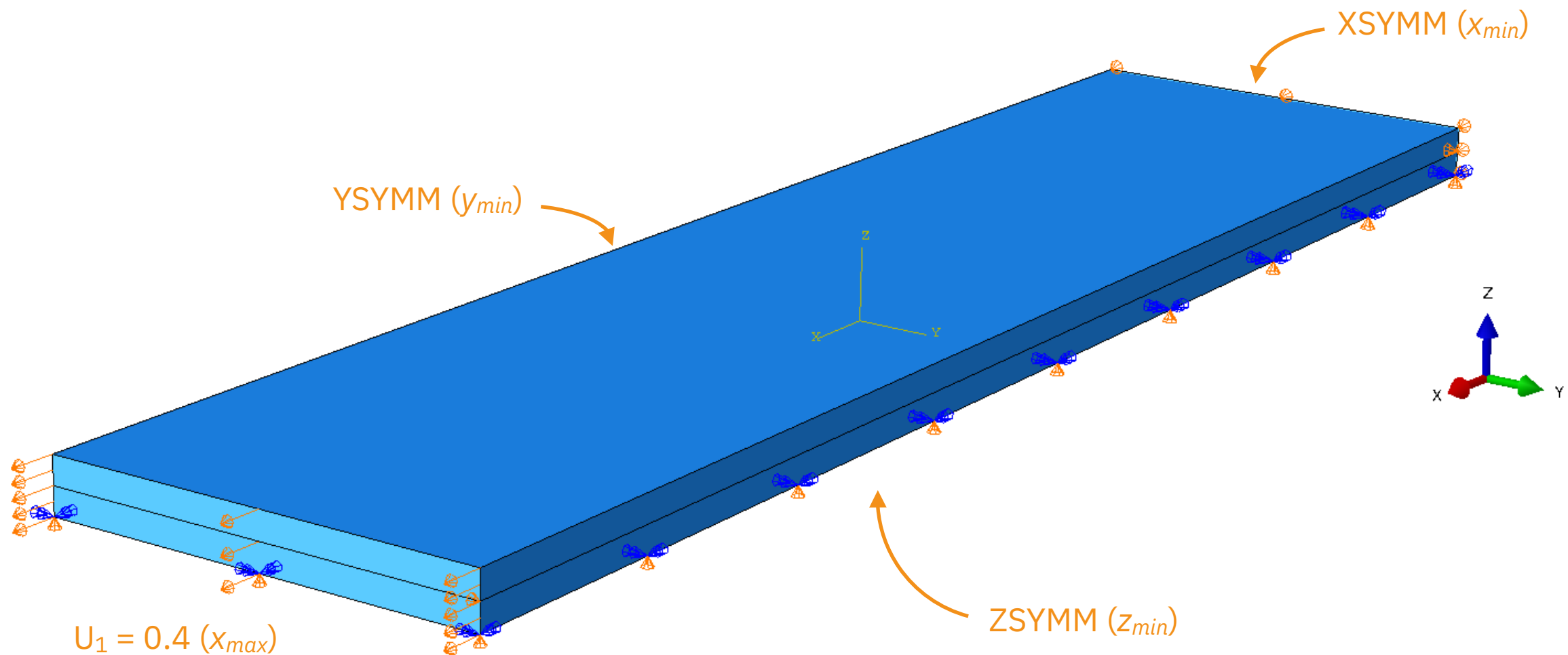
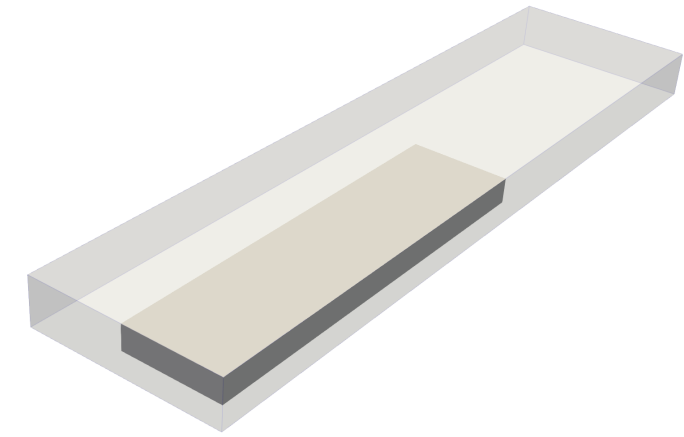


- Créer un premier modèle, puis partitionner le volume pour définir les plis à 0° et à 90°



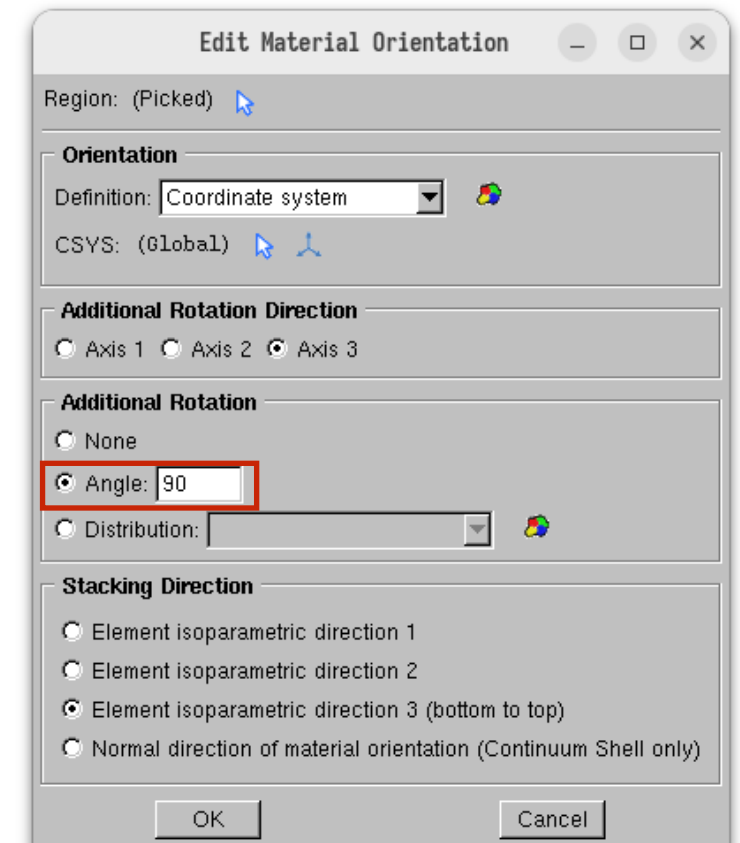
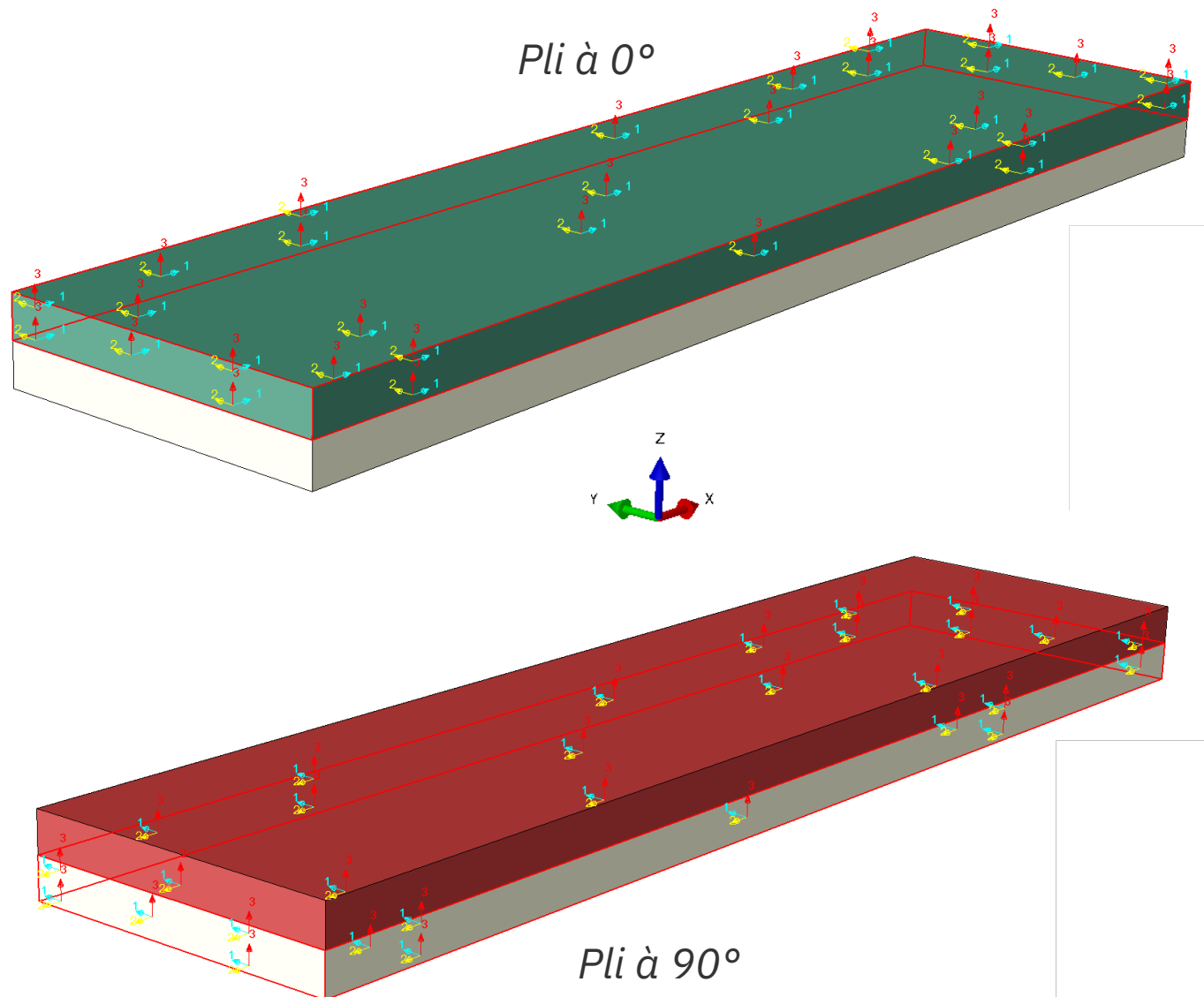
Partie 1 – Empilement $[0/90]_s$

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



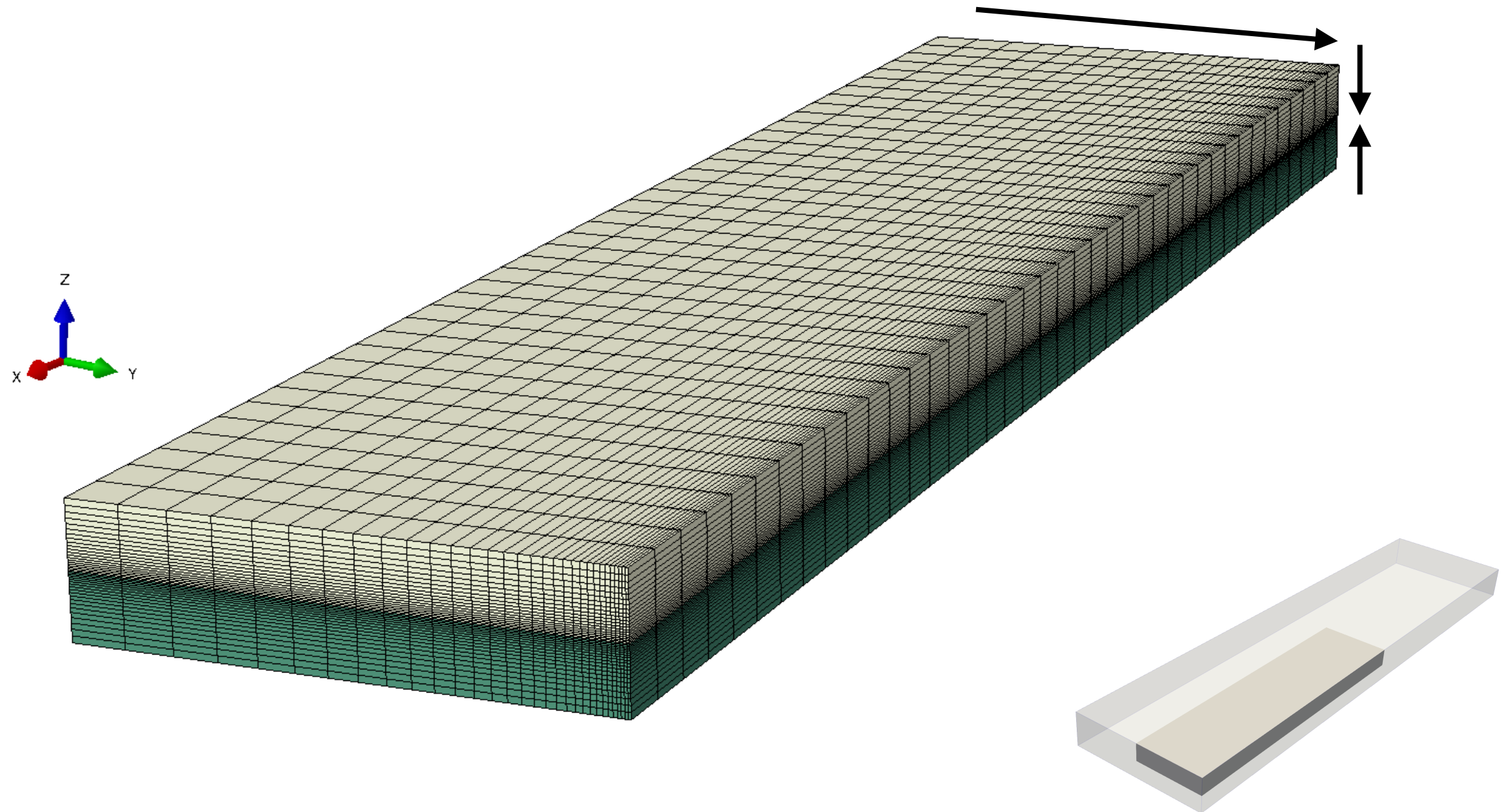
Partie 1 – *Empilement* $[0/90]_s$

- 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)



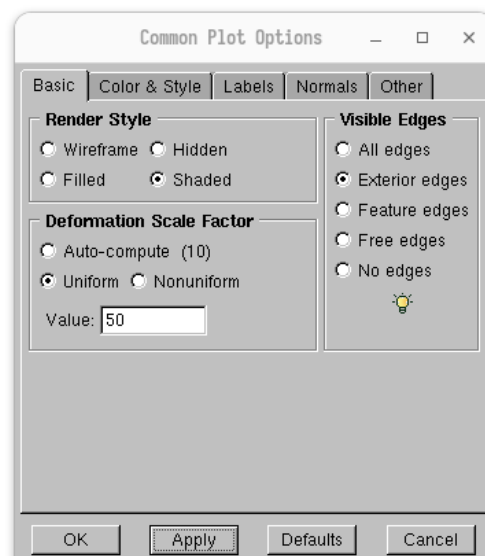
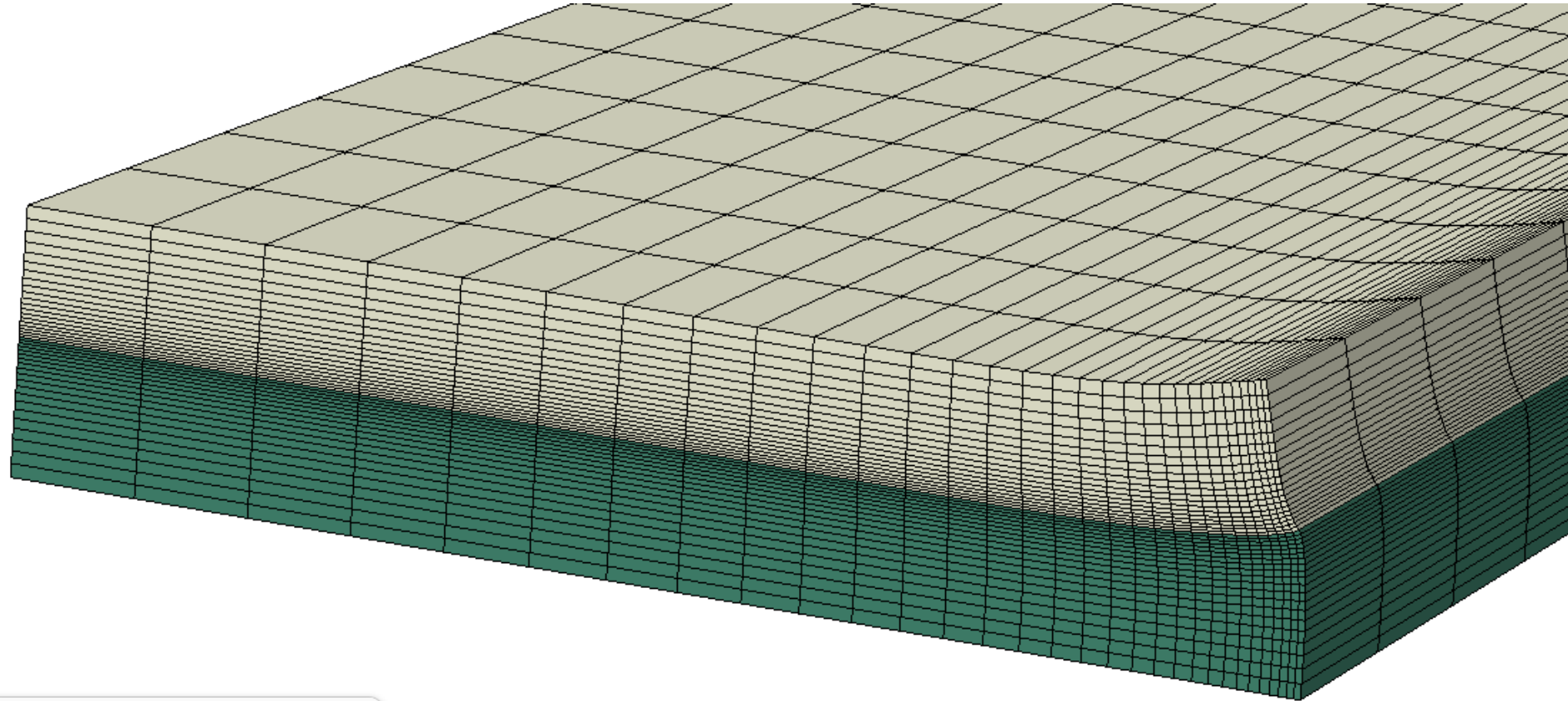
Partie 1 – *Empilement* $[0/90]_s$

- 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.

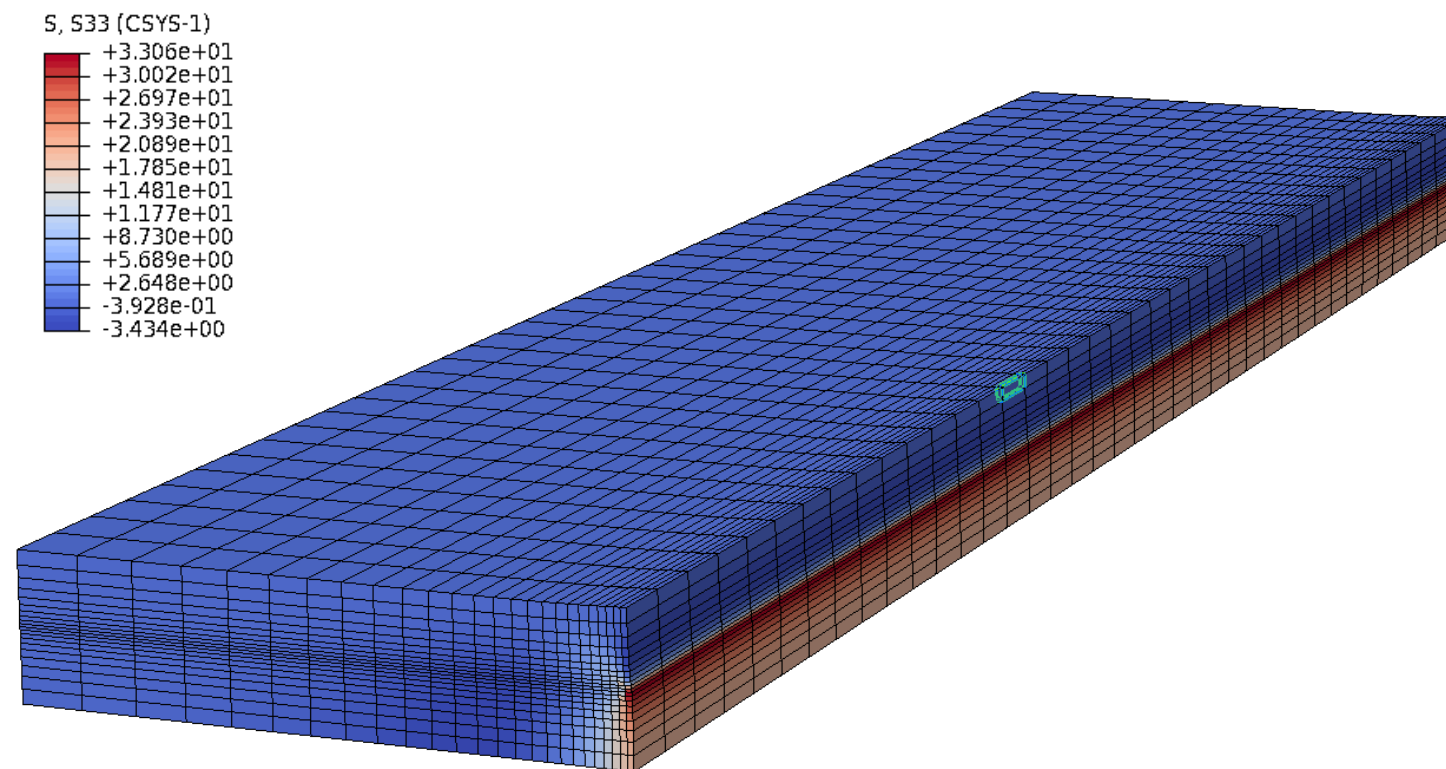


Vous pouvez augmenter le *Deformation Scale Factor* pour mieux visualiser la déformée



Partie 1 – *Empilement [0/90]_s*

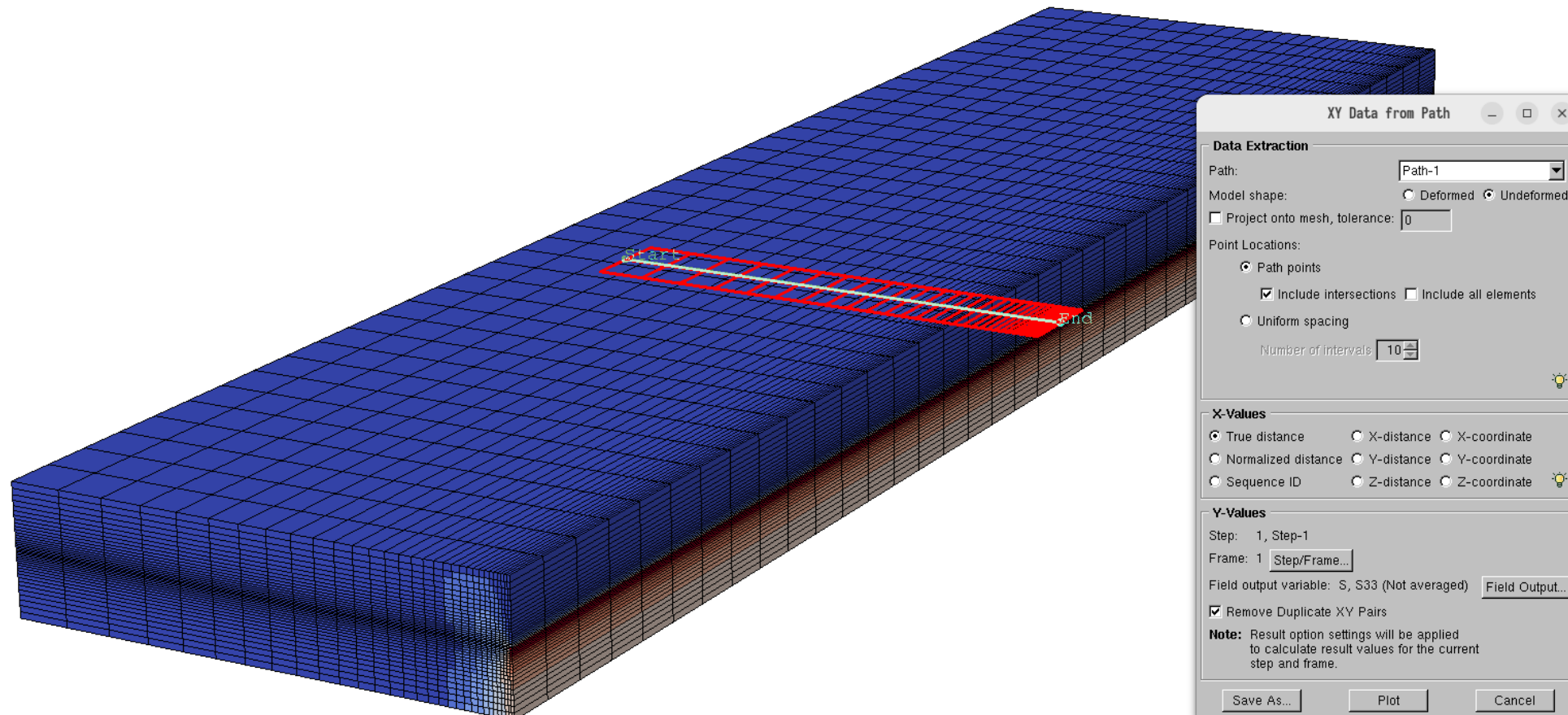
- **Q2** Afficher les contraintes hors-plan S_{33} , S_{23} , S_{13} . Attention, il faut projeter les contraintes dans un même repère (cf. Tutoriel *Projection des contraintes locales dans le repère global* – création d'un système de coordonnées).
- **Q3** Relever les niveaux de contraintes hors-plan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

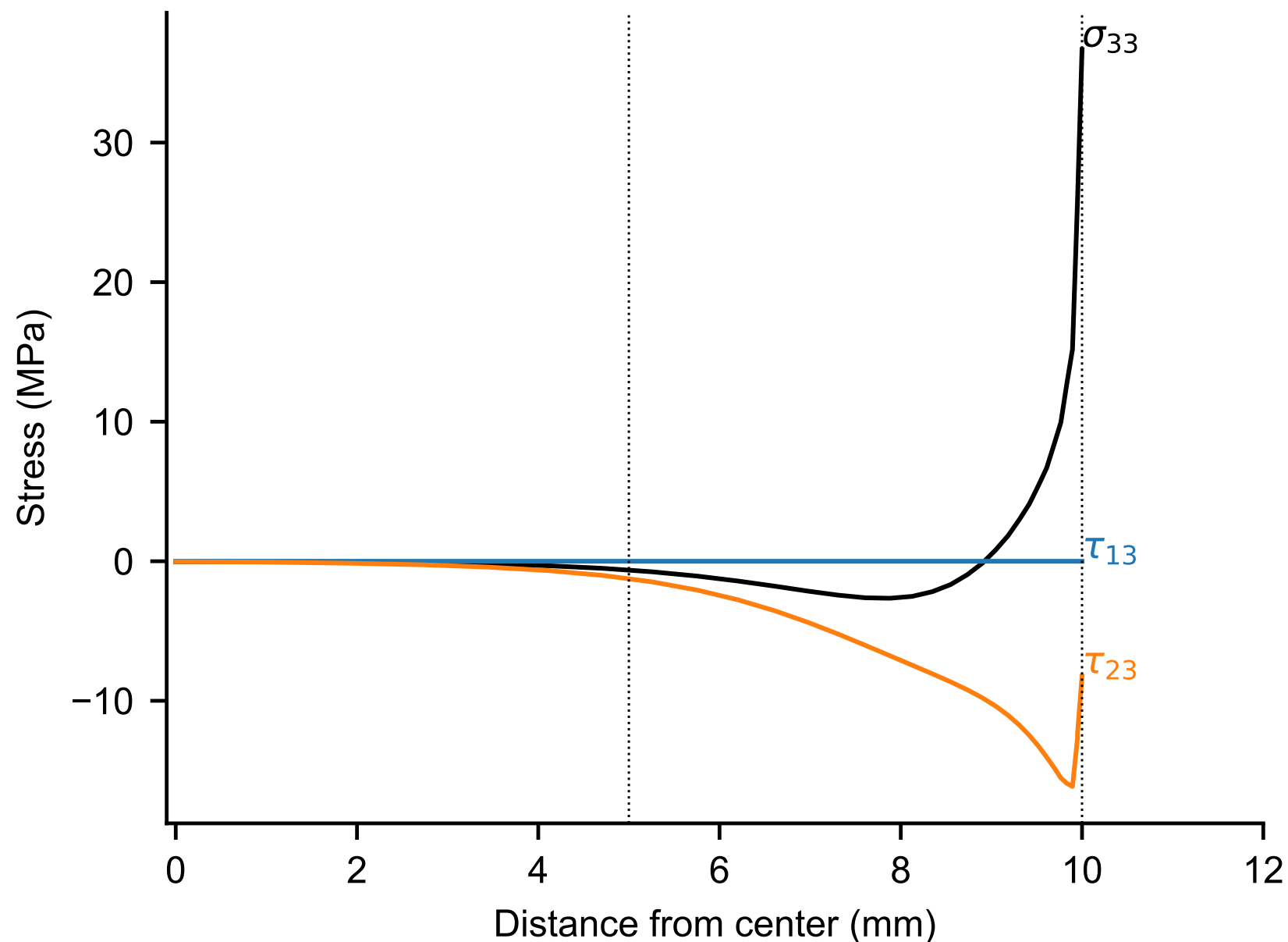


Il faut définir la *Path* très légèrement d'un côté ou de l'autre de l'interface, idéalement au milieu du premier élément au-dessus ou au-dessous de l'interface.

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.

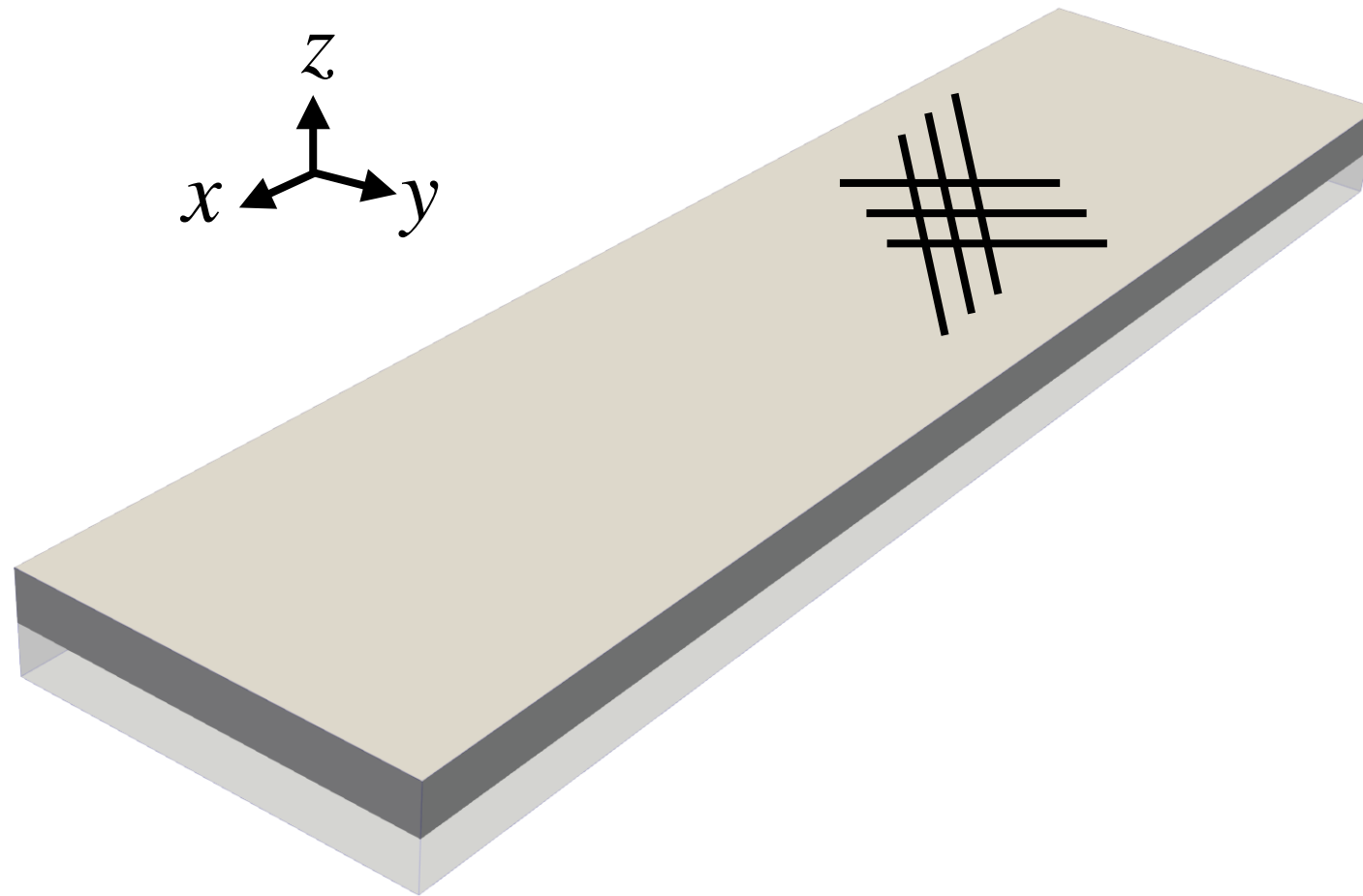
Partie 1 – *Empilement [0/90]_s*

- **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 $[+45/-45]_s$*

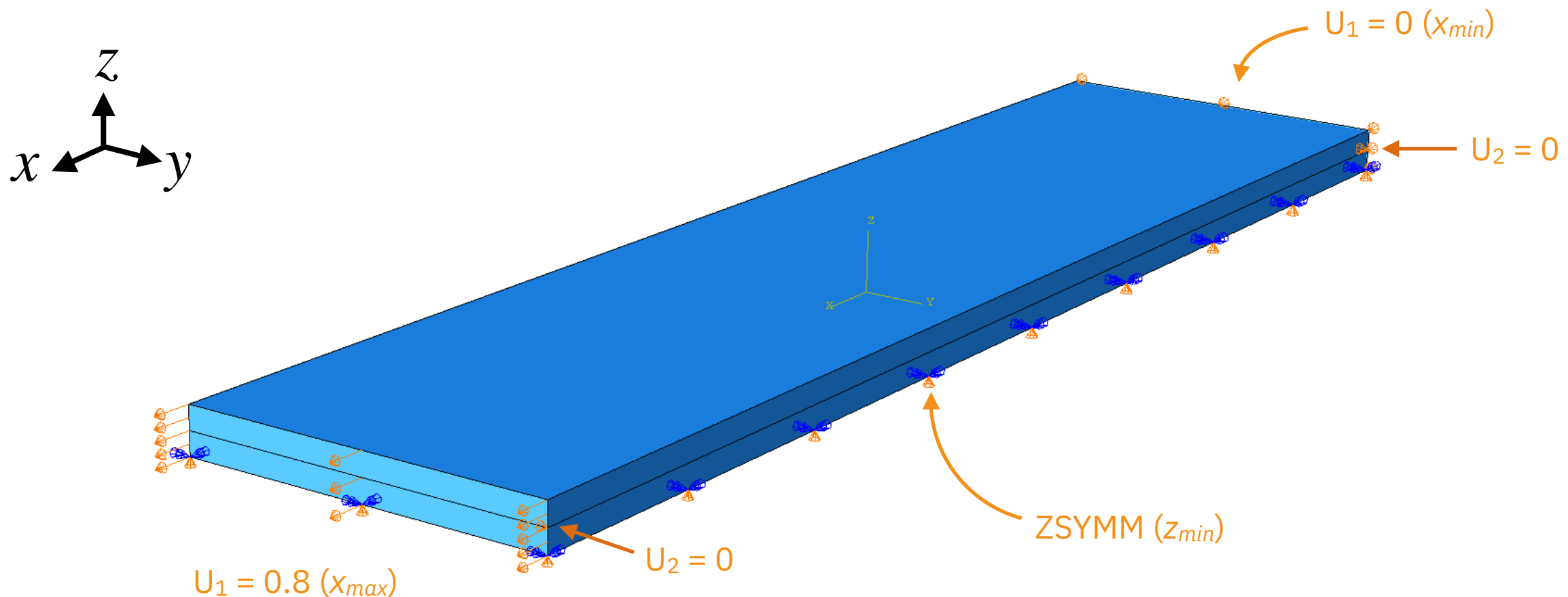
- En procédant comme précédemment, créer un nouveau modèle pour le cas $[+45/-45]_s$



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 $1/2$ de l'éprouvette dans ce cas.

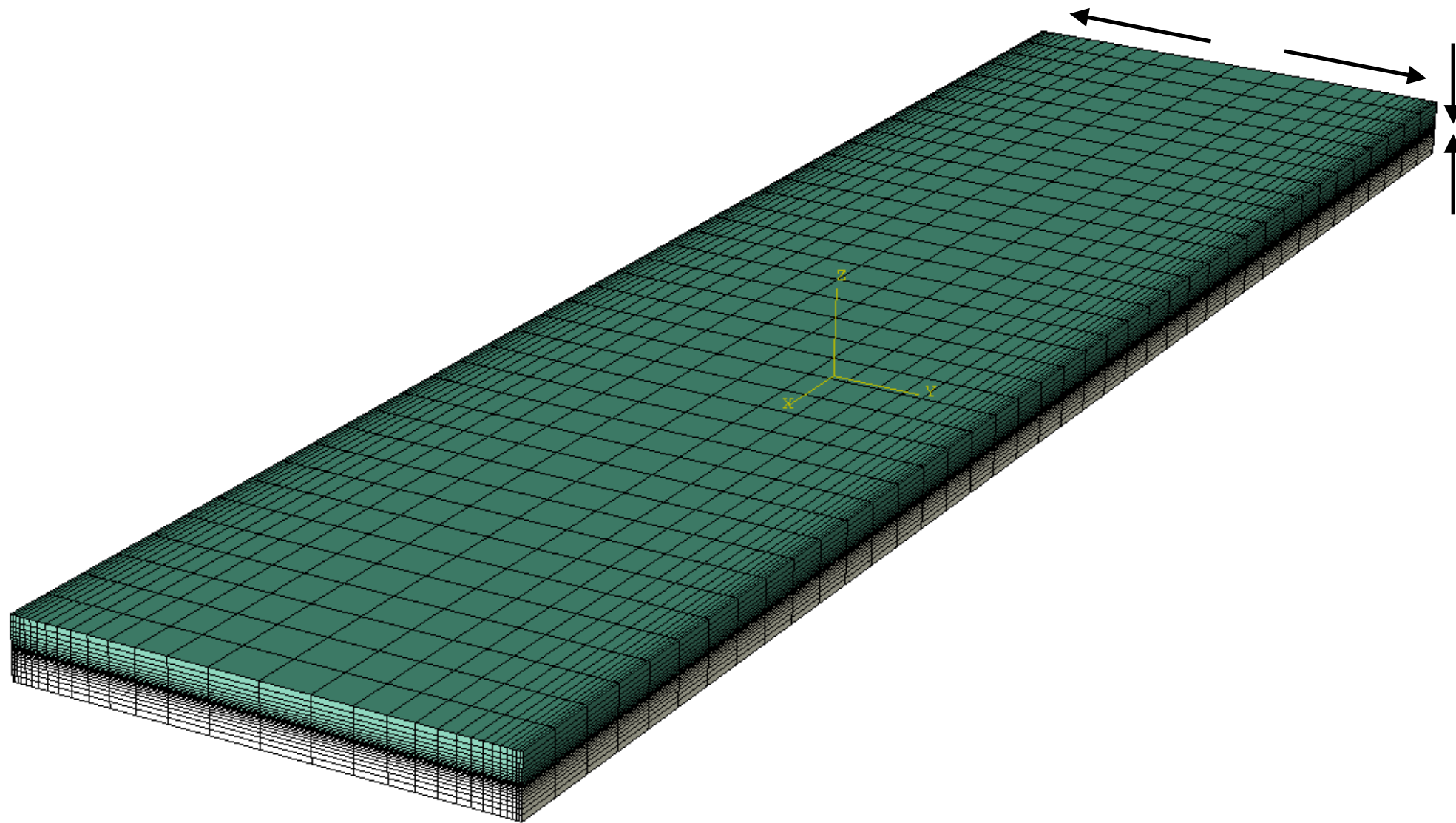
Partie 2 – Empilement $[+45/-45]_s$

- 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.



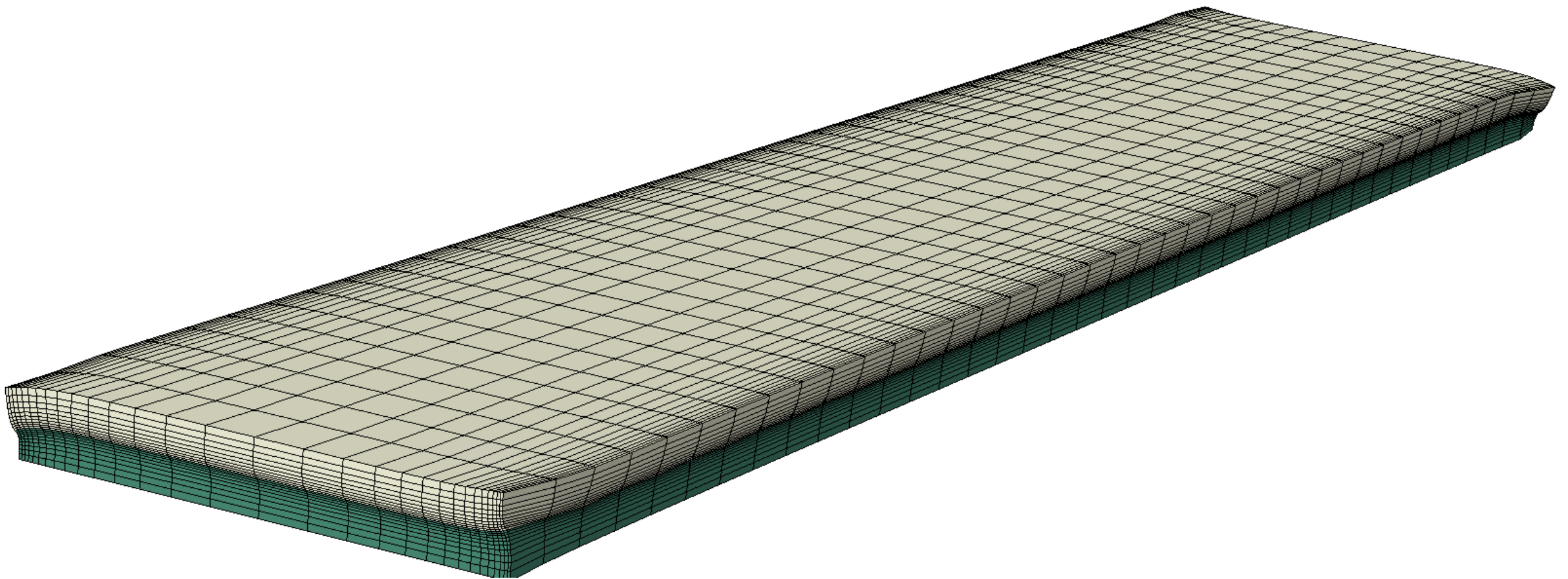
Partie 2 – *Empilement* $[+45/-45]_s$

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



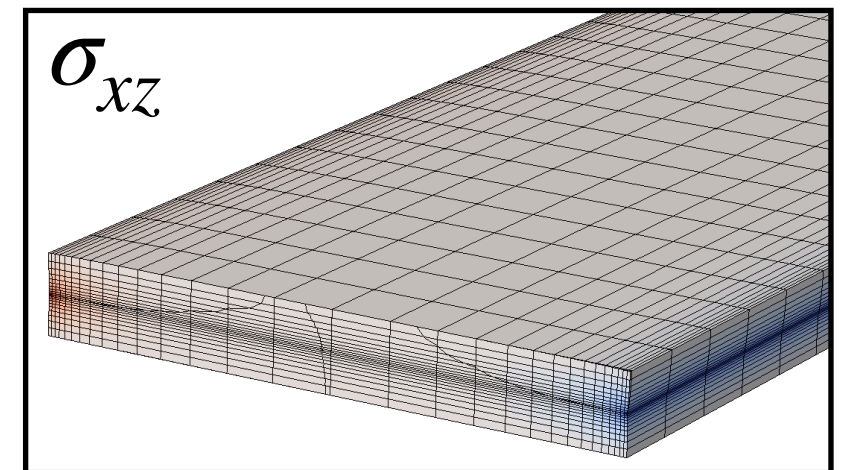
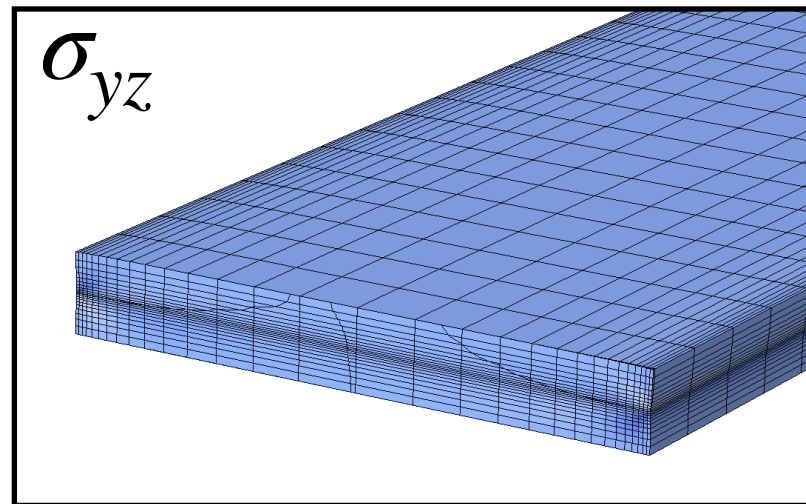
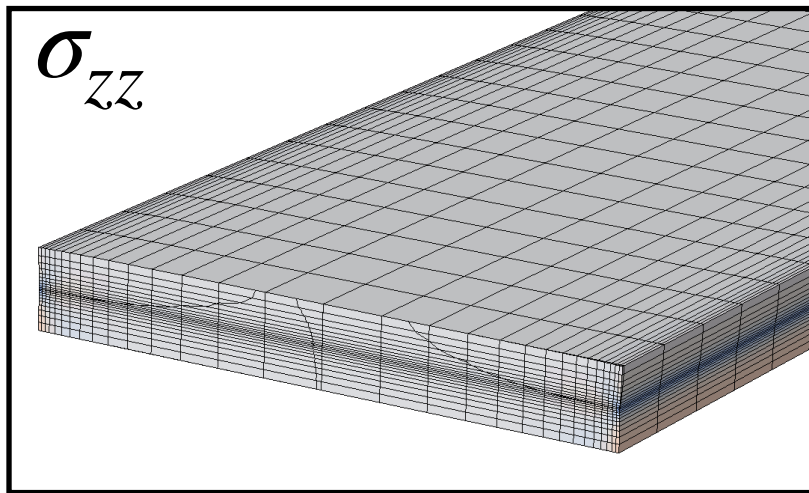
Partie 2 – *Empilement $[+45/-45]_s$*

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



Partie 2 – *Empilement [+45/-45]_s*

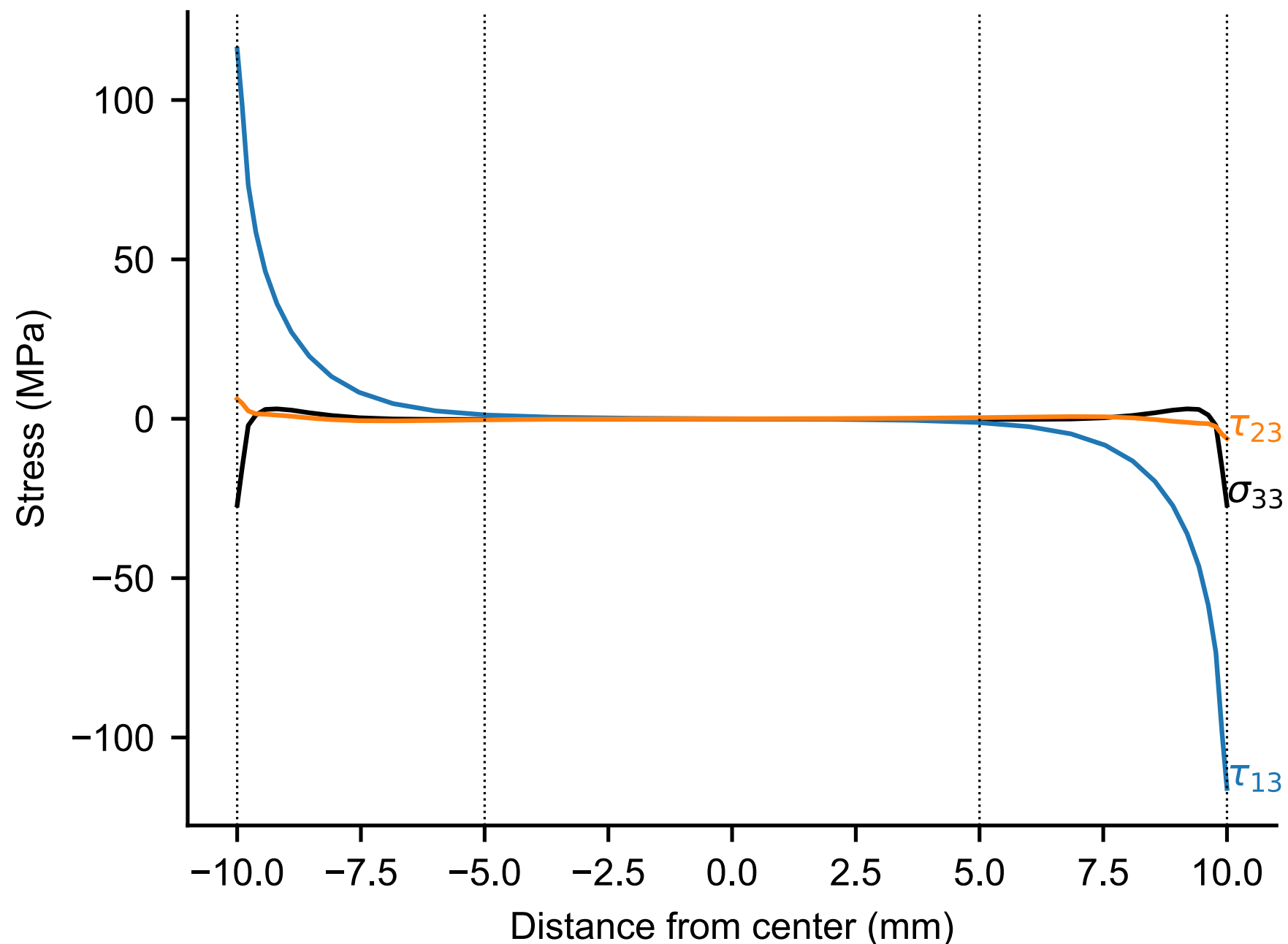
- **Q7** Comme précédemment, afficher les contraintes hors-plan et commenter leur valeur et leur localisation.



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.



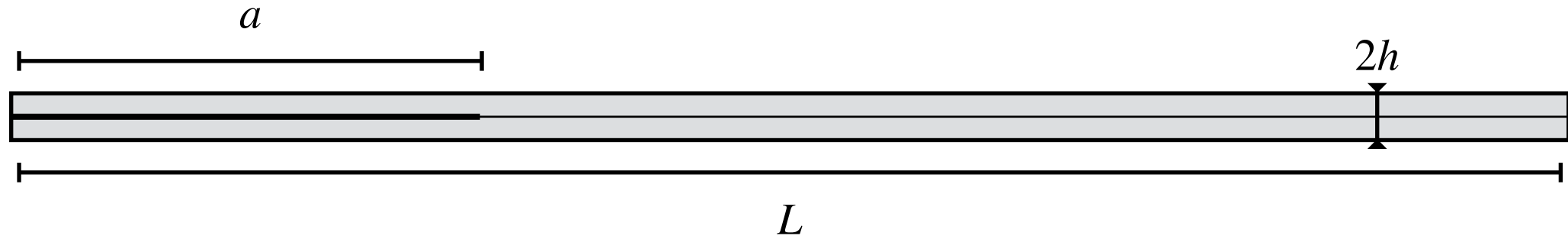
Exercice 2

Simulation d'un essai DCB

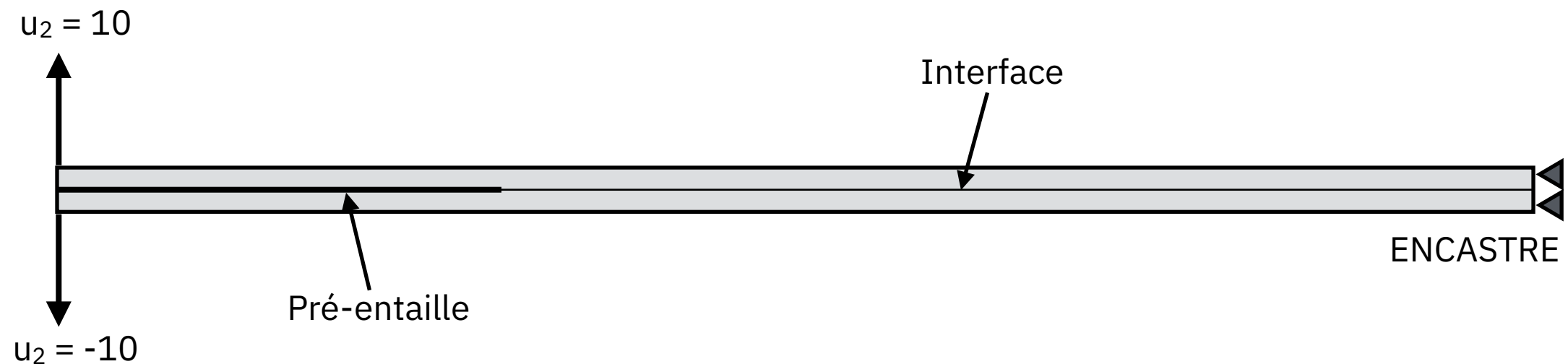
L'objectif de cet exercice est de simuler un essai DCB à l'aide d'éléments de zone cohésive

Données du problème

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

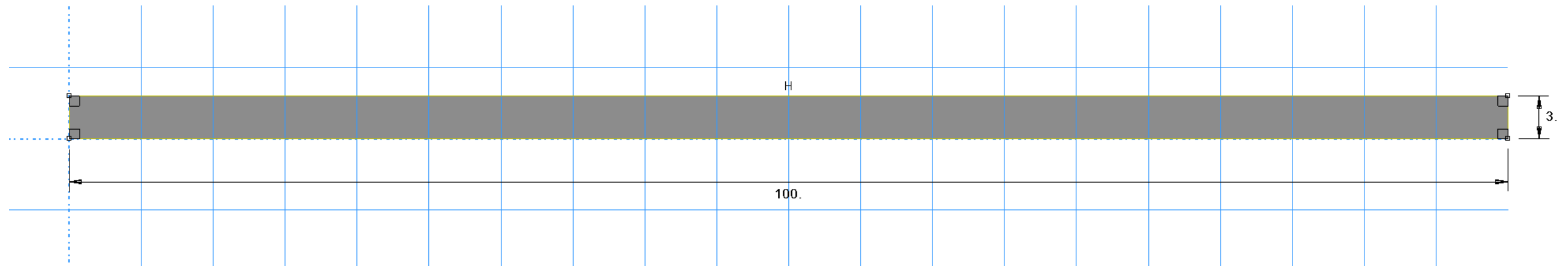


- Propriétés des plis : élastique isotrope $E = 120$ GPa, $\nu = 0.2$
- Propriétés CZM : K à définir, $\sigma_c = 100$ MPa, $G_c = 5$ mJ/mm²

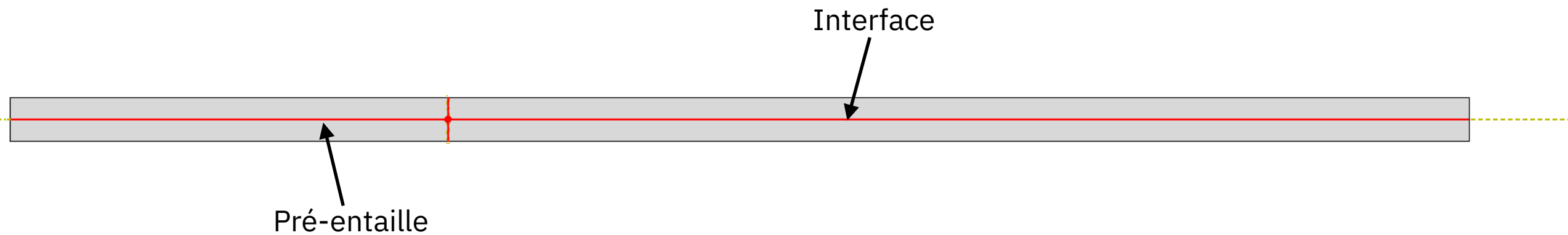


Création du modèle

- Commencer par dessiner l'éprouvette

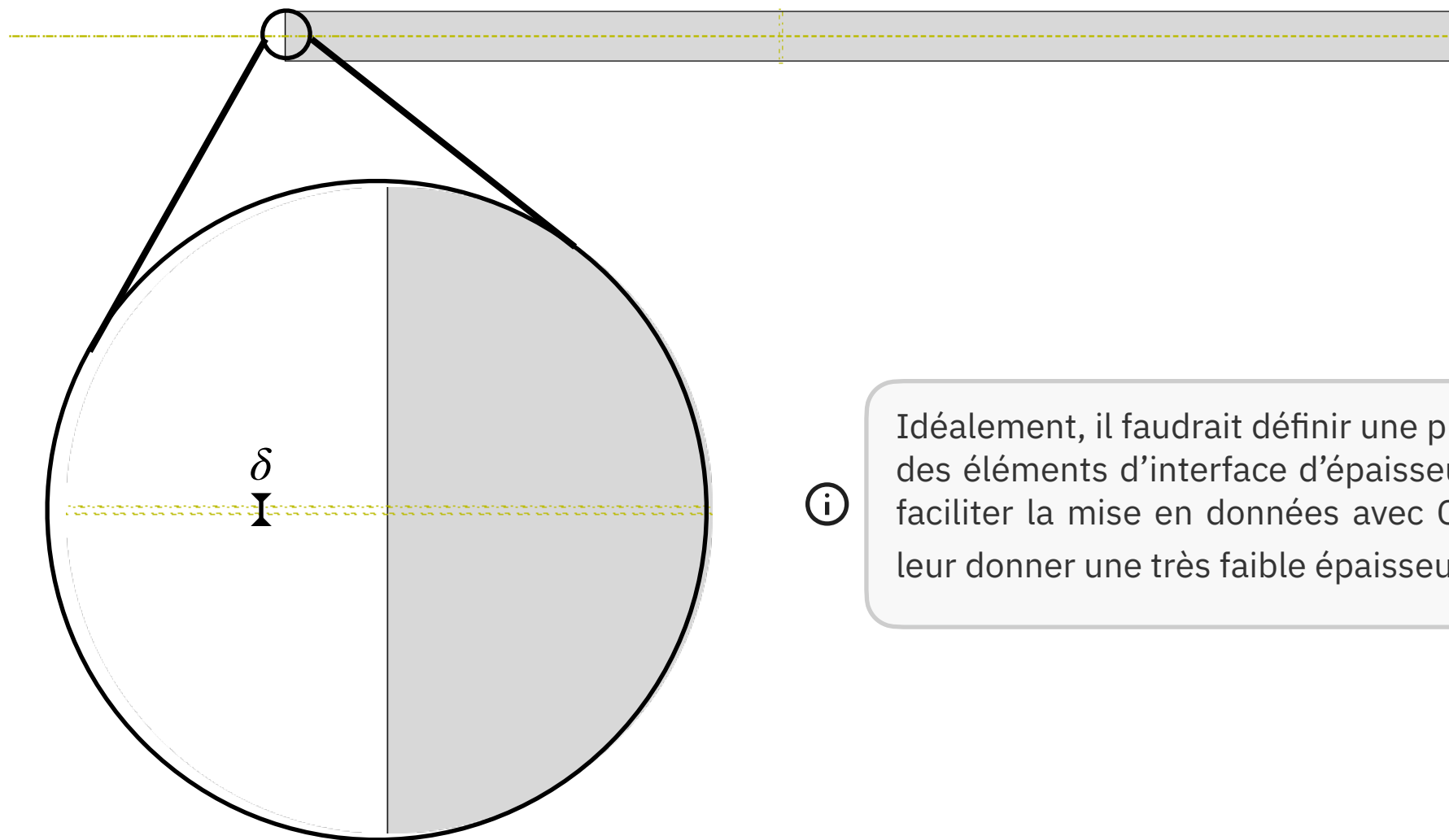
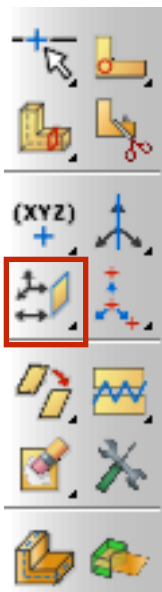


- On va ensuite partitionner et modifier le modèle pour créer la pré-entaille, ainsi que les éléments d'interface



Création du modèle

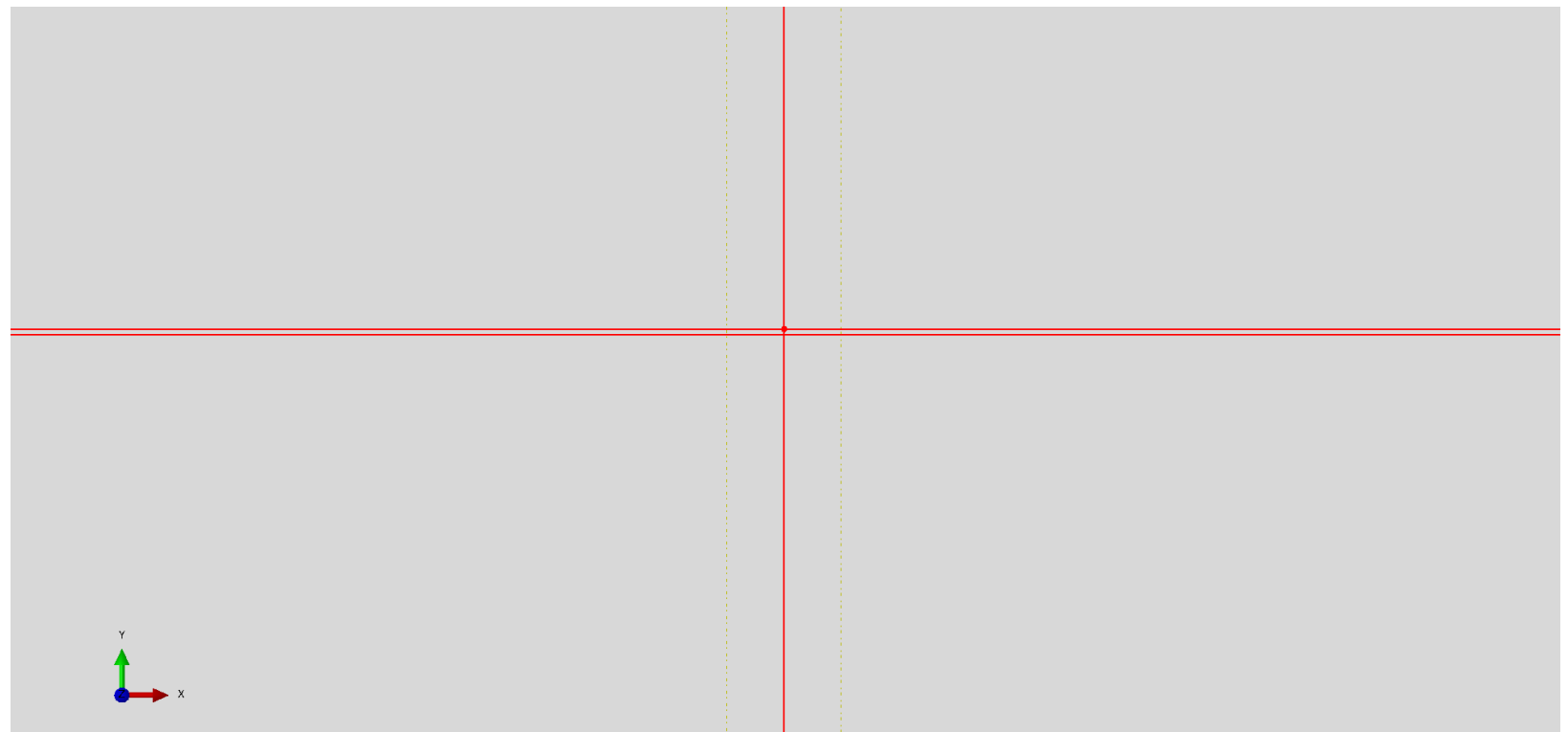
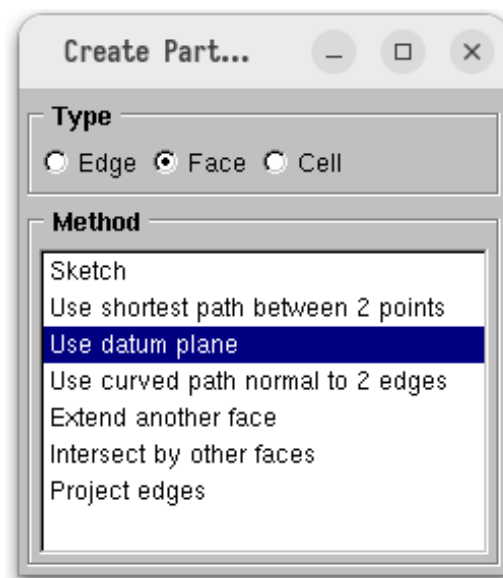
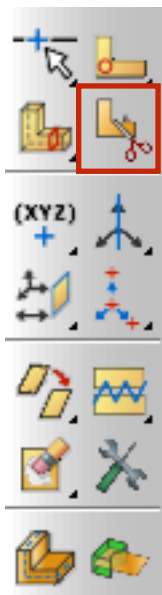
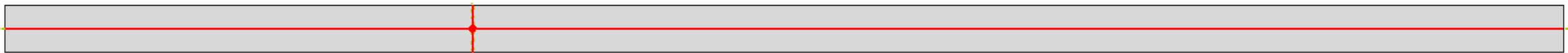
- Pour partitionner le modèle, créer d'abord trois *Datum Planes* : deux horizontaux à ± 0.0005 mm du milieu de l'éprouvette, un troisième vertical à 30 mm du bord gauche



Idéalement, il faudrait définir une pré-entaille, et des éléments d'interface d'épaisseur nulle. Pour faciliter la mise en données avec CAE, on va ici leur donner une très faible épaisseur δ .

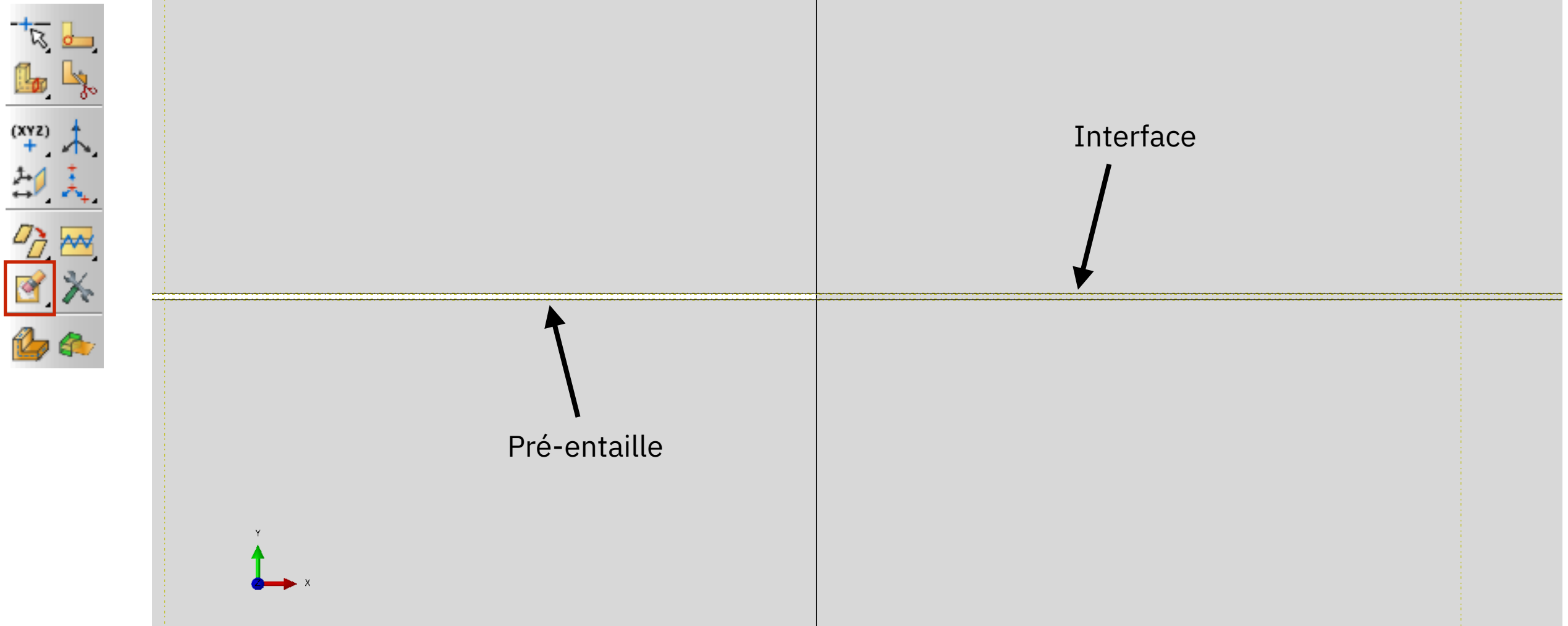
Création du modèle

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



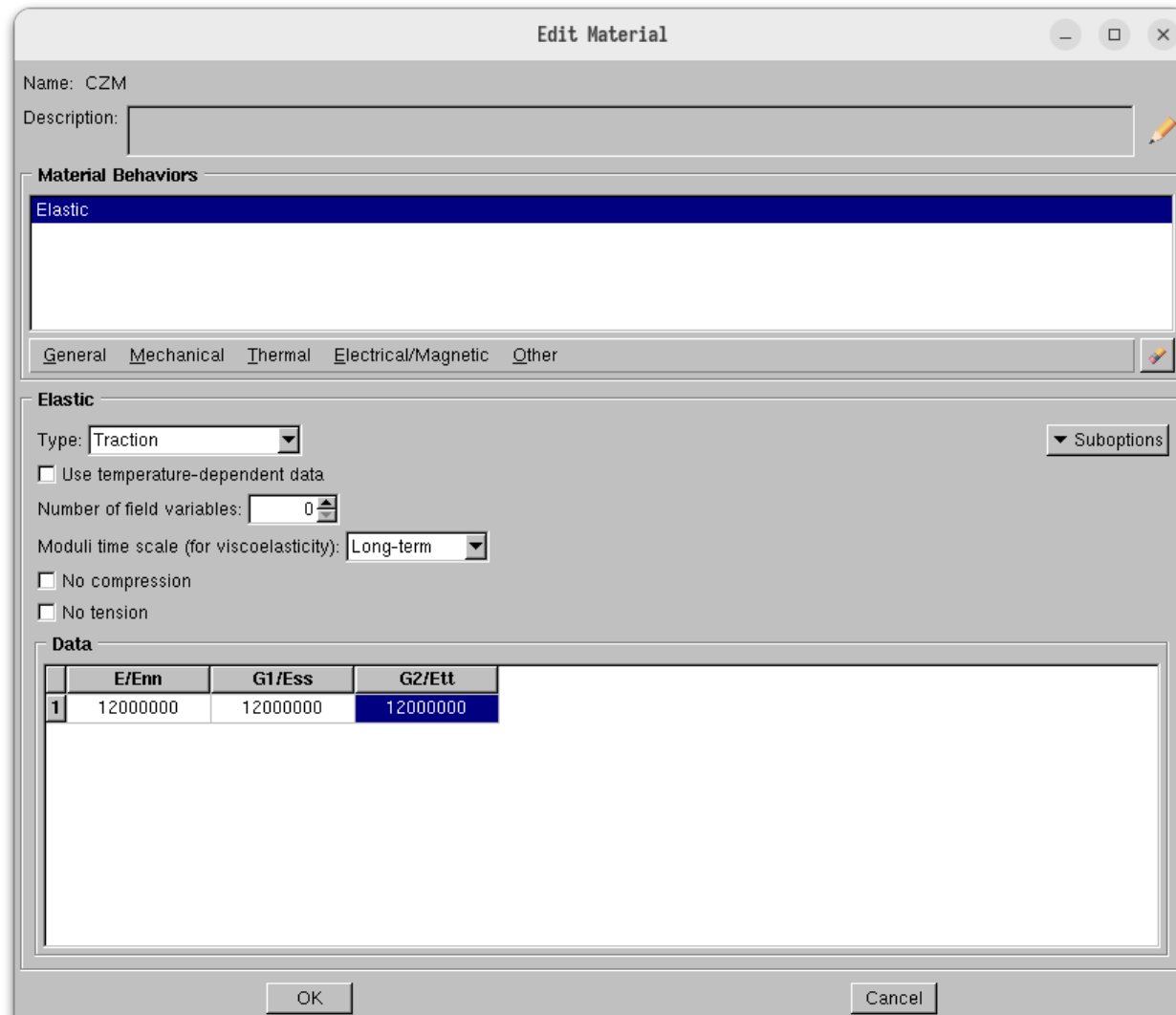
Création du modèle

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



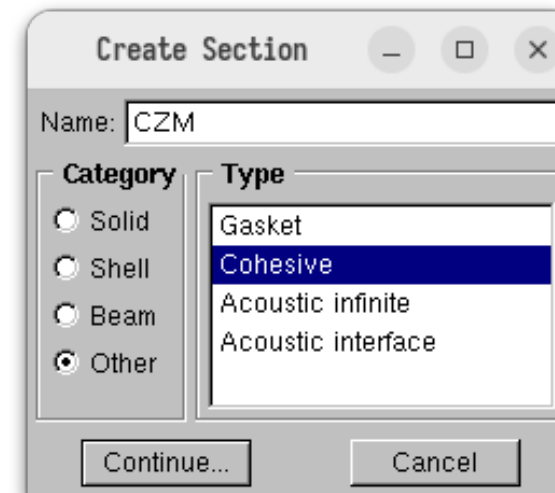
Propriétés matériau

- 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*.

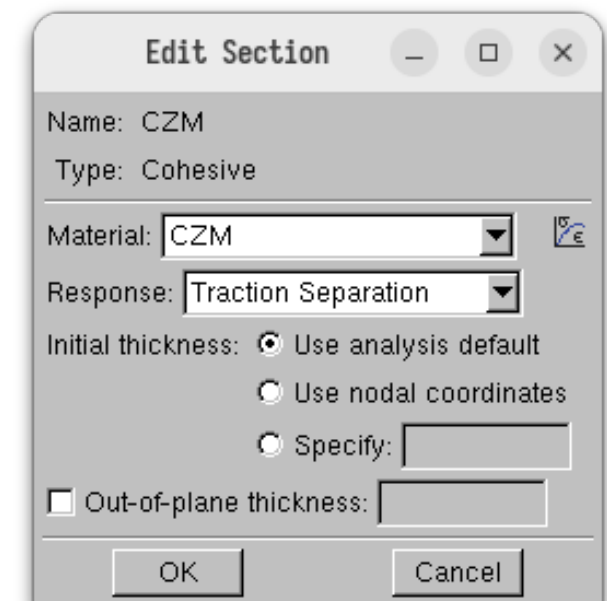


The 'Edit Material' dialog box is shown. The 'Name' field is 'CZM'. The 'Description' field is empty. The 'Material Behaviors' list has 'Elastic' selected. The 'Elastic' tab is active, showing 'Type: Traction'. There are checkboxes for 'Use temperature-dependent data', 'No compression', and 'No tension'. The 'Moduli time scale (for viscoelasticity)' is set to 'Long-term'. The 'Data' table has one row with values 12000000 for E/Enn, G1/Ess, and G2/Ett.

	E/Enn	G1/Ess	G2/Ett
1	12000000	12000000	12000000



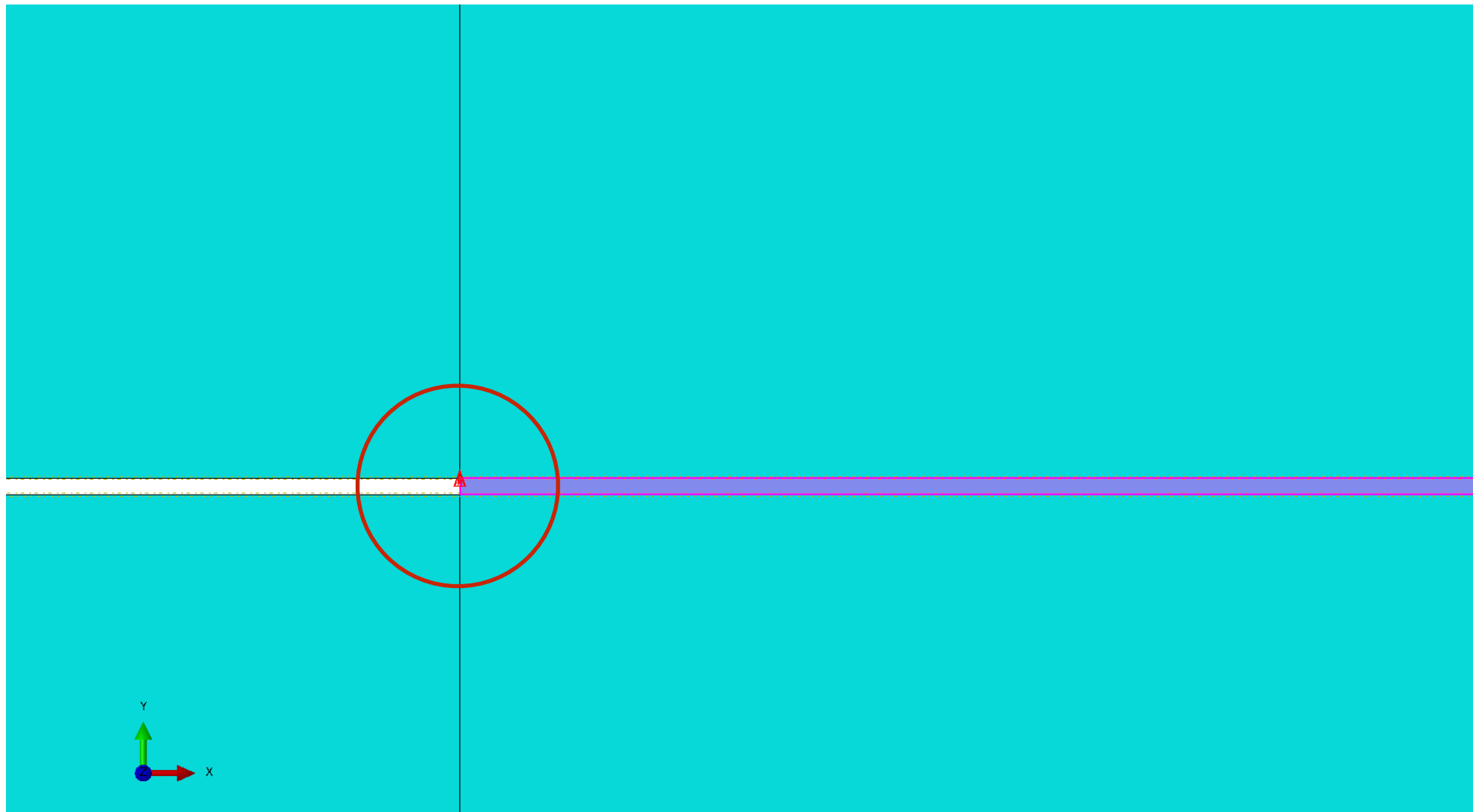
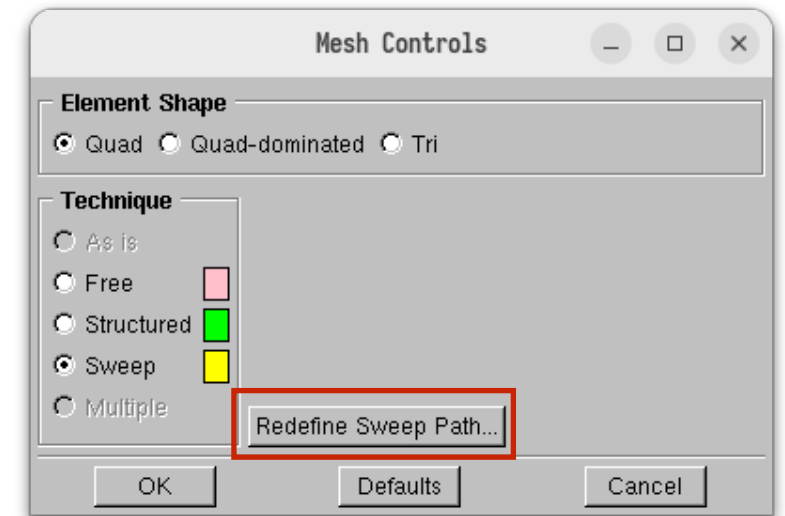
The 'Create Section' dialog box is shown. The 'Name' field is 'CZM'. The 'Category' is 'Other' and the 'Type' is 'Cohesive'.



The 'Edit Section' dialog box is shown. The 'Name' field is 'CZM'. The 'Type' is 'Cohesive'. The 'Material' is 'CZM'. The 'Response' is 'Traction Separation'. The 'Initial thickness' is set to 'Use analysis default'. There are checkboxes for 'Out-of-plane thickness'.

Maillage

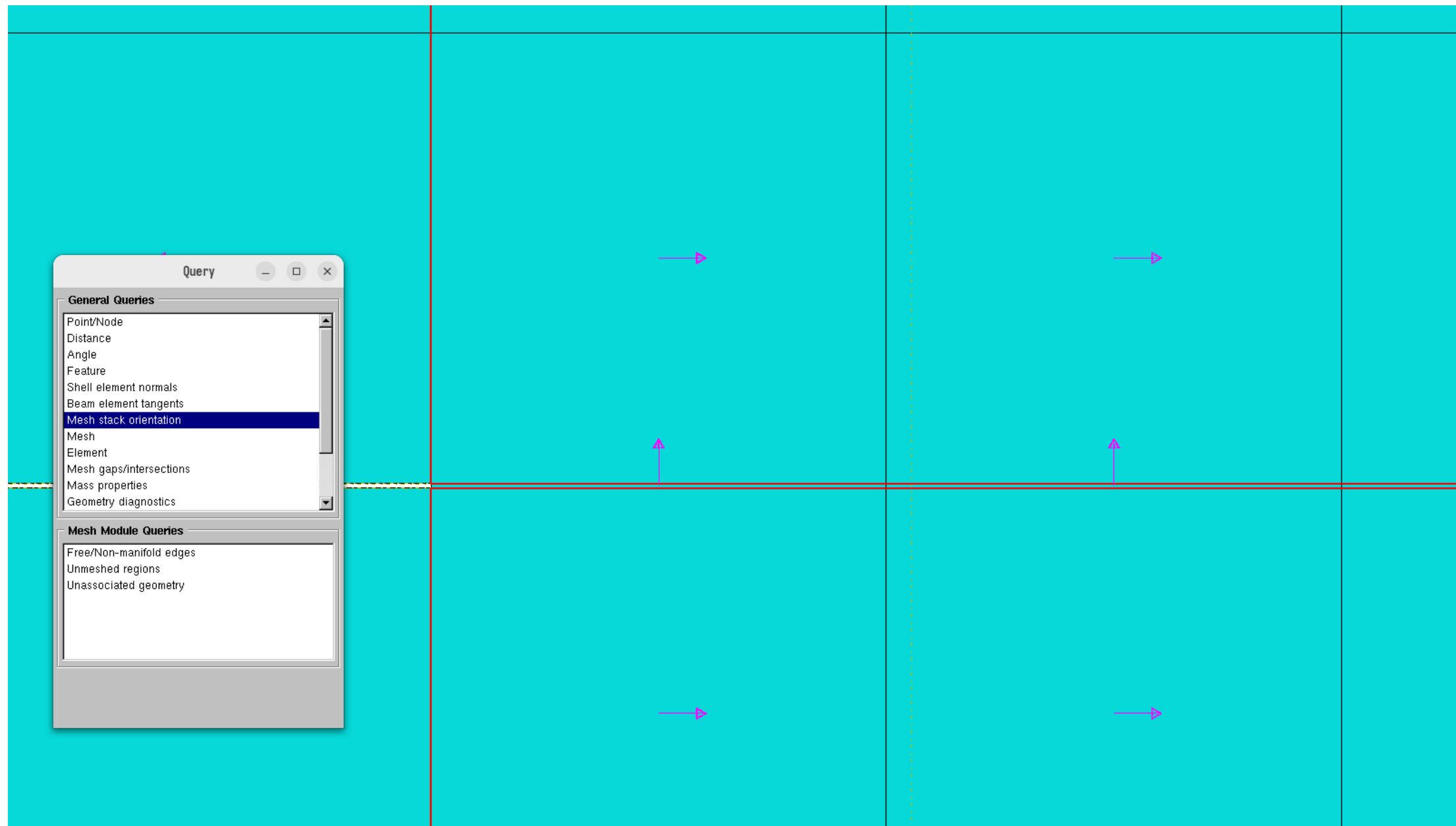
- Ajuster le *Mesh Controls* pour l'interface. Choisir *Quad > Sweep*. Puis redéfinir la direction du *Sweep Path* pour qu'il soit dans l'épaisseur de l'interface.



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

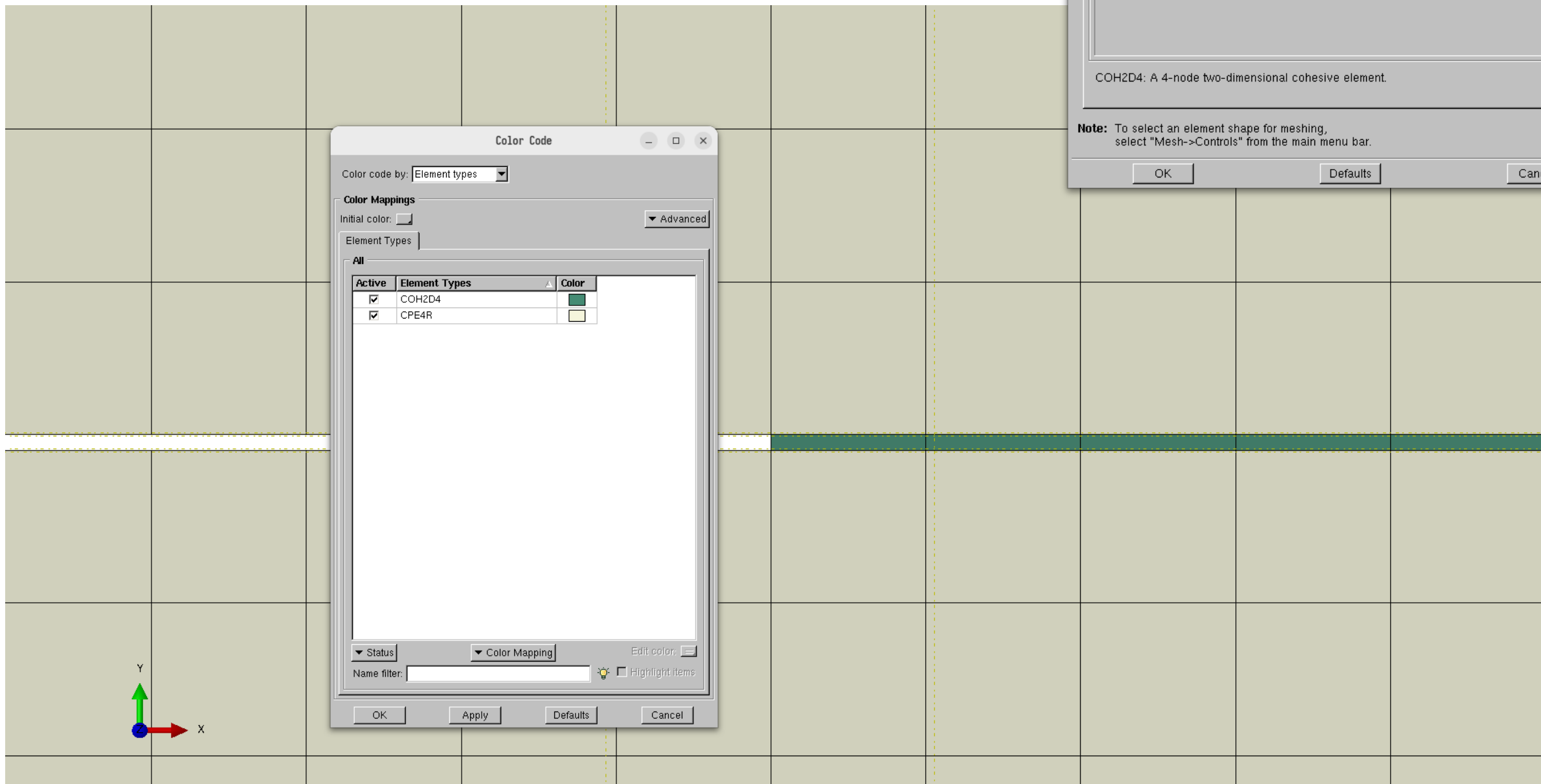
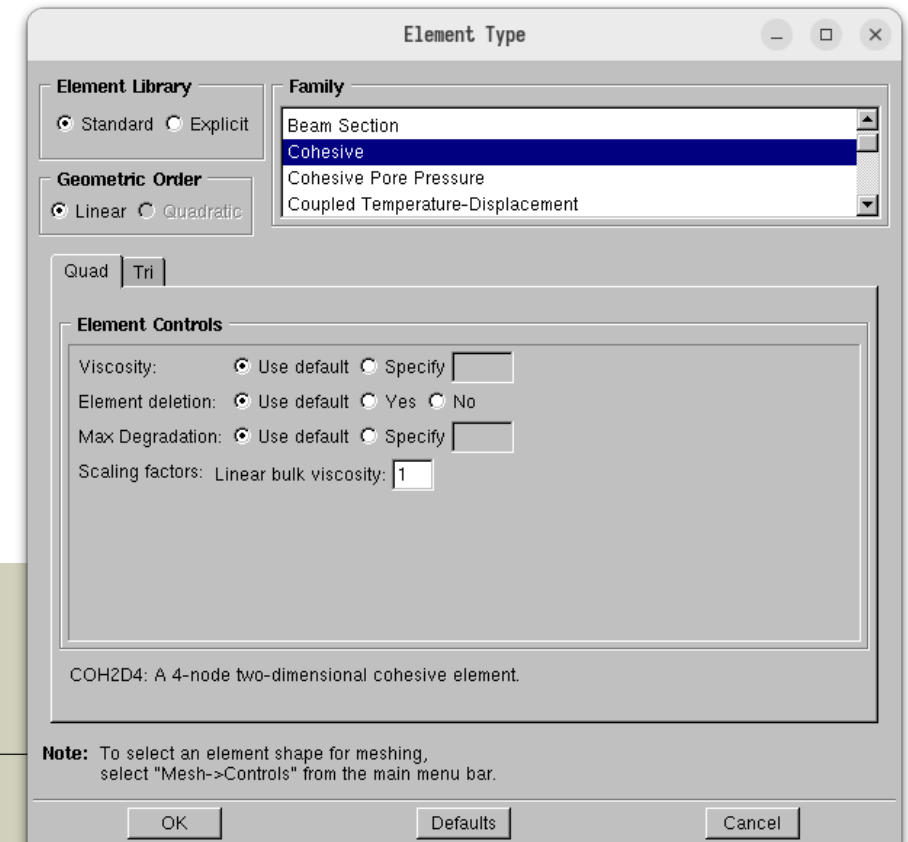
Maillage

- 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

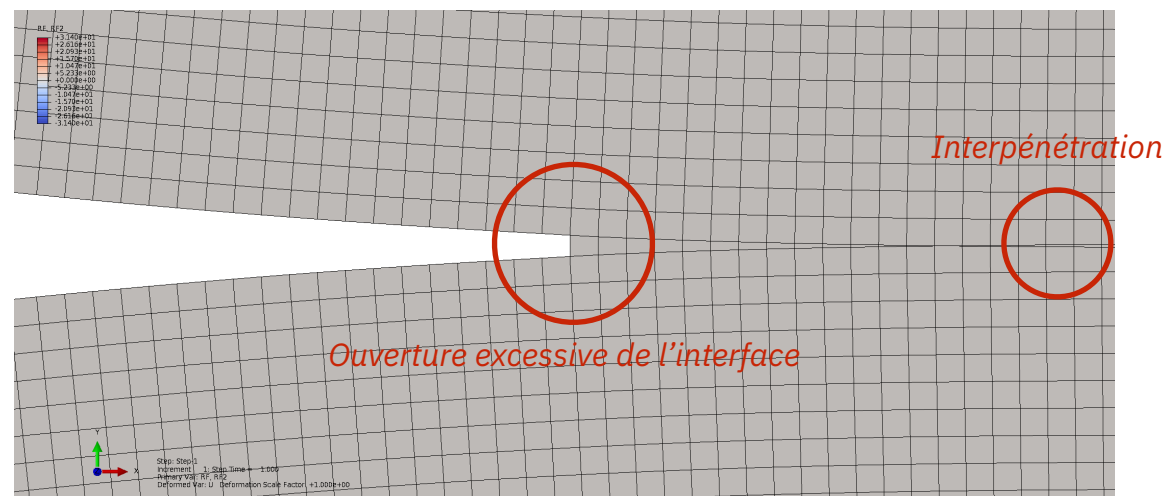
- Enfin, affecter des éléments de type *plane strain* (CPE4R) pour les plis, et des éléments cohésifs (COH2D4) pour l'interface



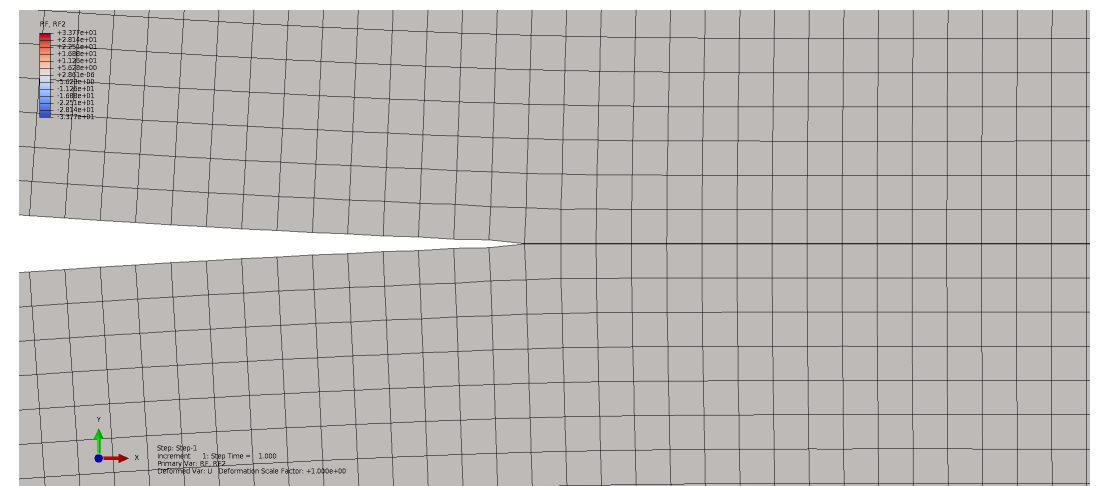
Calibration de la rigidité des interfaces

- **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.



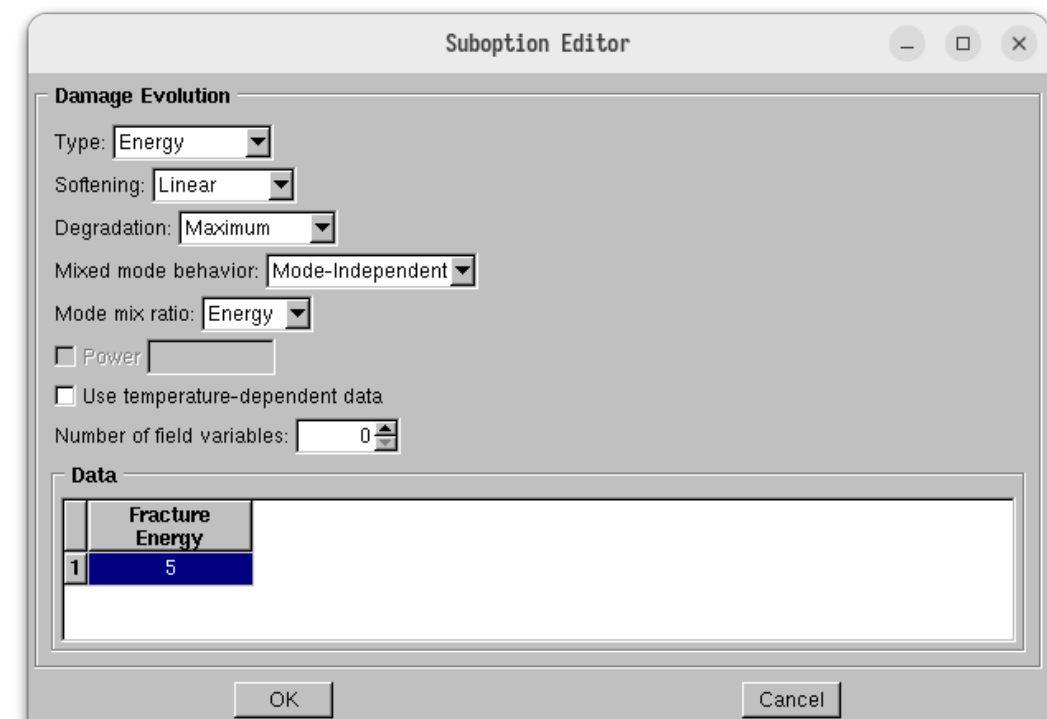
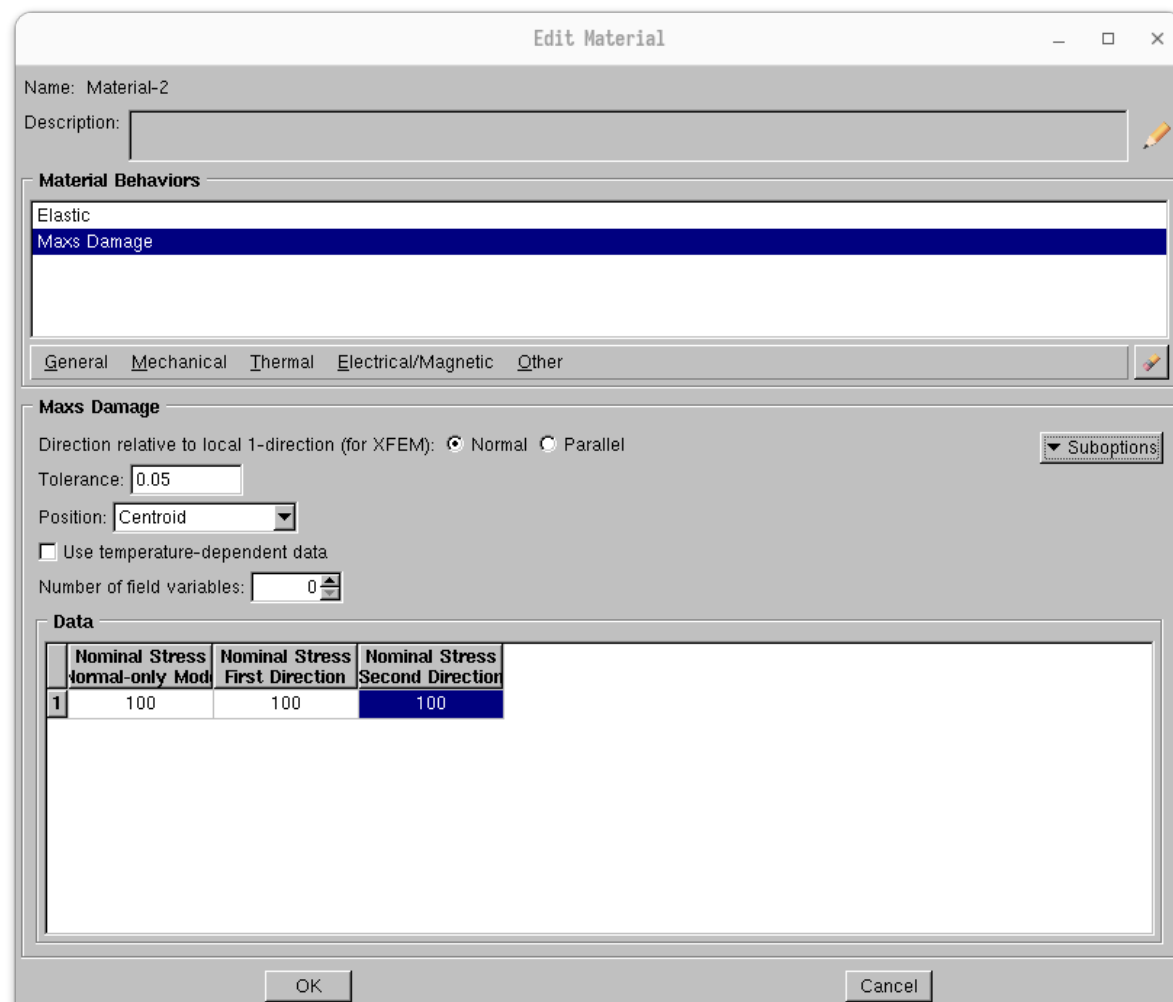
Rigidité trop faible



Rigidité correcte

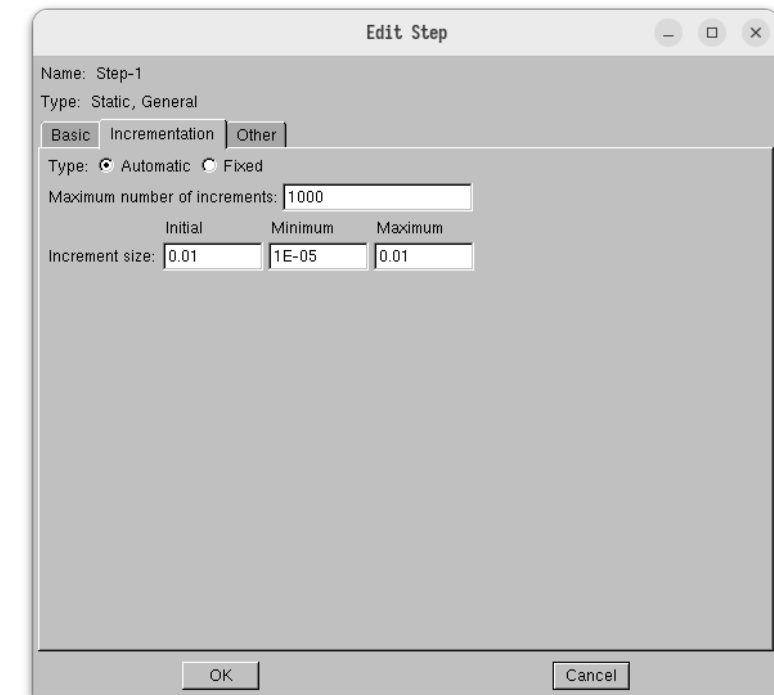
Simulation de l'essai DCB

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



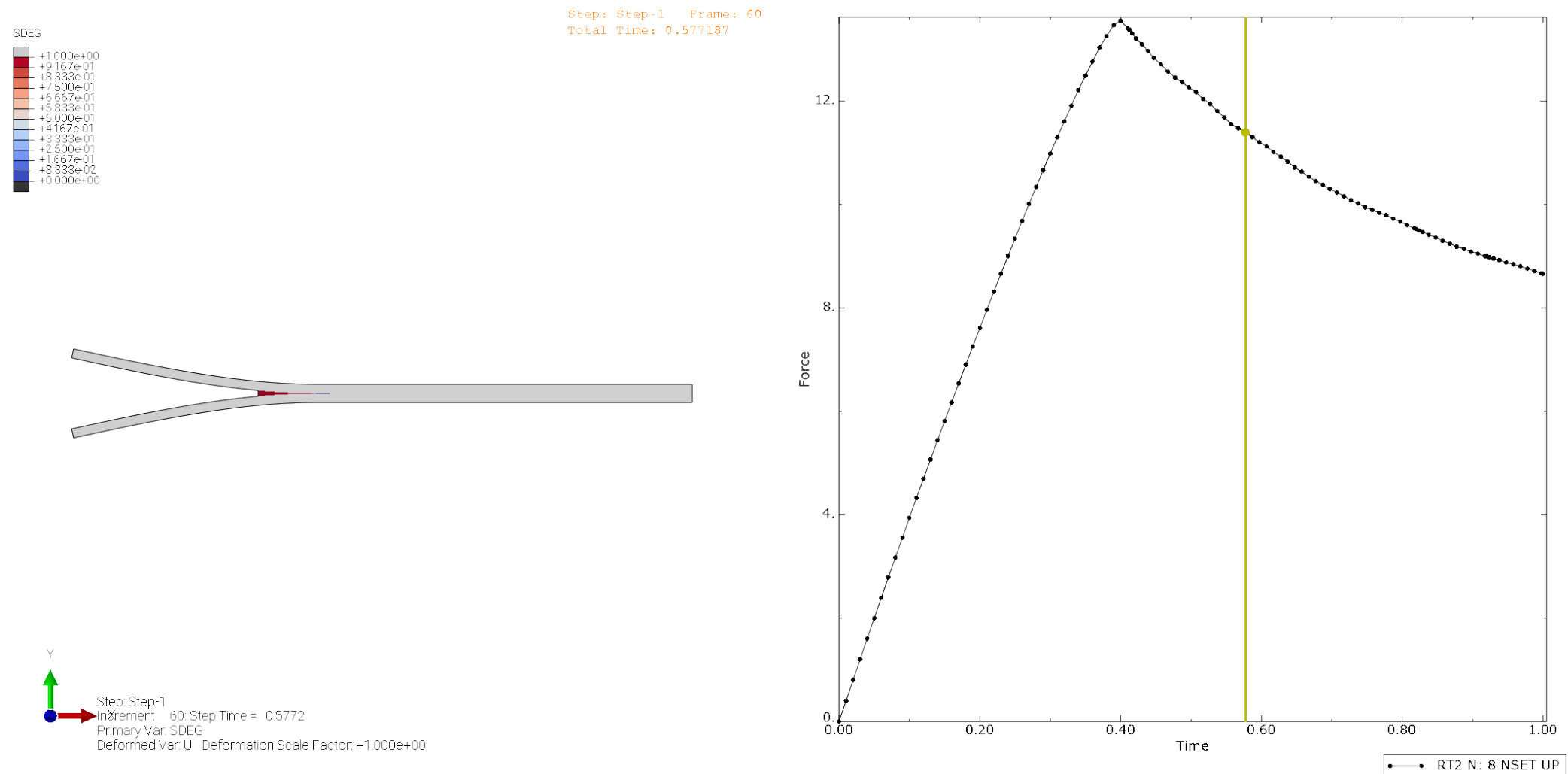
Simulation de l'essai DCB

- Modifier les incréments de temps du *Step-1* ($\Delta t_{ini} = 0.01$, $\Delta t_{max} = 0.01$) et augmenter la nombre d'incréments 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

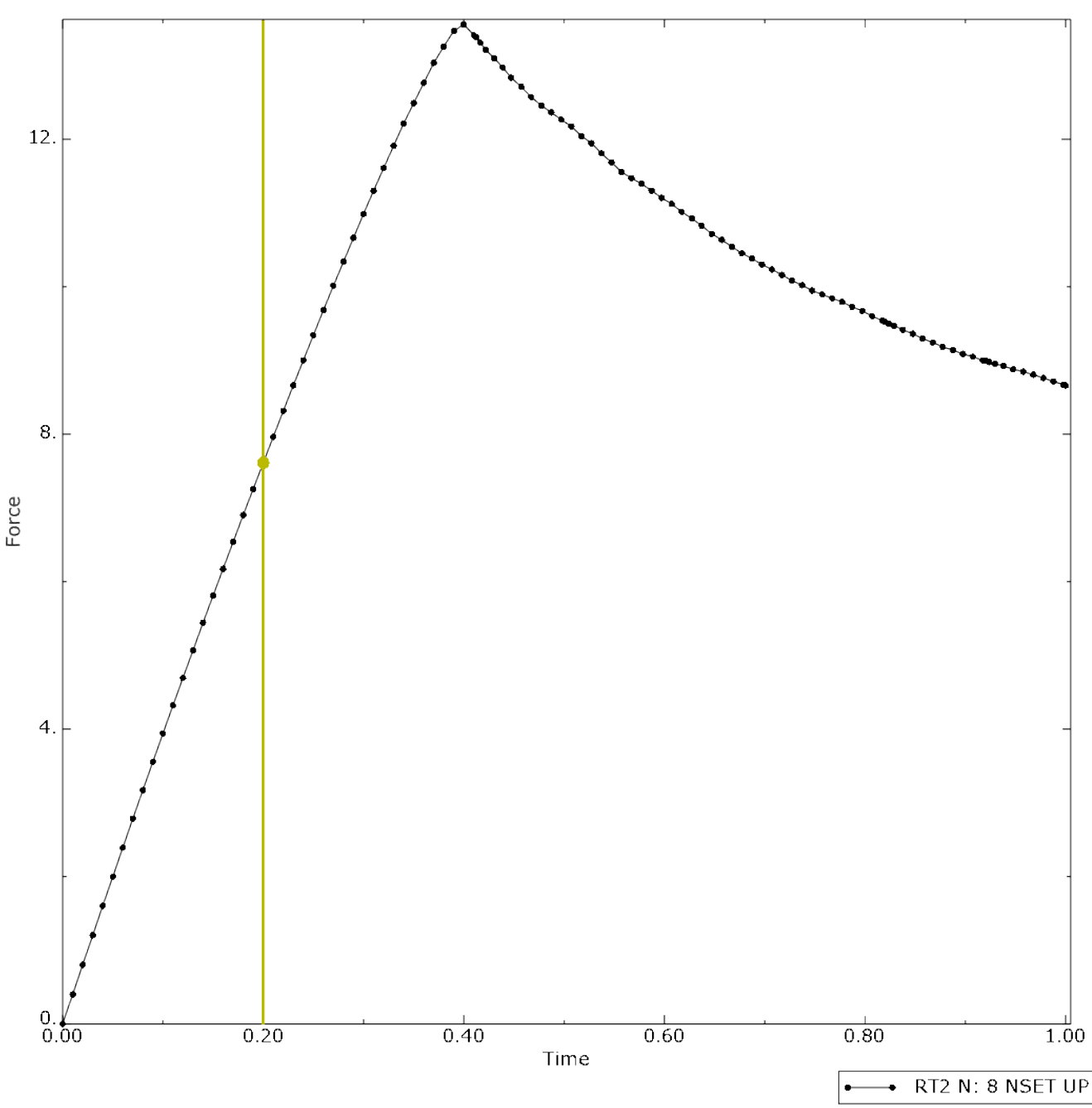
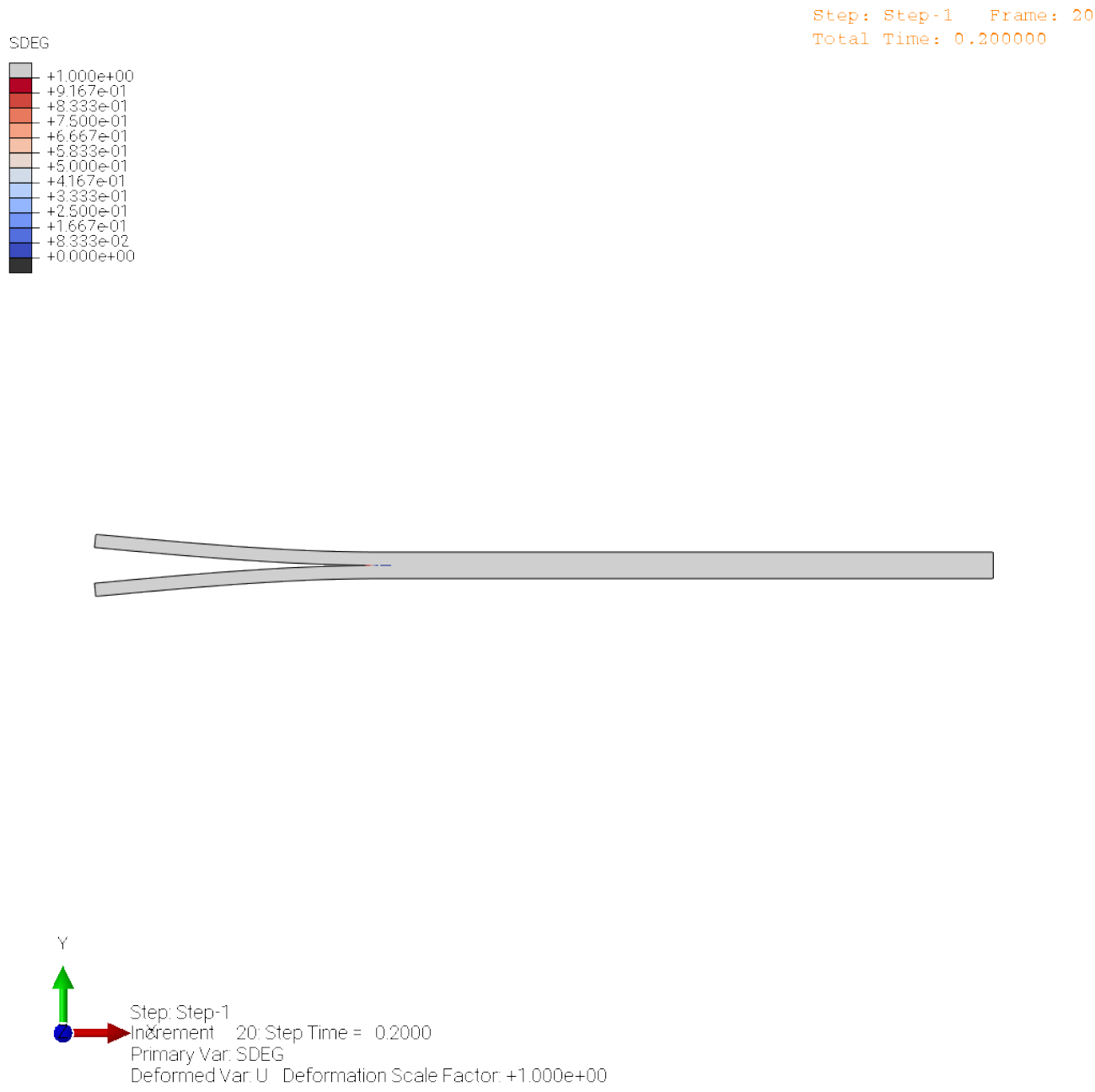


Simulation de l'essai DCB

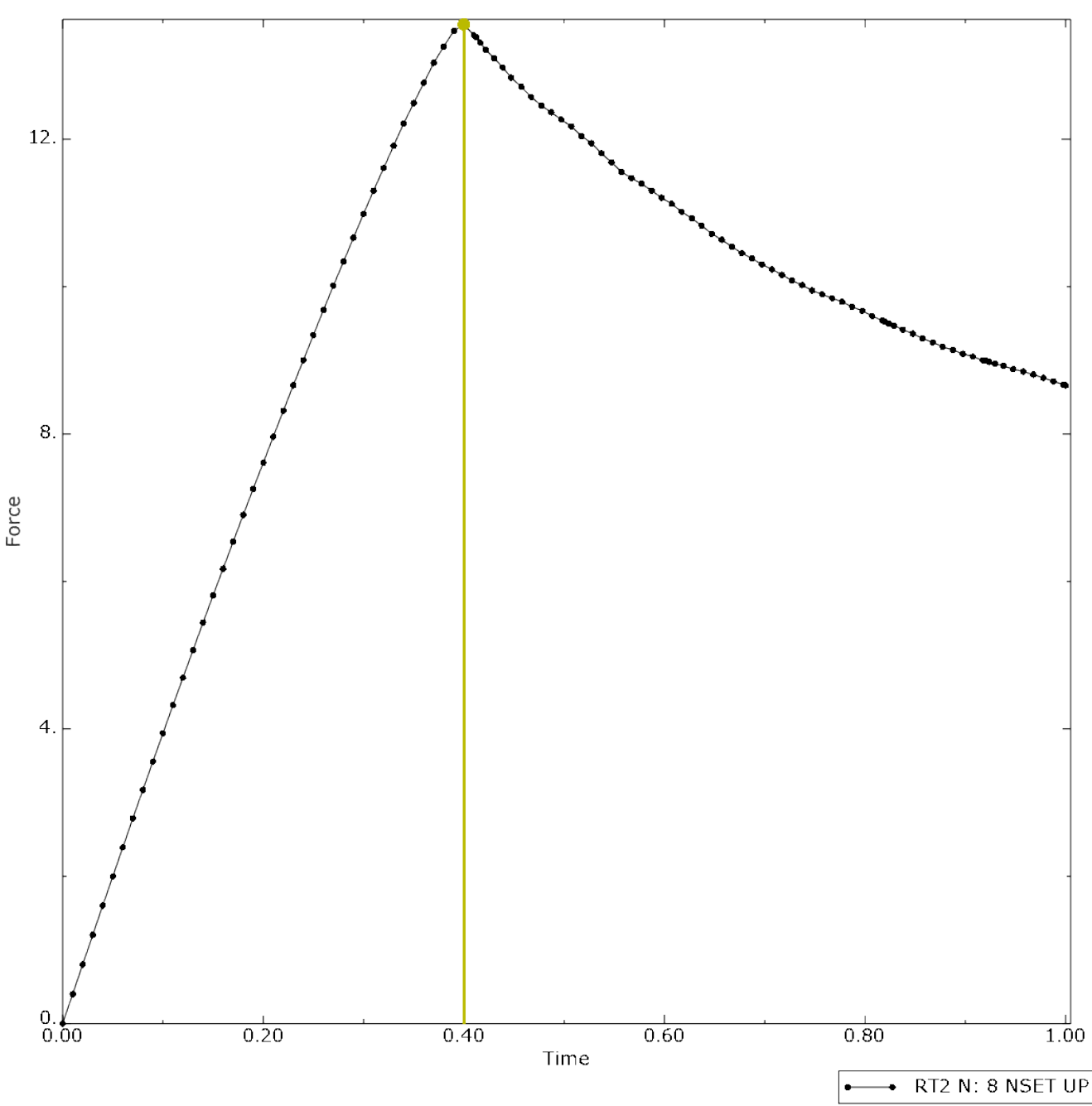
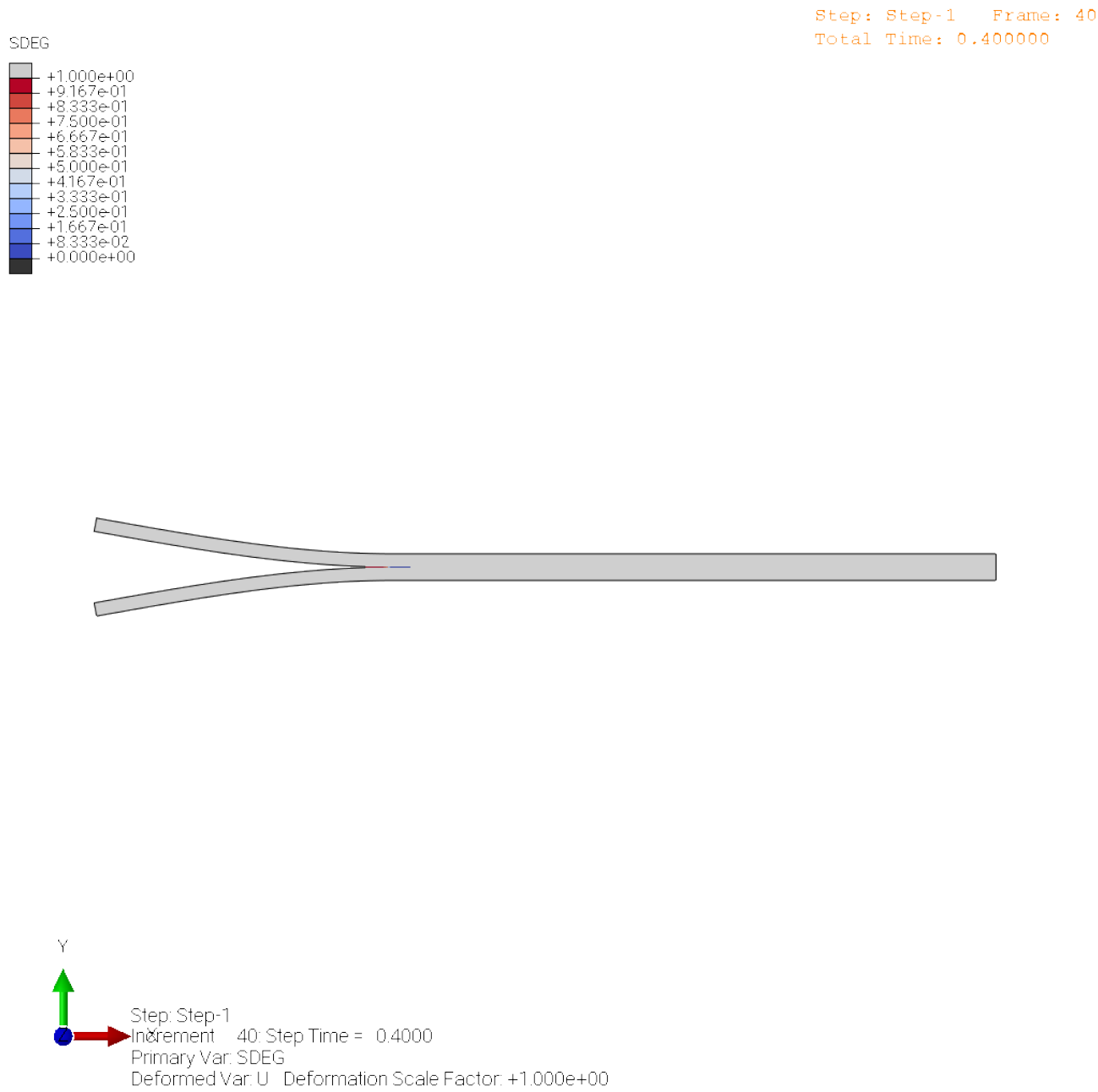
- **Q4** Observer la propagation de la pré-entaille, et la décohésion progressive de l'interface à travers l'endommagement des éléments CZM (*SDEG*).
- **Q5** Tracer la courbe force/déplacement $RF2 = f(U2)$.



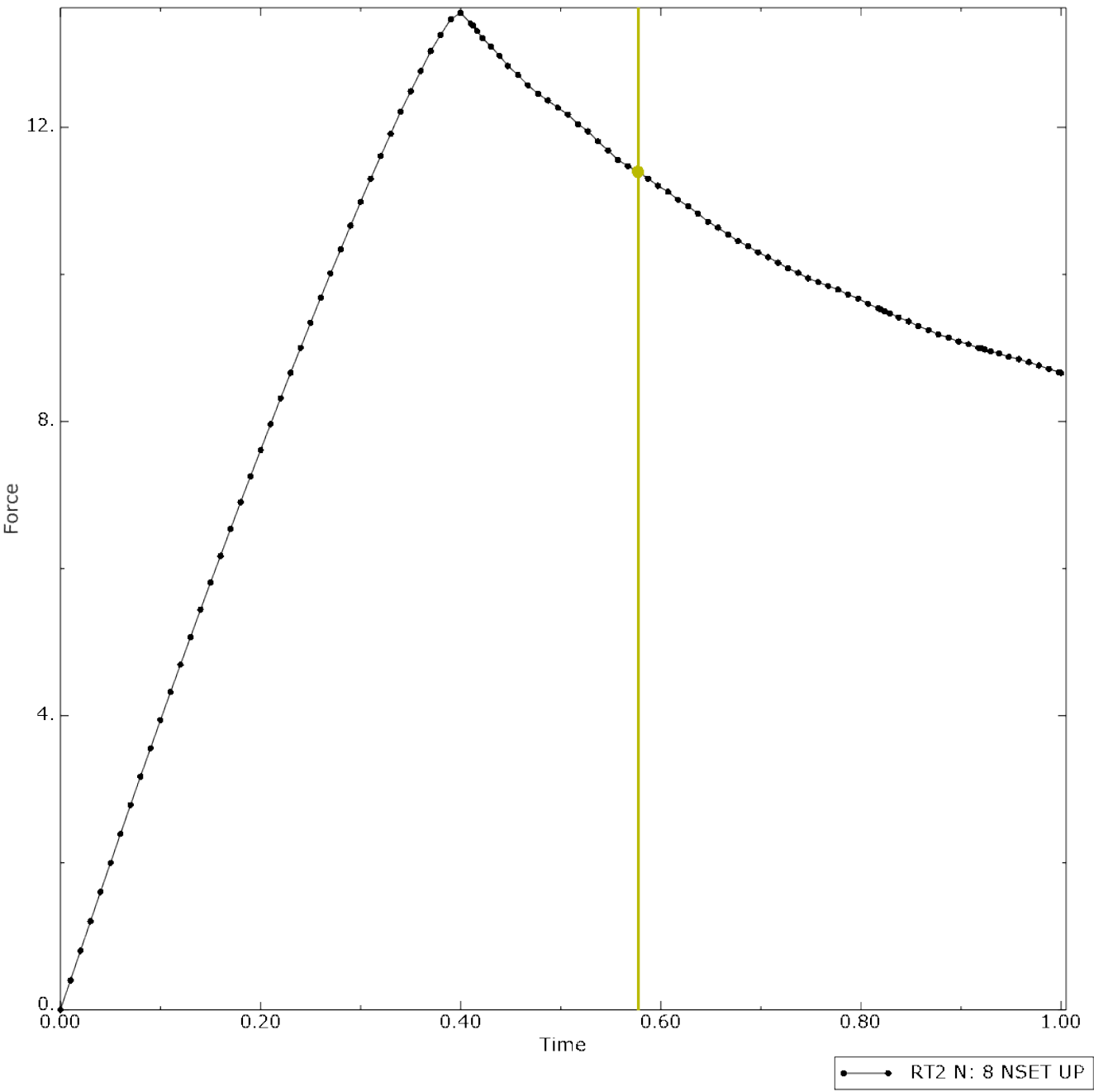
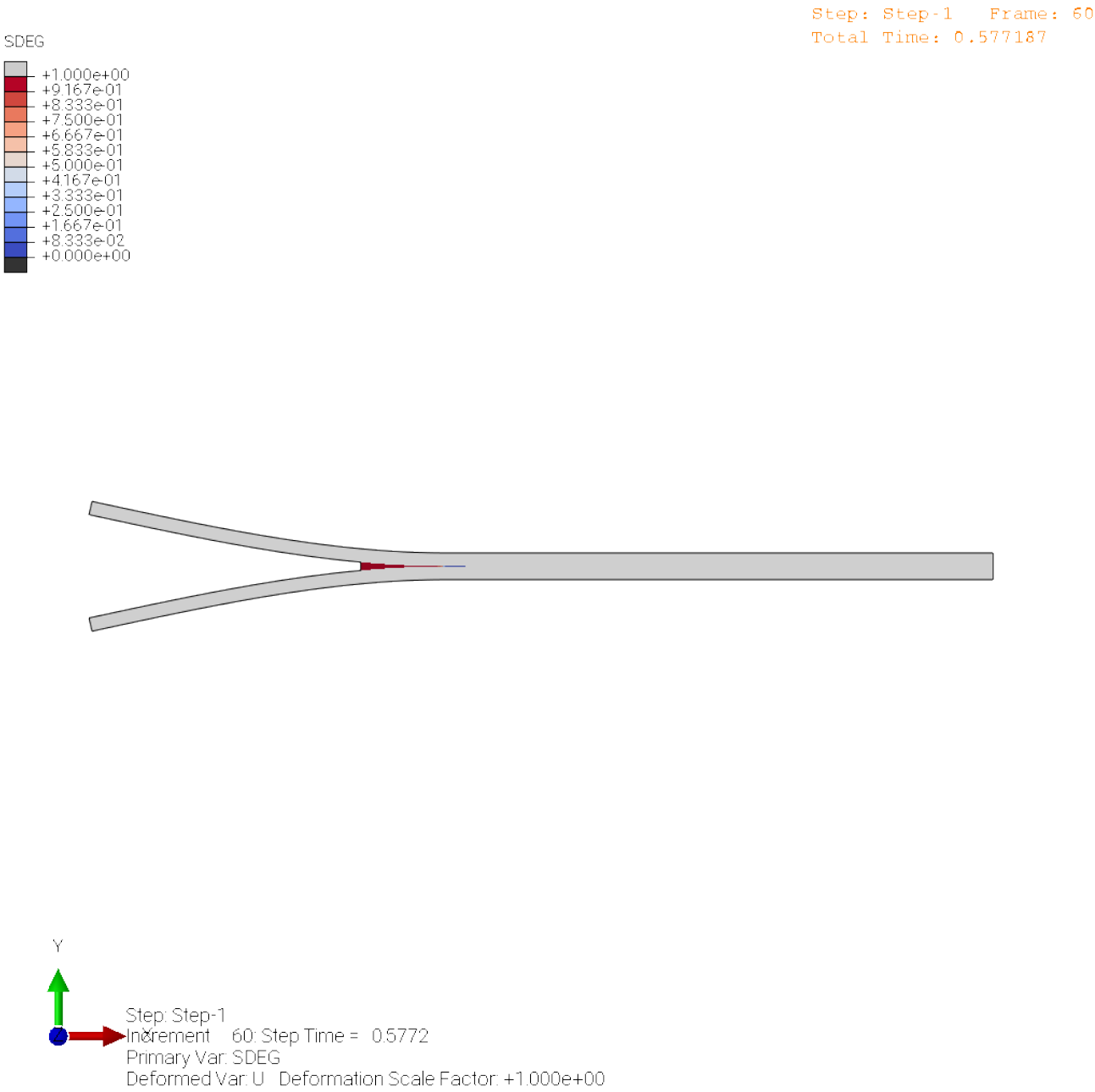
Simulation de l'essai DCB



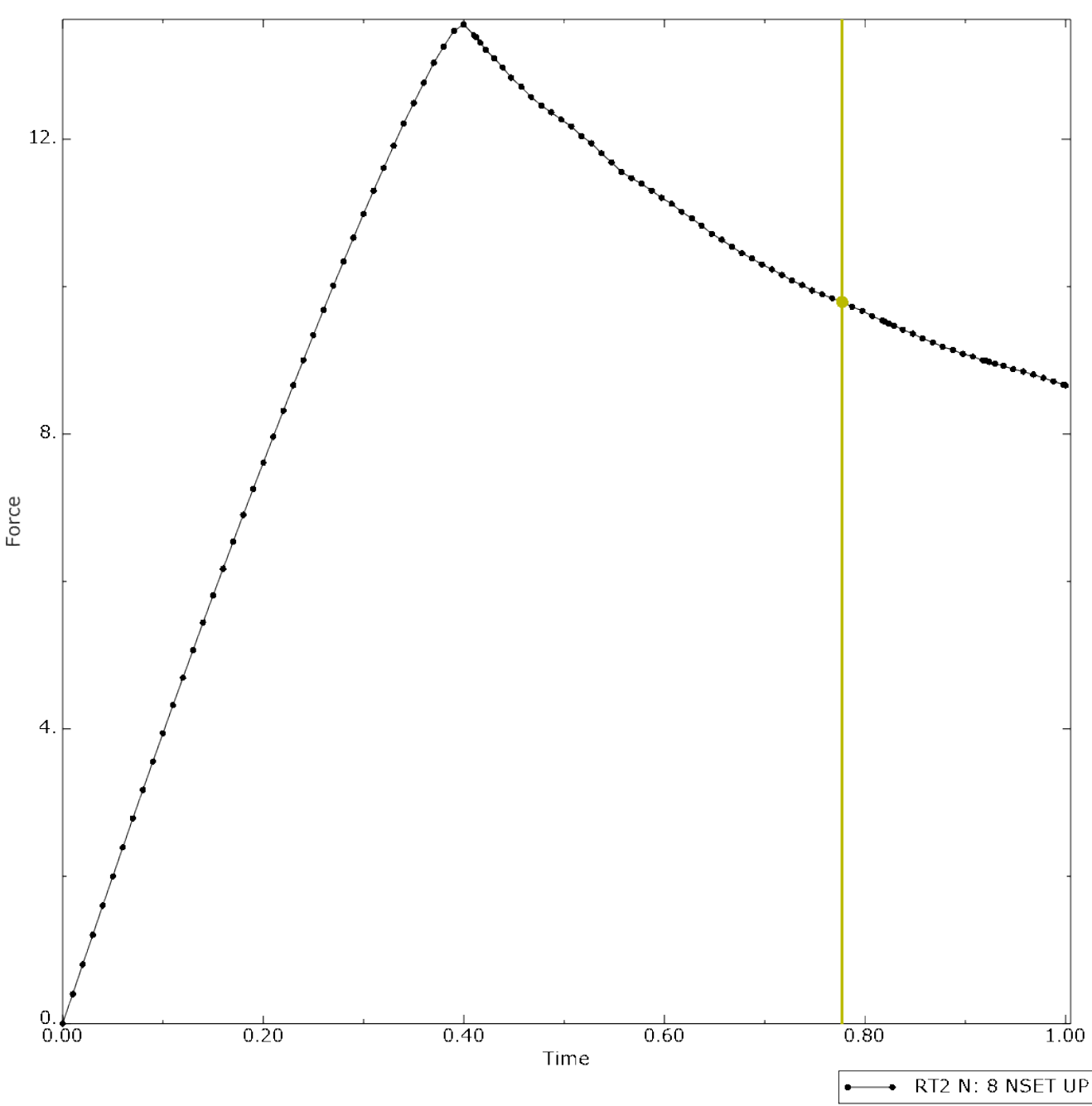
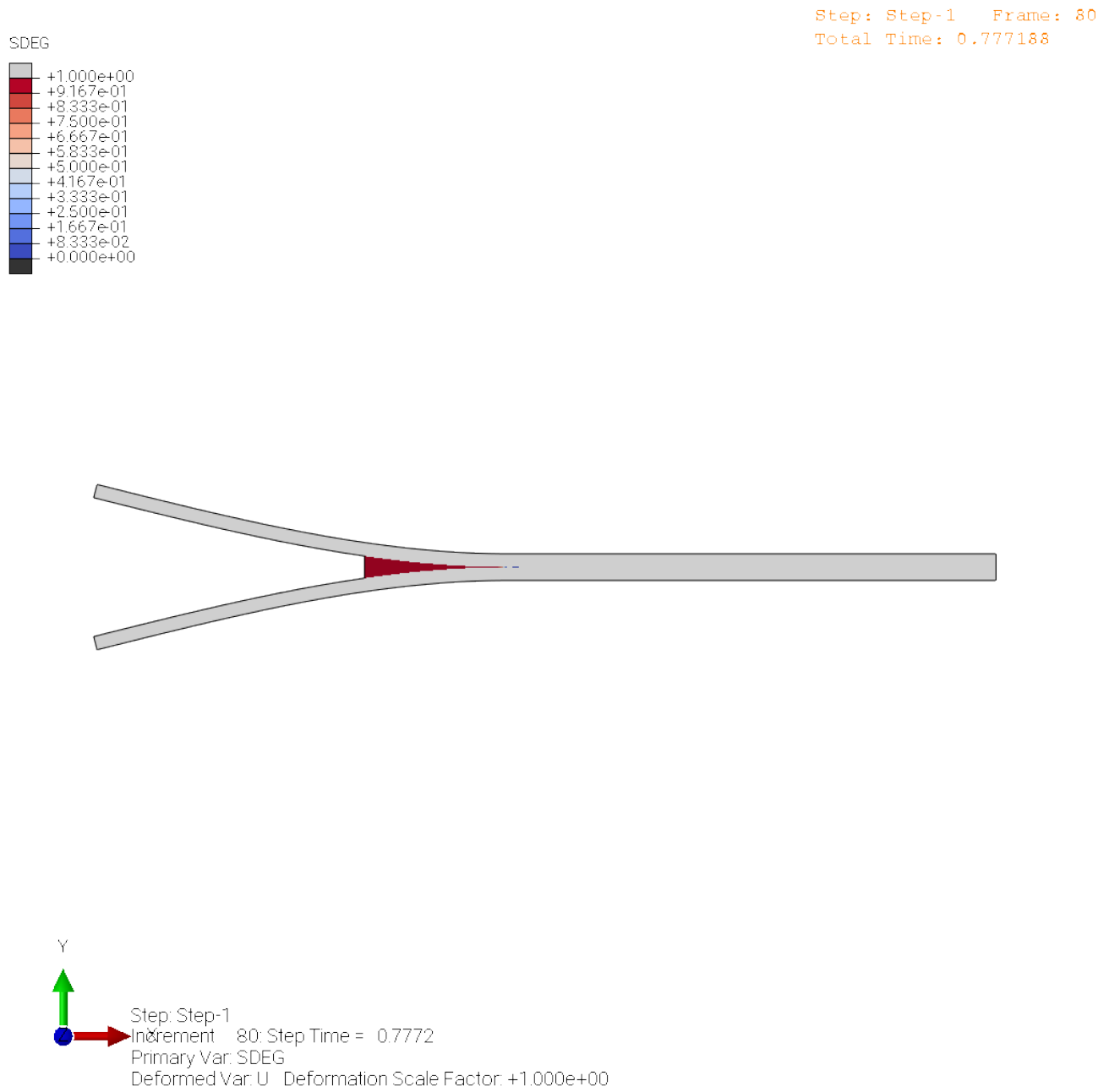
Simulation de l'essai DCB



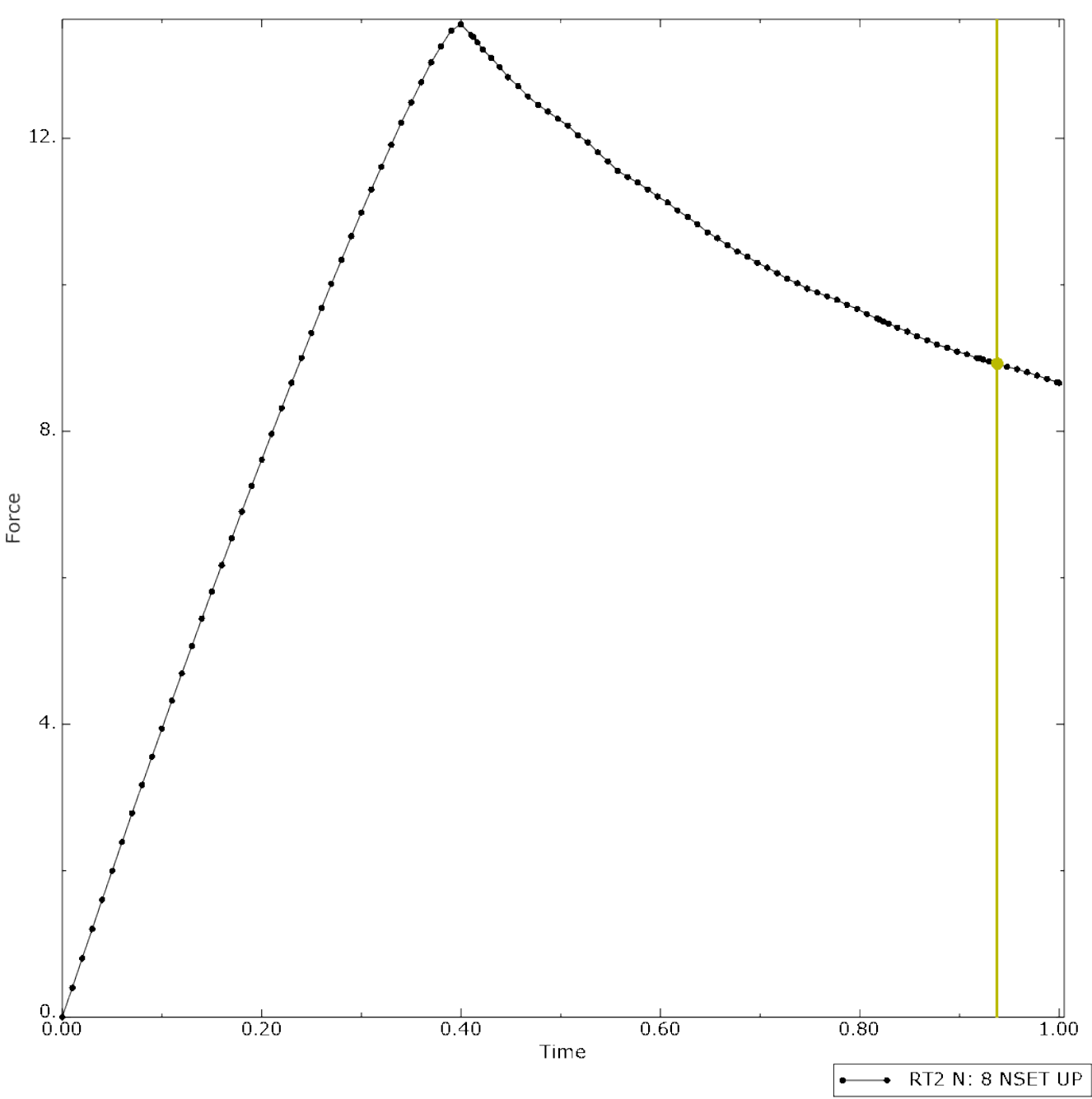
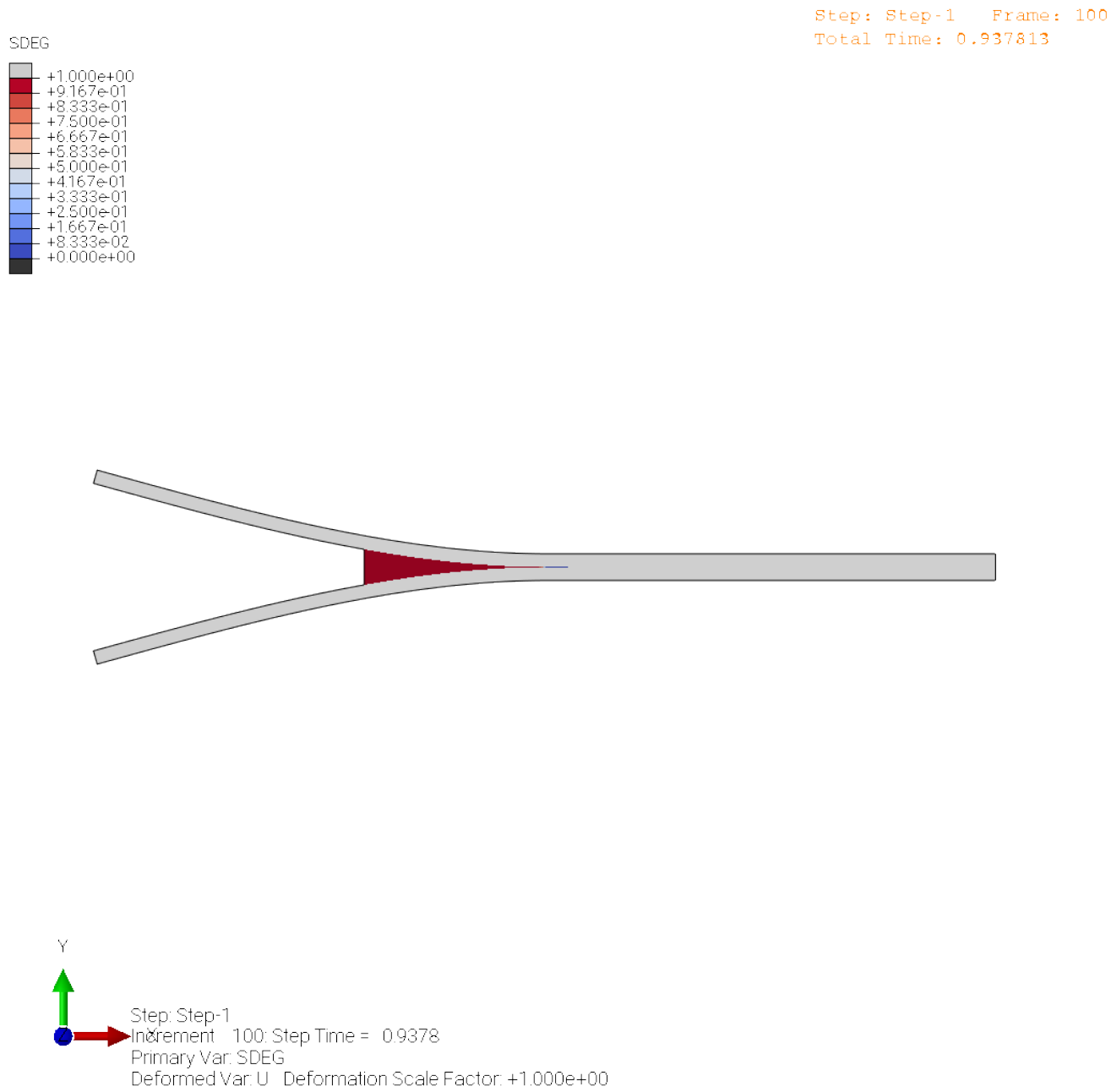
Simulation de l'essai DCB



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

