



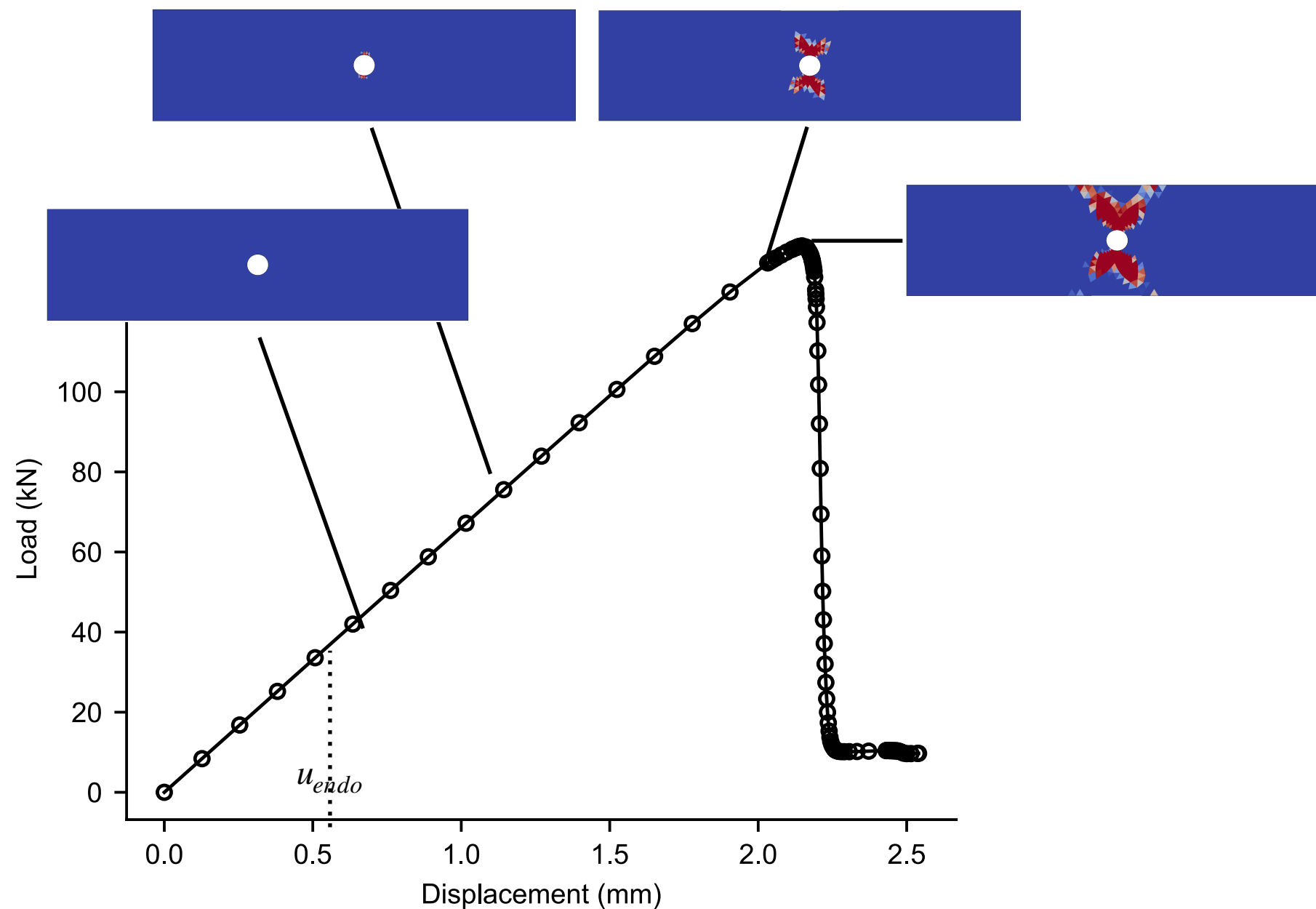
# **Matériaux et structures composites**

*Modélisation des composites stratifiés – TP2*

**Guillaume Couégnat**  
couegnat@lcts.u-bordeaux.fr

# Exercice 1

Simulation de l'endommagement d'une éprouvette trouée quasi-iso



# Exercice 1

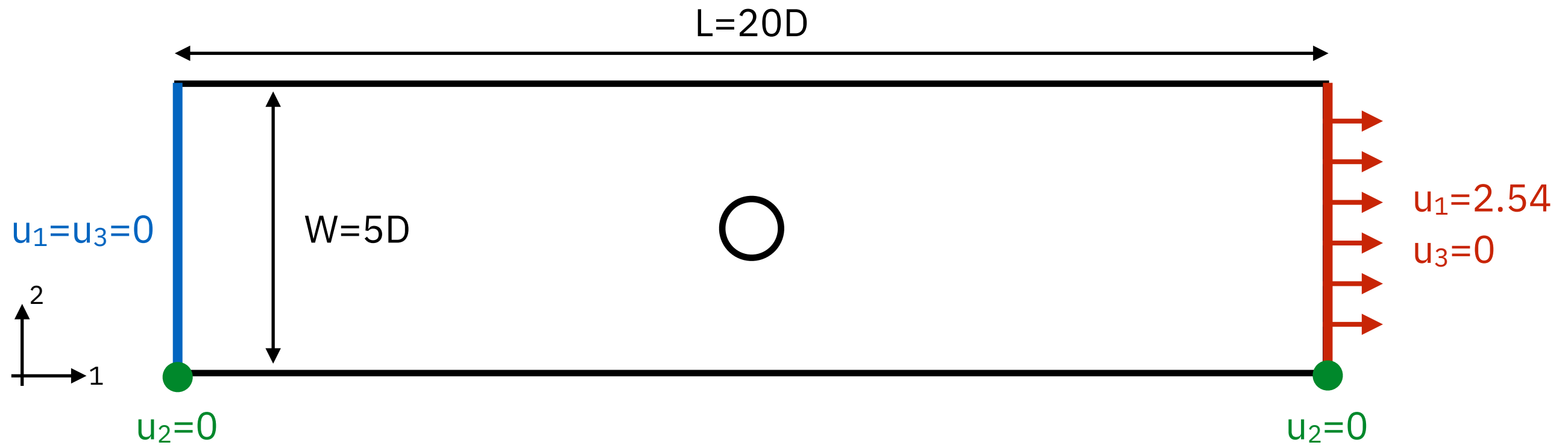
## Simulation de l'endommagement d'une éprouvette trouée quasi-iso

*L'objectif de cet exercice est de mettre en oeuvre le modèle de Hashin pour simuler l'endommagement et prévoir la rupture d'une éprouvette trouée quasi-iso*

- Partie 1 — calcul élastique
- Partie 2 — calcul élastique + critère Hashin
- Partie 3— calcul non-linéaire (avec propagation endo)
- *Bonus*
  - Partie 4 — sensibilité au maillage
  - Partie 5 —effet de l'empilement

# Géométrie et conditions limites

- Diamètre du trou  $D = 12,7$  mm
- Longueur  $L = 20D$ , largeur  $W = 5D$



- **Bord gauche** : on bloque les déplacements en  $x$  et  $z$
- **Bord droit** : on bloque le déplacement en  $z$
- **Les deux coins inférieurs** : on bloque aussi le déplacement en  $y$
- **Déplacement  $x$**  imposé tel que déformation macro = 1%

# Propriétés matériaux

- Matériau du pli : T300/M18 (fibres carbone, matrice epoxy)

## *Propriétés élastiques*

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

## *Critère d'initiation*

$X_t$	$X_c$	$Y_t$	$Y_c$	$S_l=S_t$
2050 MPa	1200 MPa	62 MPa	190 MPa	81 MPa

## *Critère de propagation*

$G_c^{ft}$	$G_c^{fc}$	$G_c^{mt}$	$G_c^{mc}$
95 mJ/mm <sup>2</sup>	103 mJ/mm <sup>2</sup>	0.2 mJ/mm <sup>2</sup>	0.2 mJ/mm <sup>2</sup>

⚠ Attention à la cohérence des unités !

# Propriétés matériaux

- Empilement quasi-iso  $[0/+45/90/-45]_s$
- 0,5 mm par pli

**Edit Section**

Name: Section-1  
Type: Shell / Continuum Shell, Composite

Section integration: ☒ During analysis ☐ Before analysis

Layup name:

Basic | Advanced

Thickness integration rule: ☒ Simpson ☐ Gauss

☒ Symmetric layers

Material	Thickness	Orientation Angle	Integration Points	Ply Name
T300-M18	0.5	0	3	
T300-M18	0.5	45	3	
T300-M18	0.5	90	3	
T300-M18	0.5	-45	3	

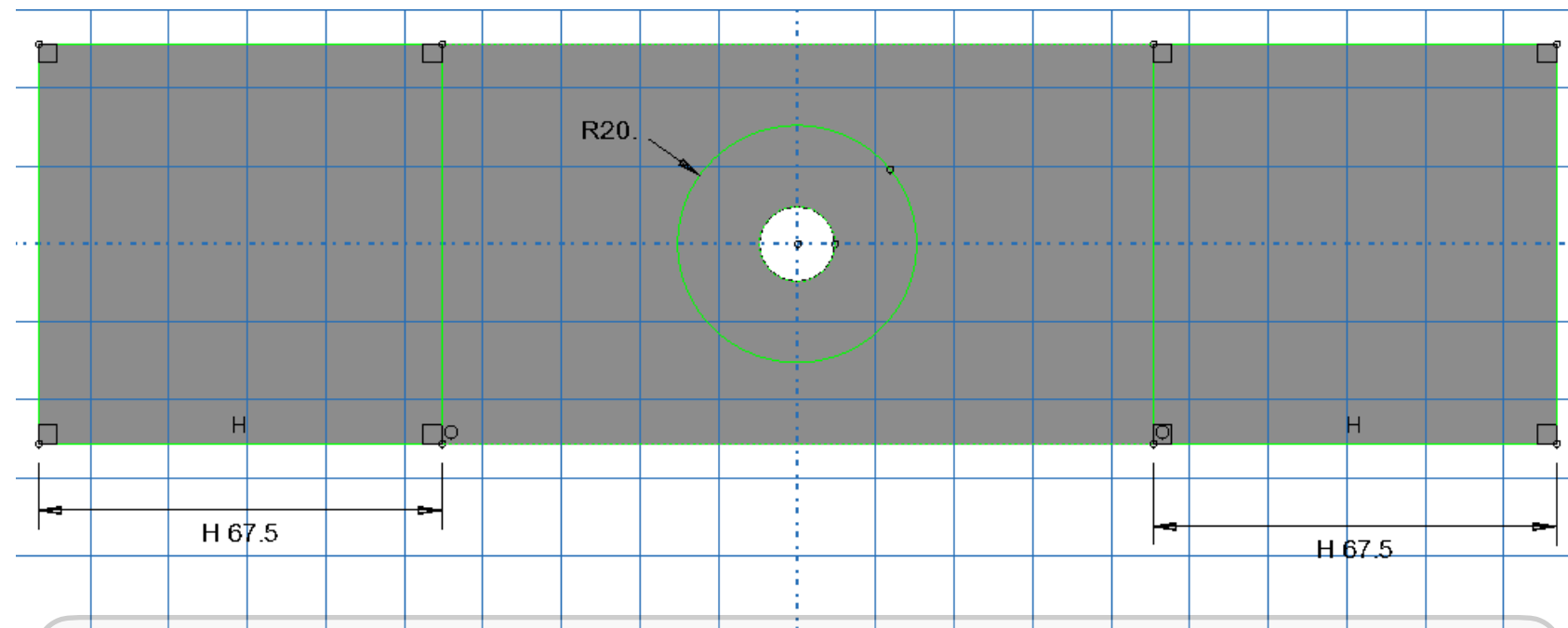
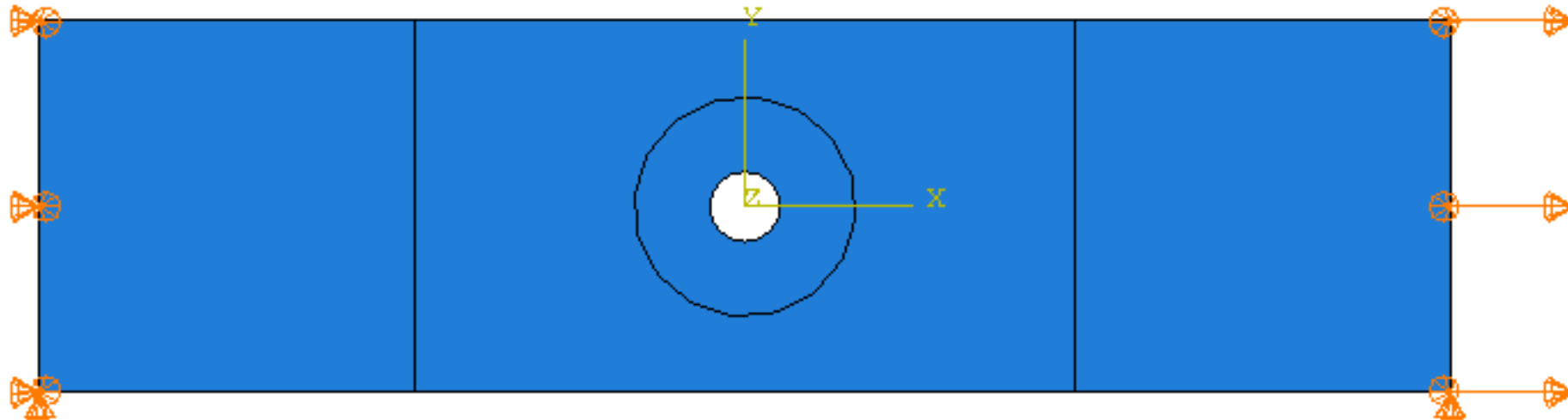
Options:

OK Cancel

*Notez cette valeur pour plus tard...*

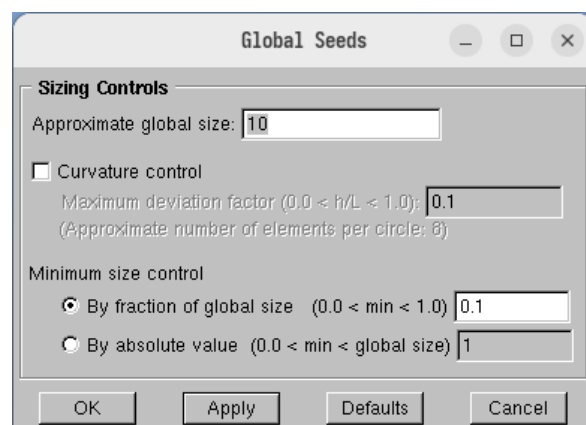
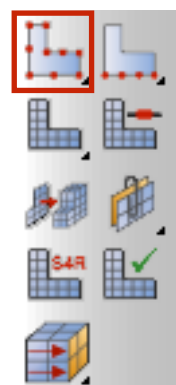
# Partie 1 – *calcul élastique*

- Créer un modèle *coque composite* avec la géométrie et les propriétés fournies (on ne considère que les propriétés élastiques du pli pour l'instant)

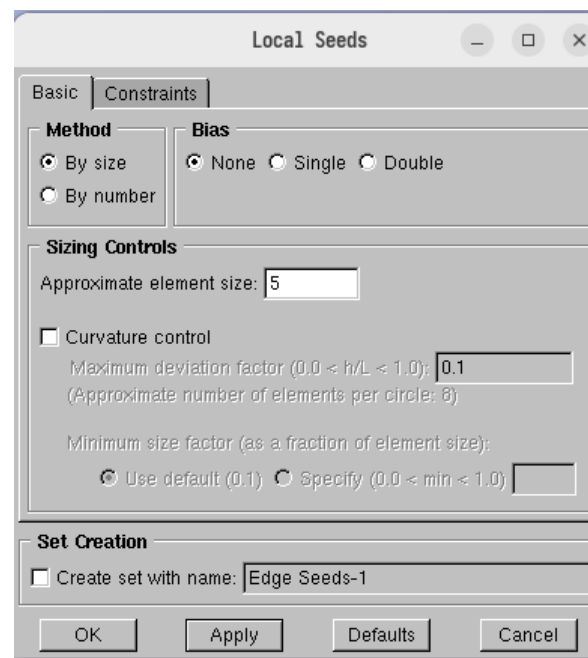


Vous prendrez soin de partitionner la géométrie pour pouvoir réaliser un maillage adapté au calcul (raffinement en bord du trou), cf. slides suivantes.

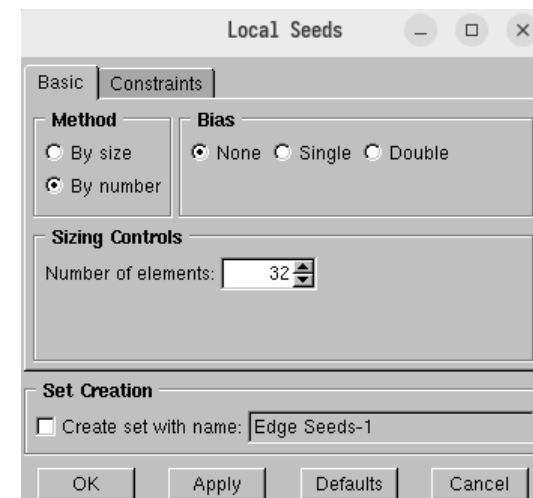
# Partie 1



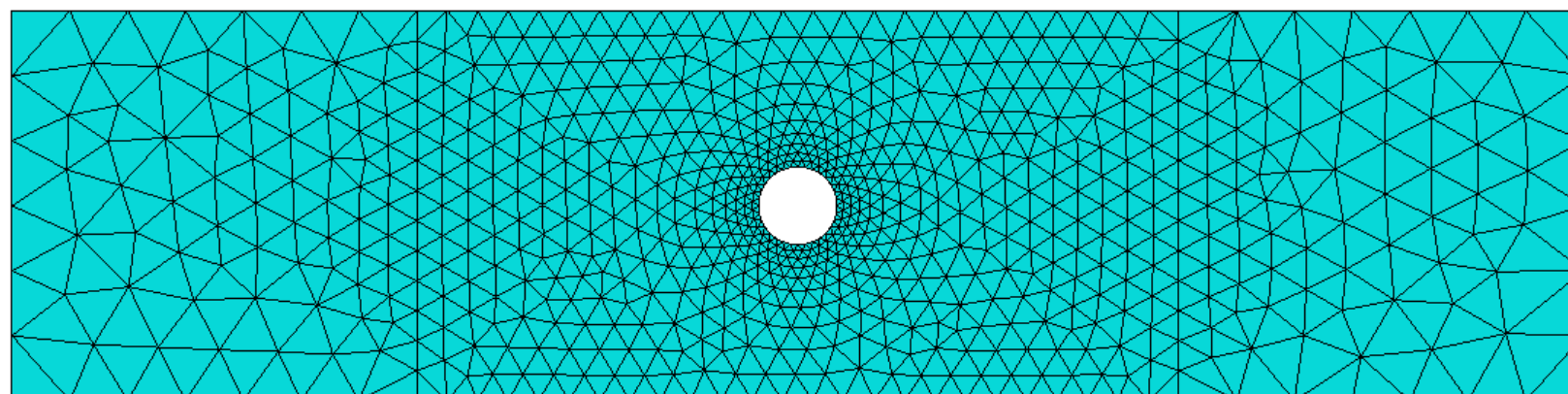
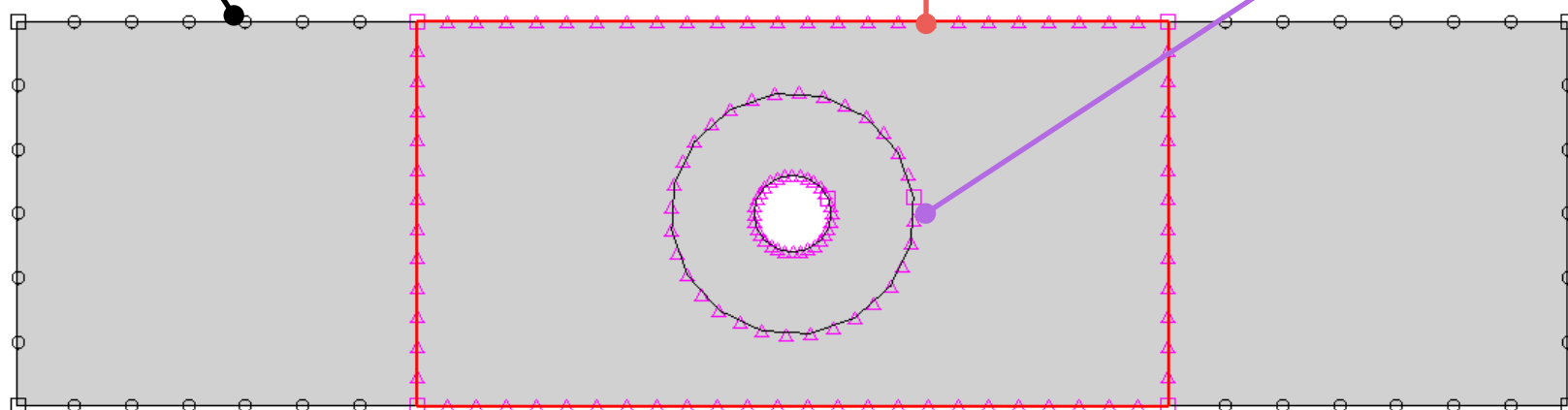
Taille globale de 10 mm



Taille locale de 5 mm



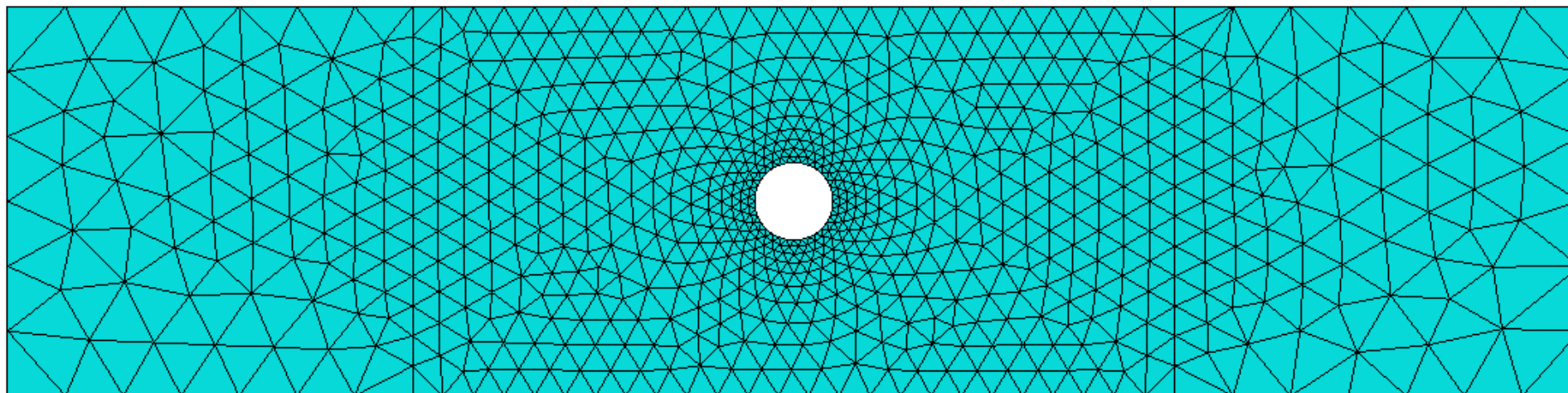
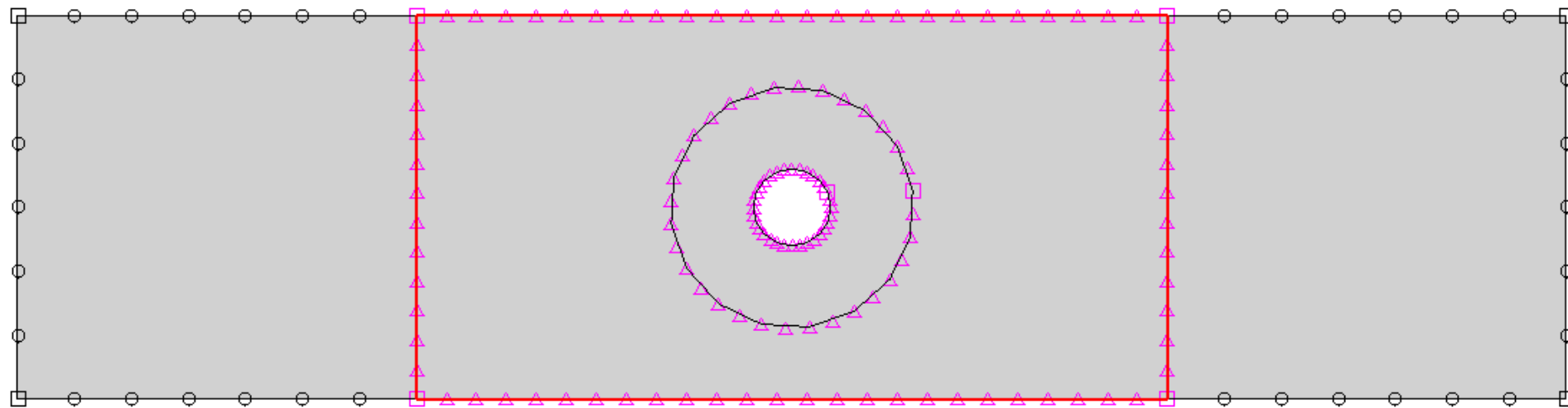
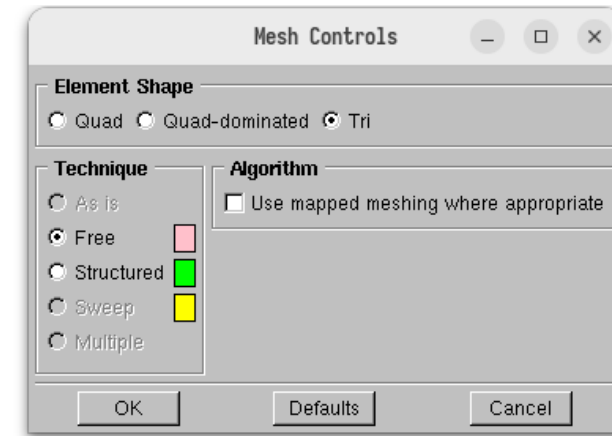
$N = 32$





# Partie 1 – *calcul élastique*

- Mailler le modèle avec des éléments triangulaires (maillage libre, Delaunay)



# Partie 1 – calcul élastique

- **Q1** Réaliser une première simulation, et relever les niveaux de contraintes  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  et  $S_{12}$  maximales dans les différents plis.
- **Q2** Comparer ces valeurs à celles du critère d'endommagement de Hashin. Que pouvez-vous en conclure ?



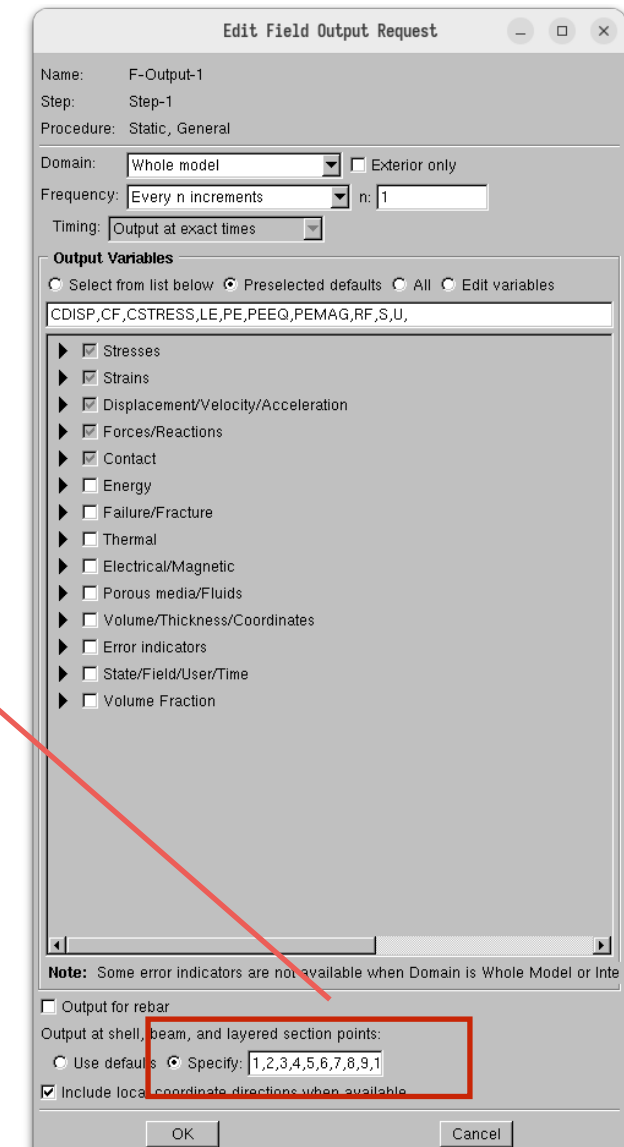
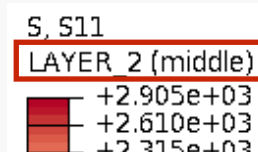
Pour les éléments coques, Abaqus ne sort par défaut que les valeurs sur les faces supérieure et inférieures.

Pour accéder aux valeurs dans les autres plis, il faut modifier le *Field Output Request*, en spécifiant explicitement les points d'intégration pour lesquels on veut les résultats.

Ici, nous avons 4 plis x 3 points d'intégration par pli = 12 points d'intégration. Il faut donc renseigner : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

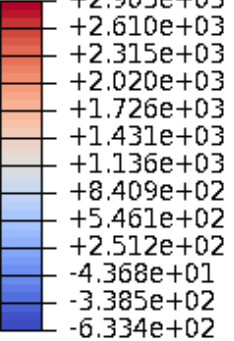
Pour accéder aux valeurs dans chaque pli, menu : *Result -> Section Points*, puis *Selection Method: Plies*

Le nom du pli affiché est indiqué dans la légende

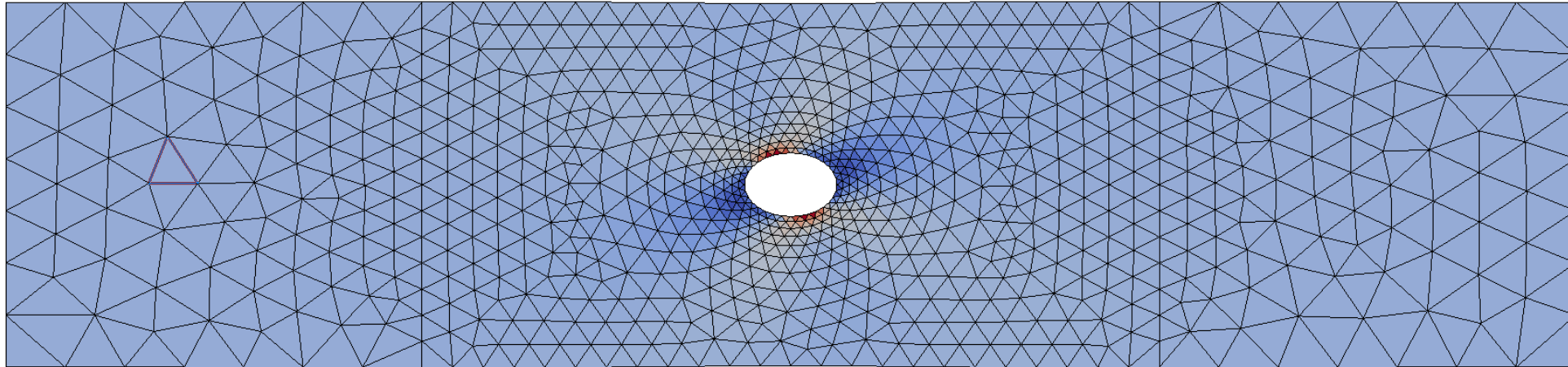


# Partie 1 – calcul élastique

S, S11  
LAYER\_2 (middle)



+2.905e+03
+2.610e+03
+2.315e+03
+2.020e+03
+1.726e+03
+1.431e+03
+1.136e+03
+8.409e+02
+5.461e+02
+2.512e+02
-4.368e+01
-3.385e+02
-6.334e+02



Par défaut, les déformations et les contraintes sont affichées dans le repère locale du pli (1: direction des fibres). Pour le pli à 0°, le repère matériau (1,2,3) est aligné avec le repère global (x,y,z). Pour le pli à 90°, la direction 1 correspond à la direction y.

Si vous voulez afficher les contraintes dans le repère global, il faut faire un changement de repère (cf. *tutoriel*)

## Partie 2 – calcul élastique + critère Hashin

- Modifier les propriétés matériaux pour ajouter le critère d'initiation de Hashin

**Edit Material**

Name: T300-M18

Description:

**Material Behaviors**

Hashin Damage

Elastic

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

**Hashin Damage**

Alpha: 0

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Suboptions

**Data**

	Longitudinal Tensile Strength	Longitudinal Compressive Strength	Transverse Tensile Strength	Transverse Compressive Strength	Longitudinal Shear Strength	Transverse Shear Strength
1	2050	1200	62	190	81	81

OK Cancel

*Mechanical -> Damage for Fiber-Reinforced Composite -> Hashin Damage*

## Partie 2 – calcul élastique + critère Hashin

- Modifier également le *Field Output Request* pour accéder à la valeur des critères de chacun des 4 modes dans les résultats

***Failure/Fracture : HSNFTCRT, HSNFCCRT, HSNMTCRT et HSNMCCRT***

Dialog box: Edit Field Output Request

Name: F-Output-1  
Step: Step-1  
Procedure: Static, General

Domain: Whole model ☐ Exterior only  
Frequency: Every n increments n: 1  
Timing: Output at exact times

Output Variables

☒ Select from list below ☐ Preselected defaults ☐ All ☐ Edit variables

S,PE,PEEQ,PEMAG,LE,U,RF,CF,CSTRESS,CDISP,HSNFTCRT,HSNFCCRT,HSN

☐ DBT, Time at bond failure  
☐ DBSF, Fraction of remaining failed bond stress  
☐ OPENBC, Opening behind crack tip at bond failure  
☐ CRSTS, Critical stress at bond failure  
☐ ENRRT, Strain energy release rates  
☐ EFENRRTR, Effective energy release rate ratio  
☐ BDSTAT, Bond state  
☐ DMICRT, Damage initiation criteria  
☒ HSNFTCRT, Hashin's fiber tensile damage initiation criterion  
☒ HSNFCCRT, Hashin's fiber compressive damage initiation criterion  
☒ HSNMTCRT, Hashin's matrix tensile damage initiation criterion  
☒ HSNMCCRT, Hashin's matrix compressive damage initiation criterion  
☐ FRPRATIO, Ratio of principal strain rates used for Muschenborn-Sonne  
☐ SHRRATIO, Shear stress ratio used for the shear damage initiation crite  
☐ CSDMG, Scalar stiffness degradation for cohesive surfaces  
☐ CSMAXSCRT, Maximum traction damage initiation criterion for cohesive  
☐ CSMAXUCRT, Maximum displacement damage initiation criterion for co  
☐ CSQUADSCRT, Quadratic traction damage initiation criterion for cohesi  
☐ CSQUADUCRT, Quadratic displacement damage initiation criterion for c  
☐ PHILSM, Level set value phi  
☐ PSILSM, Level set value psi  
☐ ENRRTXFEM, Strain energy release rates for lefm based xfm  
☐ Thermal  
☐ Electrical/Magnetic  
☐ Porous media/Fluids  
☐ Volume/Thickness/Coordinates  
☐ Error indicators

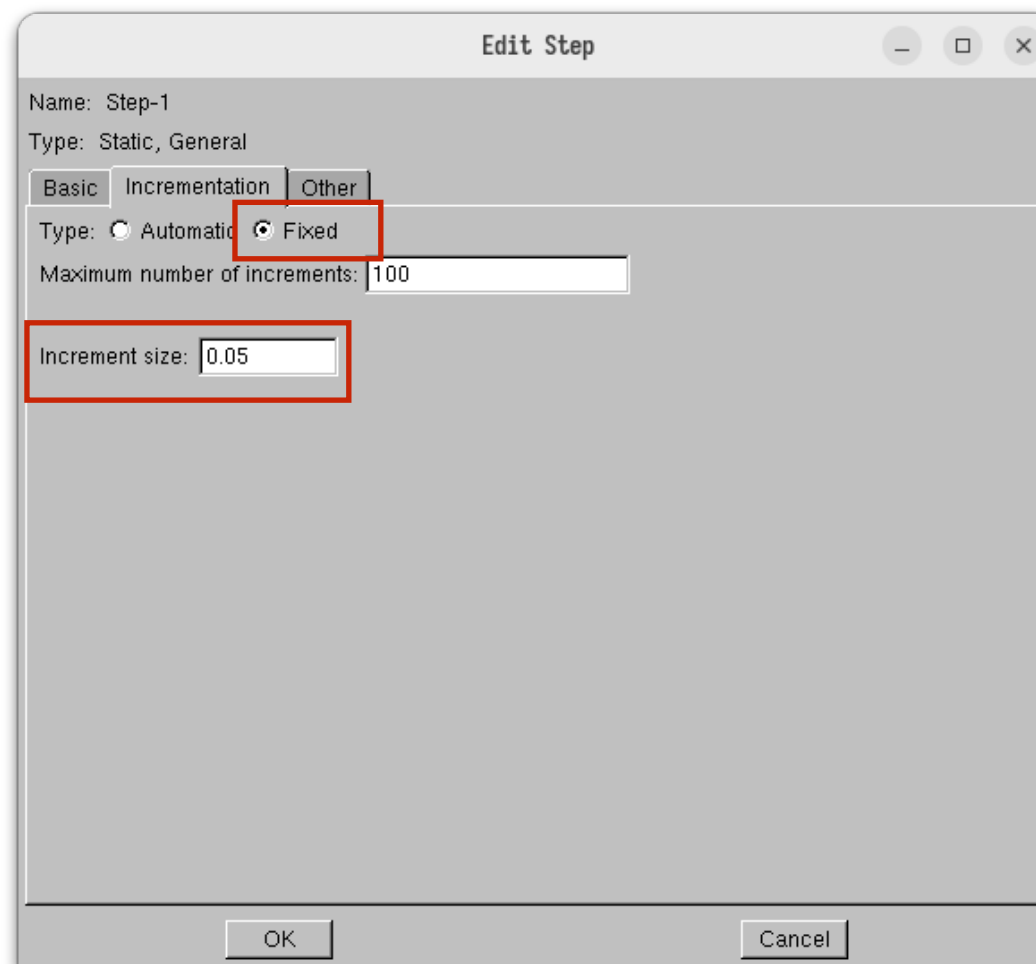
Note: Some error indicators are not available when Domain is Whole Model or Inte

☐ Output for rebar  
Output at shell, beam, and layered section points:  
☐ Use defaults ☒ Specify: 1,2,3,4,5,6,7,8,9,1  
☒ Include local coordinate directions when available

OK Cancel

## Partie 2 – calcul élastique + critère Hashin

- Enfin, fixer le pas de temps à 0,05 (pour avoir 20 incréments de chargement,  $t=0.05$ ,  $t=0.10$ ,  $t=0.15$ , ... au lieu d'un seul à  $t=1$ )



## Partie 2 – *calcul élastique + critère Hashin*

- **Q3** Relancer la simulation et relever la valeur des critères au temps final ( $t=1$ ) pour chacun de modes dans chaque pli.

① Les calculs sont toujours en élastiques pour l'instant. On calcule juste la valeur des critères d'amorçage (à partir des valeurs de contraintes locales)

- **Q4** Que peut-on en conclure sur l'initiation possible de l'endommagement ?

① Si  $F < 1$ , le critère n'est localement pas dépassé, si  $F \geq 1$ , la valeur indique de combien de fois on dépasse le critère. Par exemple si  $F = 3$ , l'état de contrainte local est 3 x supérieur à celui nécessaire pour amorcer l'endommagement.

## Partie 2 – calcul élastique + critère Hashin

- **Q5** Pour chaque pli, pour le mode d'endommagement ayant le critère d'amorçage avec la plus grande valeur, déterminer à partir de quel incrément de chargement ce mode endommagement s'initie.
- **Q6** En déduire, un critère de dimensionnement au premier endommagement (en terme de déplacement maximal admissible  $u_{endo}$ )

*Jusqu'à quel incrément de déplacement est-on sûr de ne pas avoir du tout d'endommagement ?*

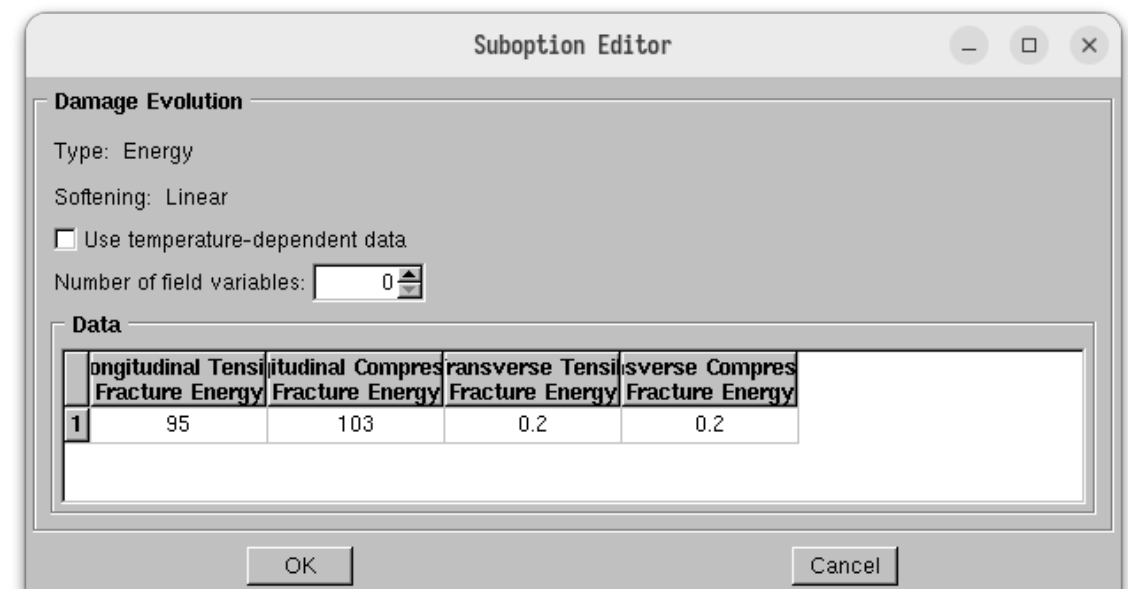
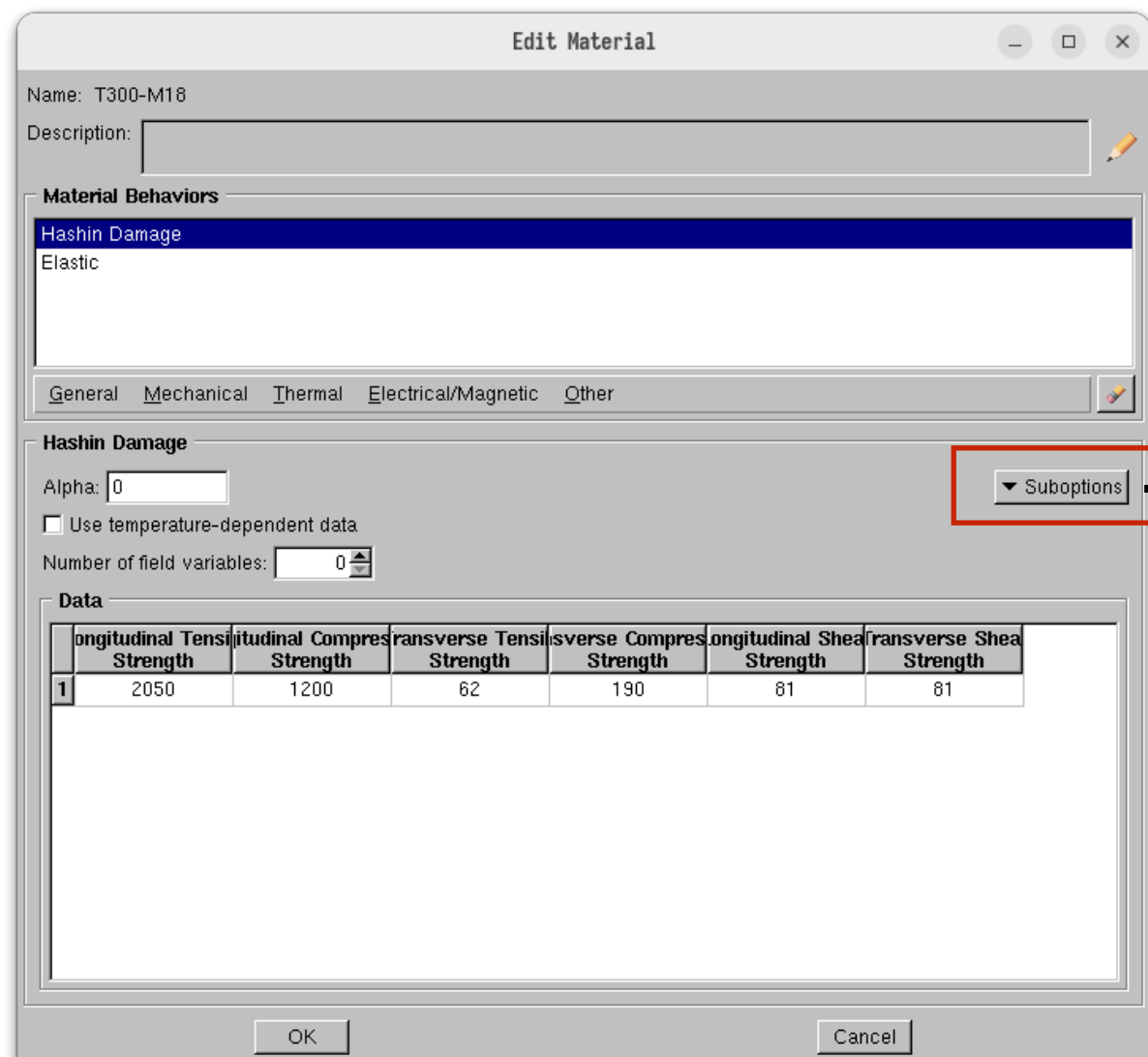
- **Q7** Proposer un premier scénario possible d'endommagement pour ce stratifié.

*Dans quel ordre, et suivant quelle modalité, les différents plis vont-ils s'endommager ?*



## Partie 3 – calcul non-linéaire (propagation)

- Modifier de nouveau les propriétés matériaux pour inclure le critère d'évolution de l'endommagement (*adoucissement linéaire, critère en énergie*)

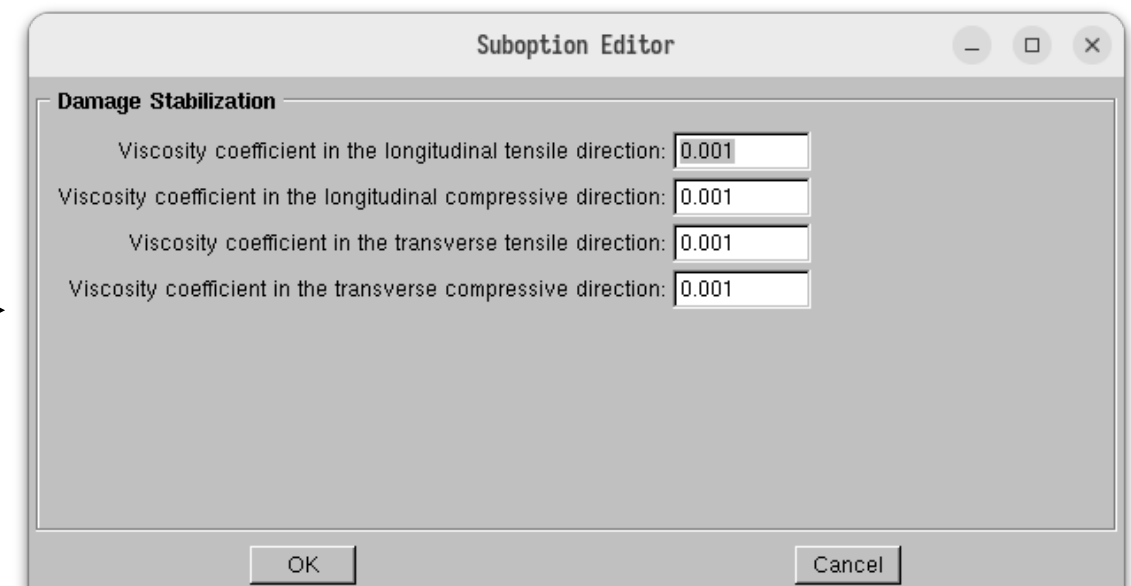
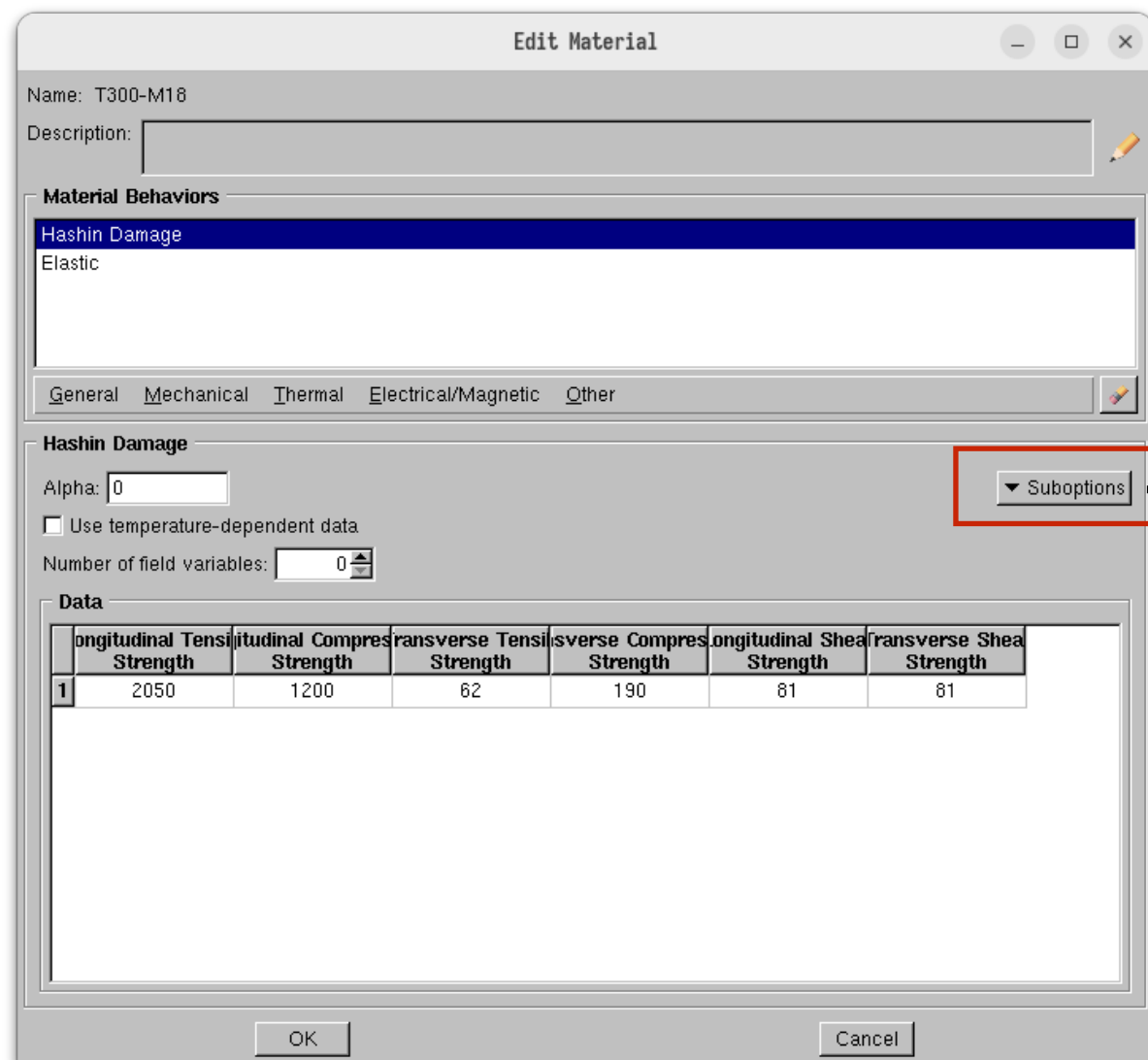


*Suboptions -> Damage Evolution*

*Mechanical -> Damage for Fiber-Reinforced Composite -> Hashin Damage*

## Partie 3 – calcul non-linéaire (propagation)

- Il est également nécessaire d'ajouter une *viscosité numérique* afin de faciliter la convergence du calcul (cf. § “*Viscous regularization*” de la doc Abaqus). Choisir une viscosité de  $\eta = 10^{-3}$  pour tous les modes.



Suboptions -> Damage Stabilization

Mechanical -> Damage for Fiber-Reinforced Composite -> Hashin Damage

## Partie 3 – *calcul non-linéaire (propagation)*

- Modifier les incréments de chargement pour permettre la convergence du calcul.
- Choisir un pas de temps *automatique*. Augmenter le nombre max. d'incréments à 500, avec un pas de temps min. de  $10^{-5}$  et un  $\Delta t$  de 0.05.



# Partie 3 – calcul non-linéaire (propagation)

- Modifier le *Field Output Request* pour sauvegarder les variables d'endommagement dans les résultats

**Failure/Fracture : DAMAGEFT, DAMAGEFC, DAMAGEMT, DAMAGEMC et DAMAGESHR**

Pour rappel, la variable *DAMAGESHR* correspond à la variable  $d_s$  qui agit sur le module de cisaillement (cf. Partie cours)

$$d_s = 1 - (1 - d_{FT})(1 - d_{FC})(1 - d_{MT})(1 - d_{MC})$$

**Edit Field Output Request**

Name: F-Output-1  
Step: Step-1  
Procedure: Static, General

Domain: Whole model ☐ Exterior only  
Frequency: Every n increments n: 1  
Timing: Output at exact times

**Output Variables**

☒ Select from list below ☐ Preselected defaults ☐ All ☐ Edit variables

S,PE,PEEQ,PEMAG,LE,U,RF,CF,CSTRESS,CDISP,DAMAGEFT,DAMAGEFC,DA

☒ Strains  
☒ Displacement/Velocity/Acceleration  
☒ Forces/Reactions  
☒ Contact  
☐ Energy  
☒ Failure/Fracture  
    ☐ DAMAGEC, Compressive damage  
    ☐ DAMAGET, Tensile damage  
    ☒ DAMAGEFT, Fiber tensile damage  
    ☒ DAMAGEFC, Fiber compressive damage  
    ☒ DAMAGEMT, Matrix tensile damage  
    ☒ DAMAGEMC, Matrix compressive damage  
    ☒ DAMAGESHR, Shear damage  
    ☐ SDEG, Scalar stiffness degradation  
    ☐ JK, Line spring J-integral stress intensity factors  
    ☐ CFAILURE, Failure measure components  
    ☐ DBS, Remaining stress in failed bond  
    ☐ DBT, Time at bond failure  
    ☐ DBSF, Fraction of remaining failed bond stress  
    ☐ OPENBC, Opening behind crack tip at bond failure  
    ☐ CRSTS, Critical stress at bond failure  
    ☐ ENRRT, Strain energy release rates  
    ☐ EFENRRTR, Effective energy release rate ratio  
    ☐ BDSTAT, Bond state  
    ☐ DMICRT, Damage initiation criteria  
    ☒ HSNFTCRT, Hashin's fiber tensile damage initiation criterion

**Note:** Some error indicators are not available when Domain is Whole Model or Inte

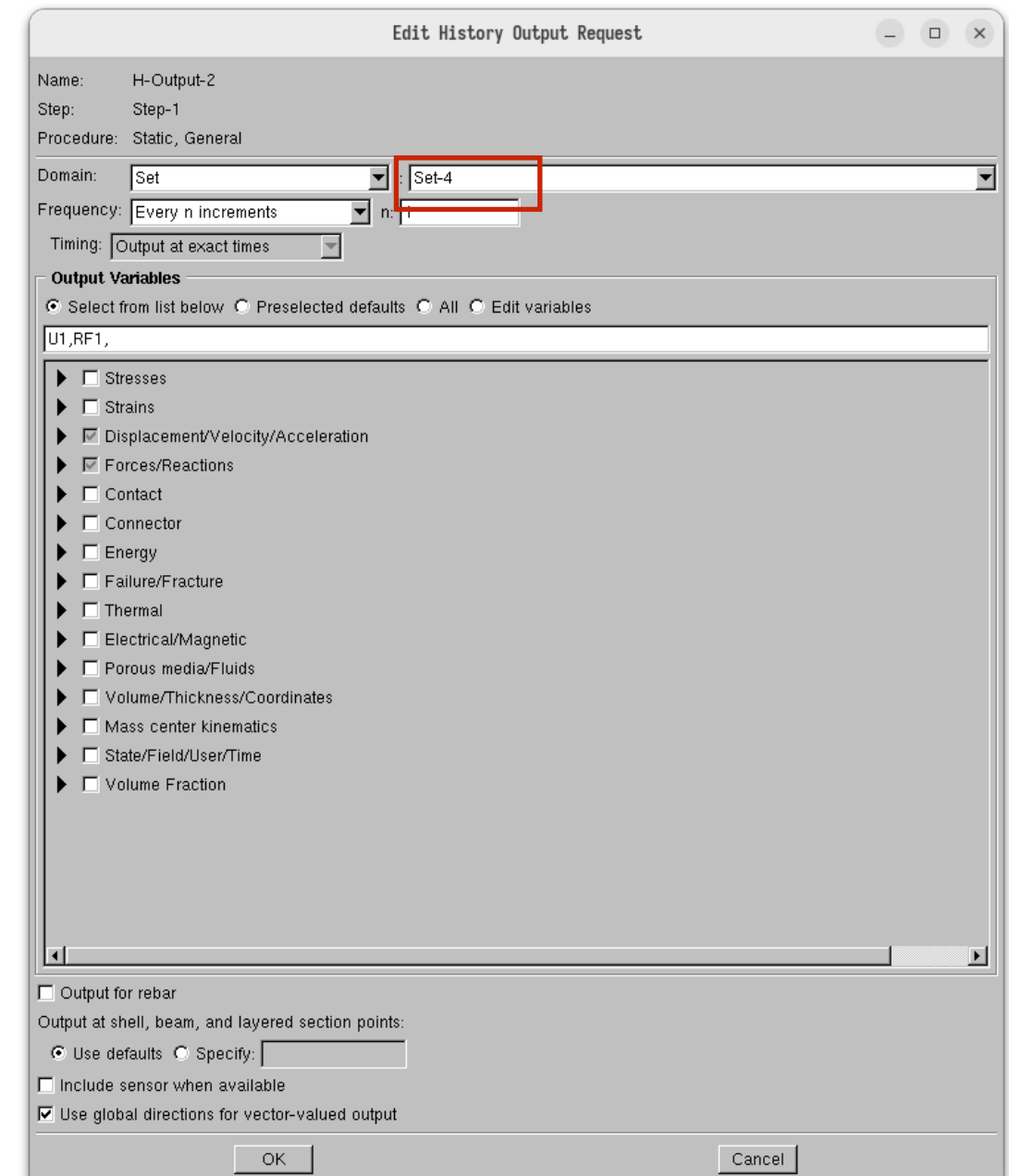
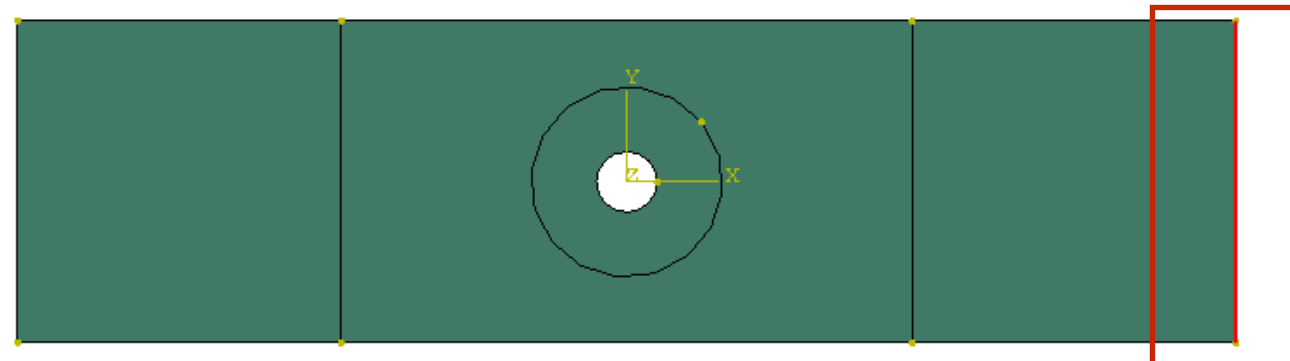
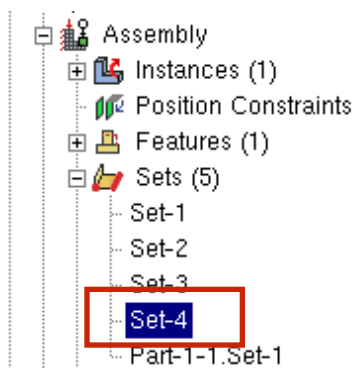
☐ Output for rebar  
Output at shell, beam, and layered section points:  
☐ Use defaults ☒ Specify: 1,2,3,4,5,6,7,8,9,1  
☒ Include local coordinate directions when available

OK Cancel

## Partie 3 – calcul non-linéaire (propagation)

- Enfin, créer un *History Output Request* pour pouvoir accéder au déplacement  $U_1$  et à la force de réaction  $RF_1$  sur l'arête sur laquelle on impose le déplacement.

*Vérifier préalablement le nom du Set qui correspond à cette arête dans votre modèle, ici c'est Set-4*



## Partie 3 – *calcul non-linéaire (propagation)*

- **Q8** Lancer une nouvelle simulation avec le modèle non-linéaire. Tracer la réaction (somme des forces) en fonction du chargement, et déterminer la force à rupture de l'éprouvette.

*Si besoin, aidez-vous du tutoriel “Tracé de la réaction en fonction du temps”*

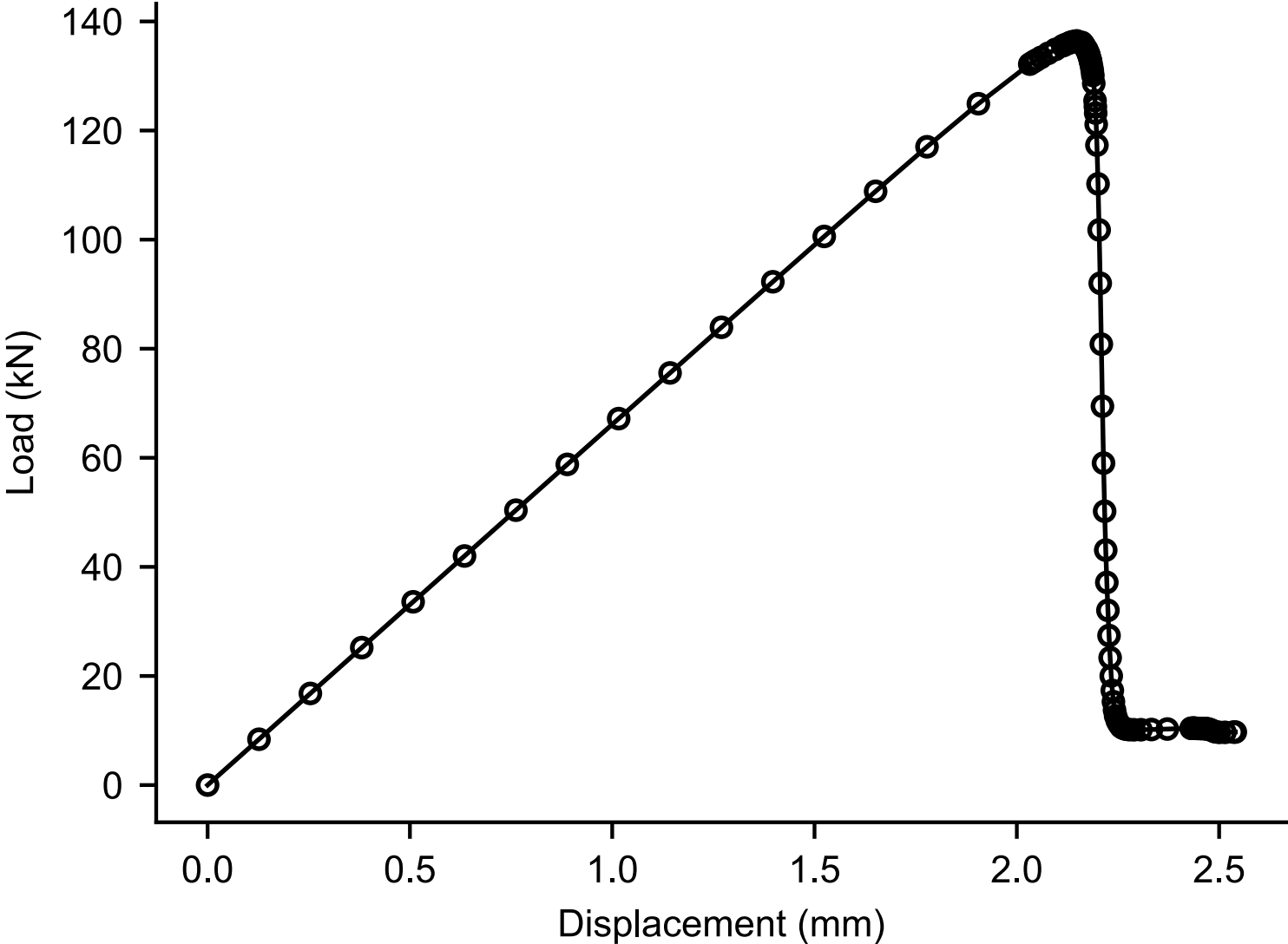
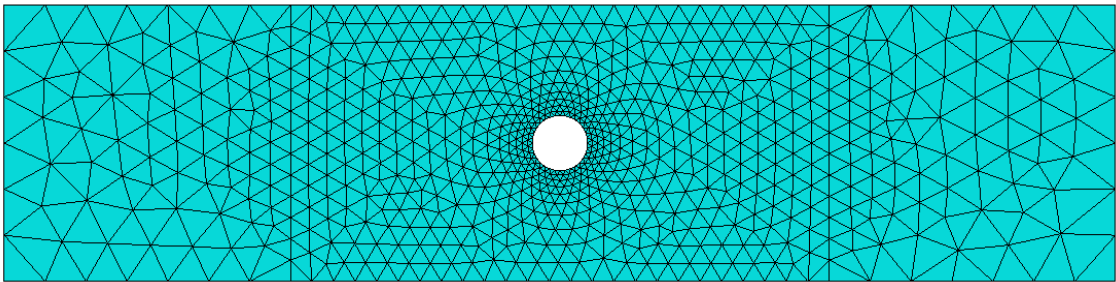


L'endommagement est maintenant activé. Lorsqu'un critère atteint  $F = 1$ , la variable d'endommagement correspondante commence à évoluer.



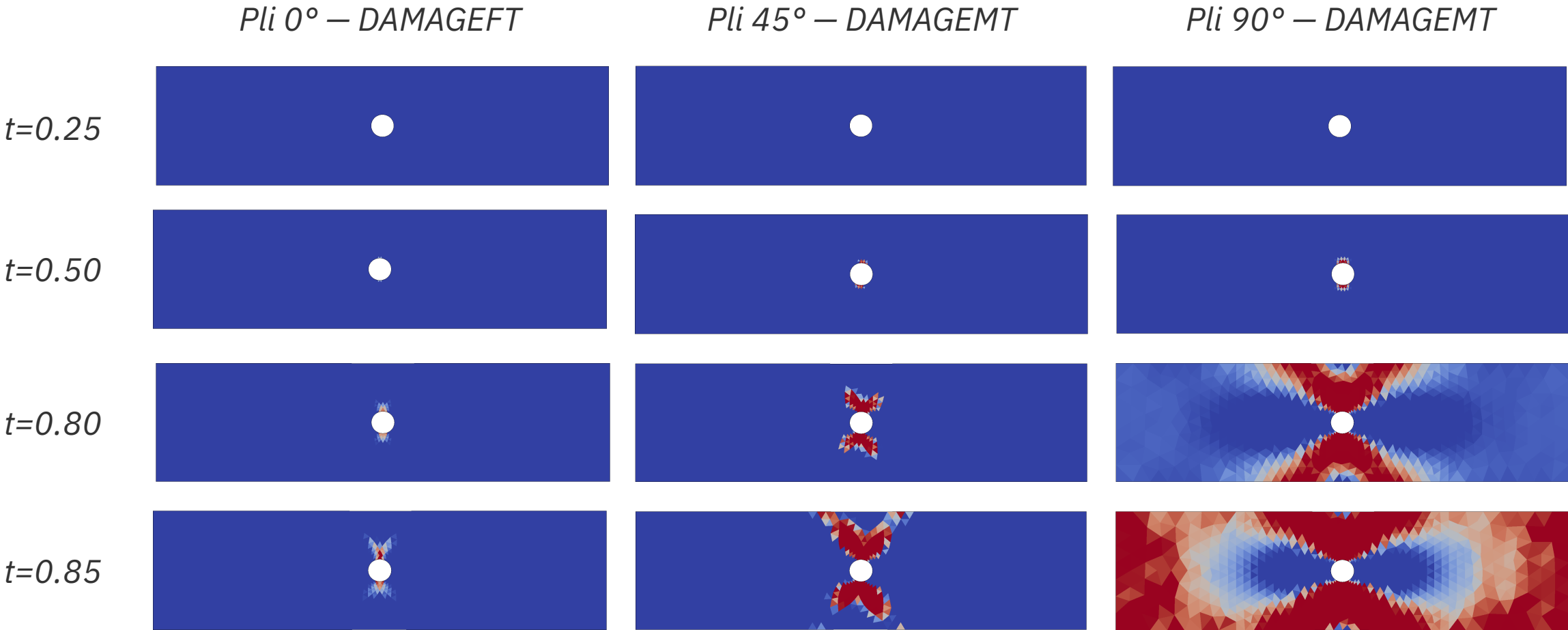
La simulation peut durer de 5 à 10 minutes en fonction des machines. Vous pouvez suivre l'avancement du calcul avec *Job -> Monitor*.

# Partie 3 – calcul non-linéaire (propagation)



# Partie 3 – calcul non-linéaire (propagation)

- **Q9** Afficher pour chaque pli l'évolution des variables d'endommagement en fonction du chargement.





## Partie 3 – *calcul non-linéaire (propagation)*

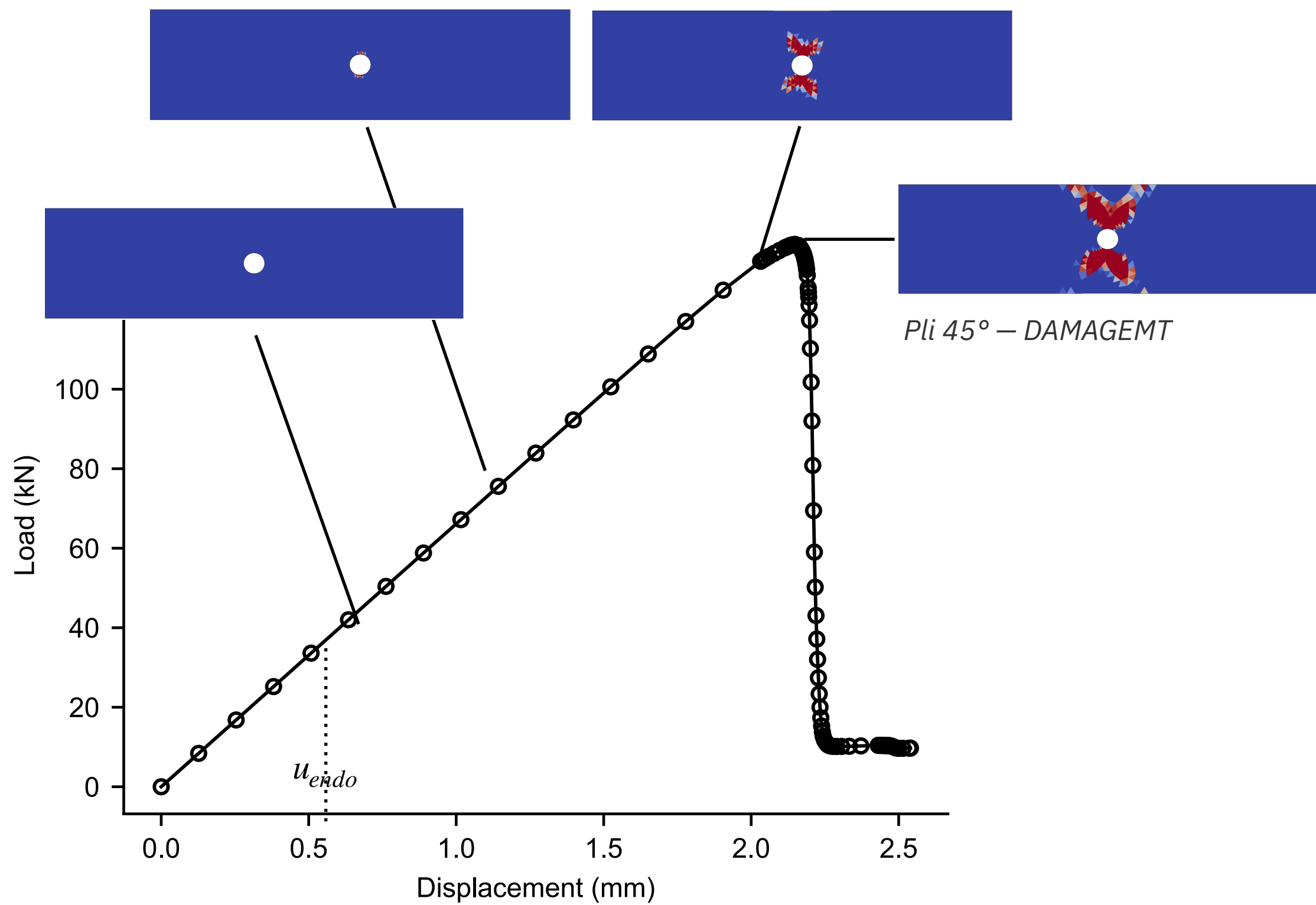
- **Q10** Mettre en relation le développement de l'endommagement dans les différents plis avec la courbe force-déplacement obtenue.
  - *L'apparition du premier endommagement est-il critique (cf. Q6) ?*
  - *L'endommagement des différents plis est-il observable de la même manière sur la courbe de comportement ? Pourquoi ?*
  - *Quel mode d'endommagement entraîne la rupture finale de l'éprouvette ?*



Vous pouvez éventuellement synchroniser l'affichage des variables d'endommagement et celui de la courbe force-temps dans deux *viewports*, cf. tutoriel "Synchronisation de viewports"

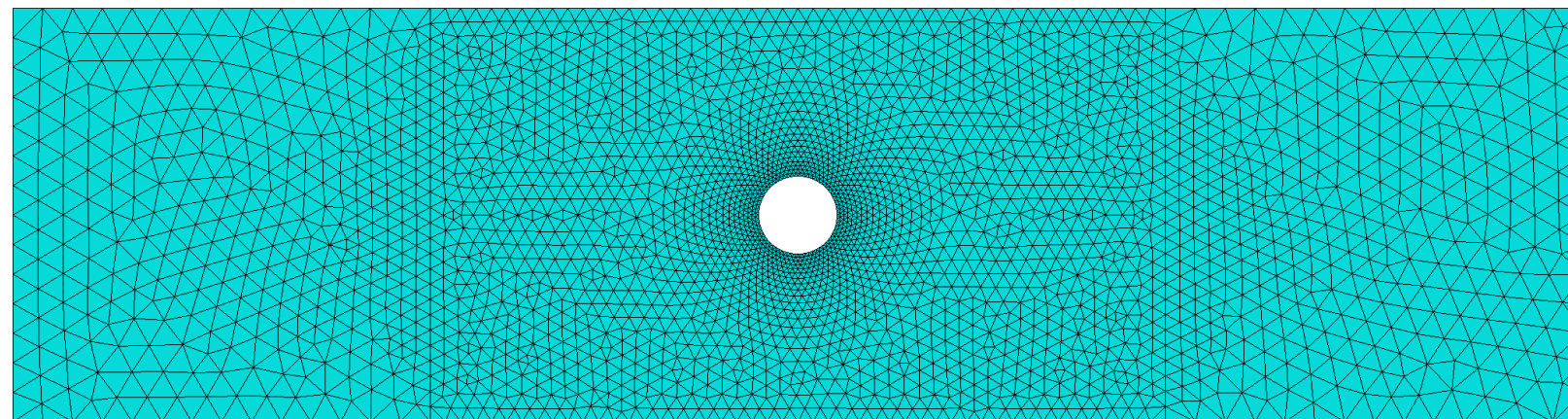
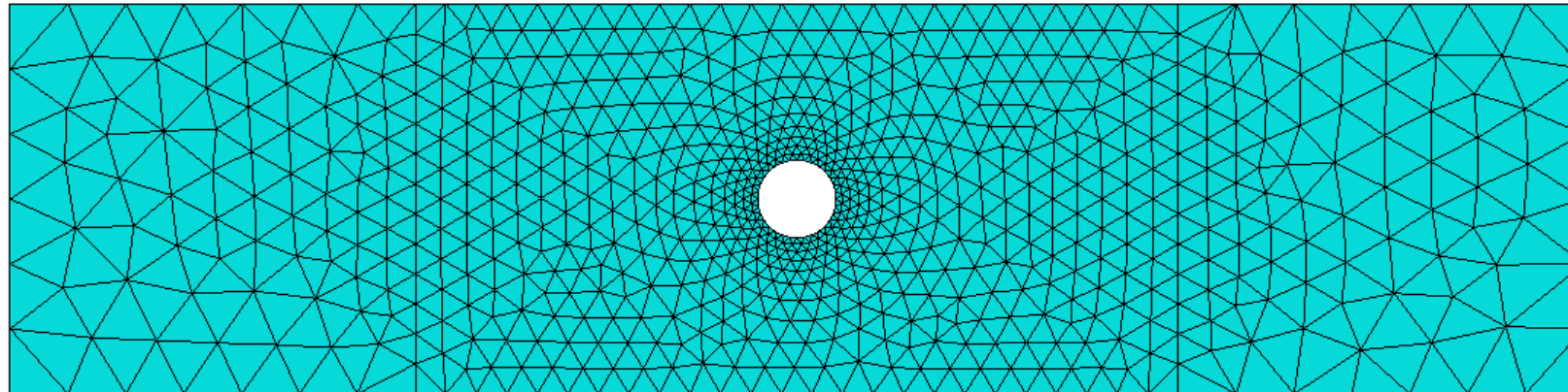
- **Q11** Confirmer ou modifier le scénario d'endommagement de Q7 au vu des résultats obtenus.

# Partie 3 – calcul non-linéaire (propagation)



## Partie 4 – *sensibilité au maillage*

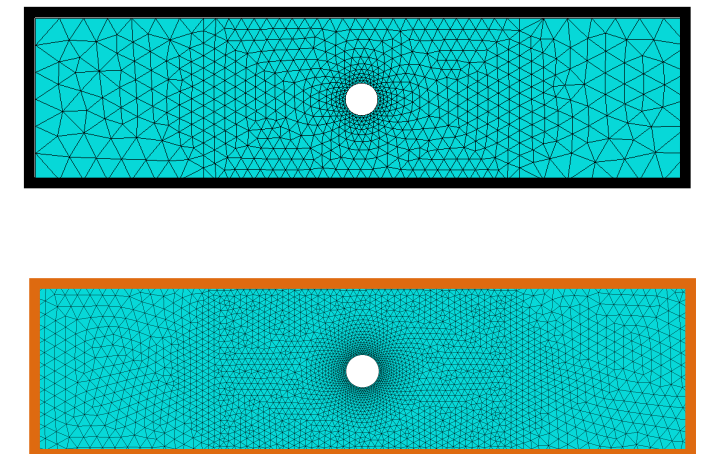
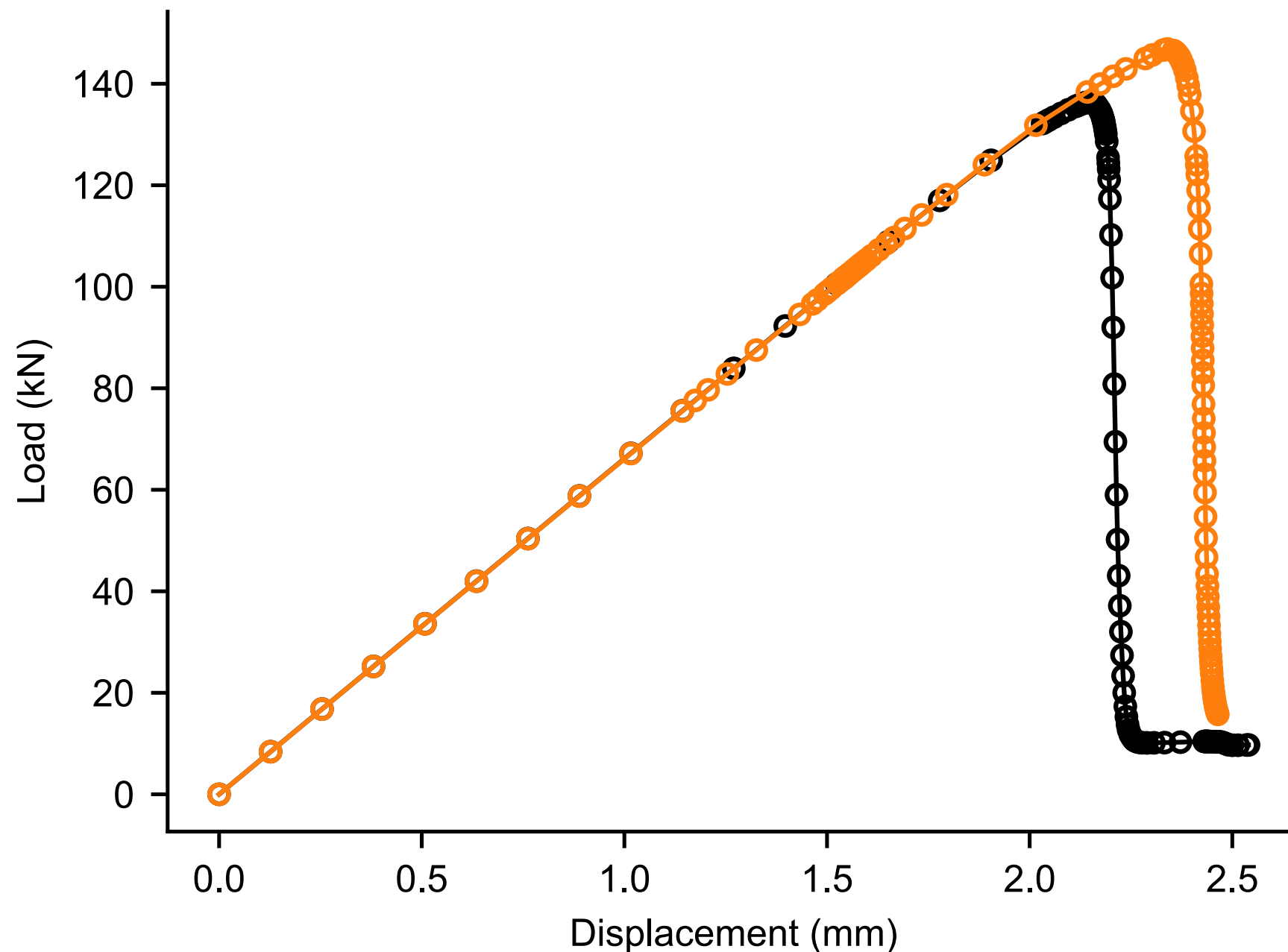
- Relancer la simulation avec un maillage similaire (même type d'élément) mais avec des tailles de mailles plus fines



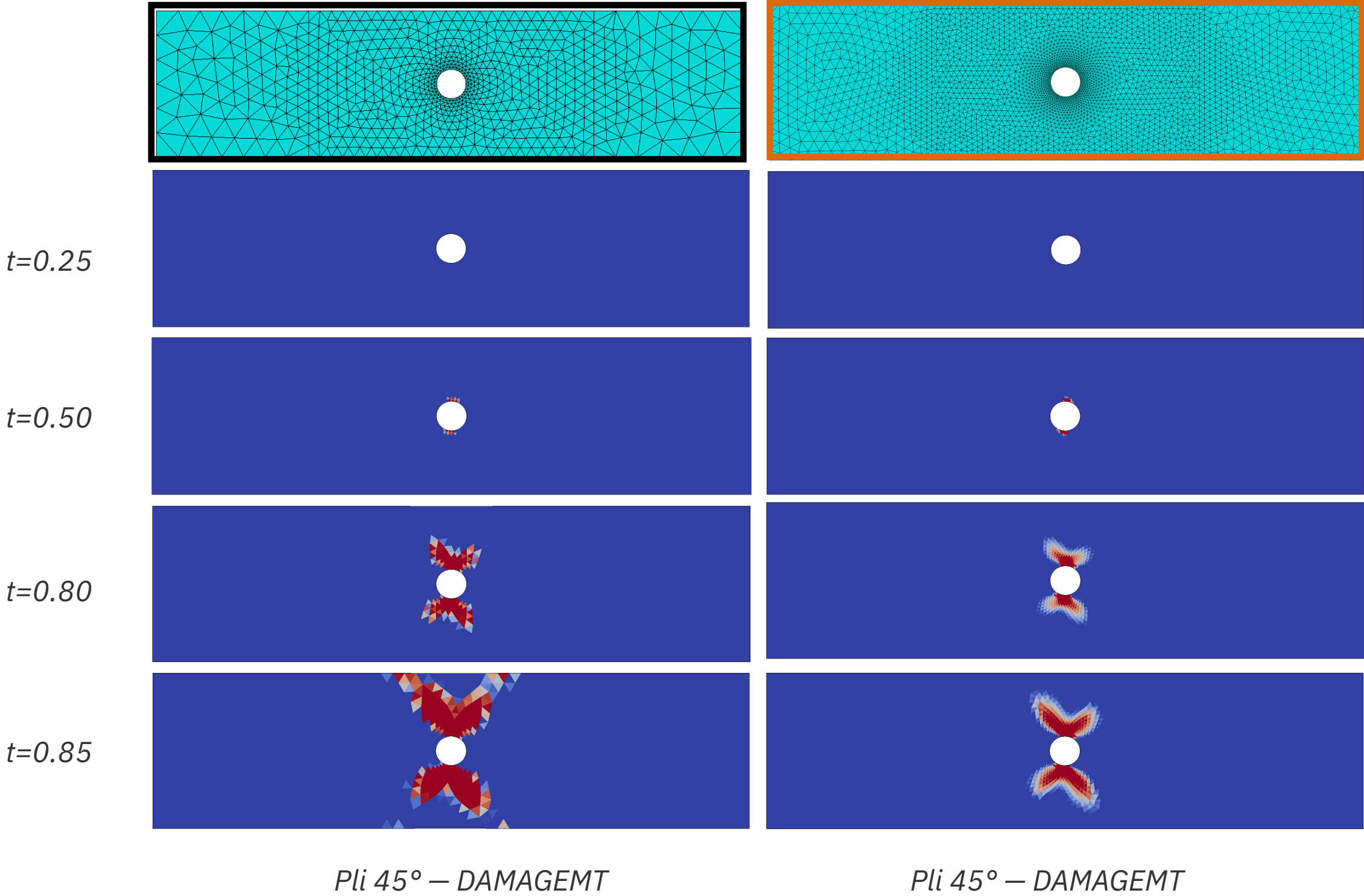
La simulation peut être longue avec un maillage fin... Suivez l'avancement du calcul avec *Job -> Monitor*. Vous pouvez également commencer à visualiser les résultats avec *Job -> Results* avant la fin du calcul.

## Partie 4 – *sensibilité au maillage*

- **Q12** Obtient-on exactement la même réponse avec deux maillages de taille différente ? En termes de réponse force-déplacement ? En termes de développement de l'endommagement ? Pourquoi ?



# Partie 4 – *sensibilité au maillage*



## Partie 5 – *effet de l'empilement*

- Modifier la *Section* pour considérer maintenant un empilement  $[90_2/0_2]_s$  et conservant le reste du modèle identique (même propriétés matériaux, mêmes conditions limites)

**Edit Section**

Name: Section-1

Type: Shell / Continuum Shell, Composite

Section integration: ☒ During analysis ☐ Before analysis

Layup name:

Basic | **Advanced**

Thickness integration rule: ☒ Simpson ☐ Gauss

☒ Symmetric layers

Material	Thickness	Orientation Angle	Integration Points	Ply Name
T300-M18	1	90	3	
T300-M18	1	0	3	

Options:

OK Cancel



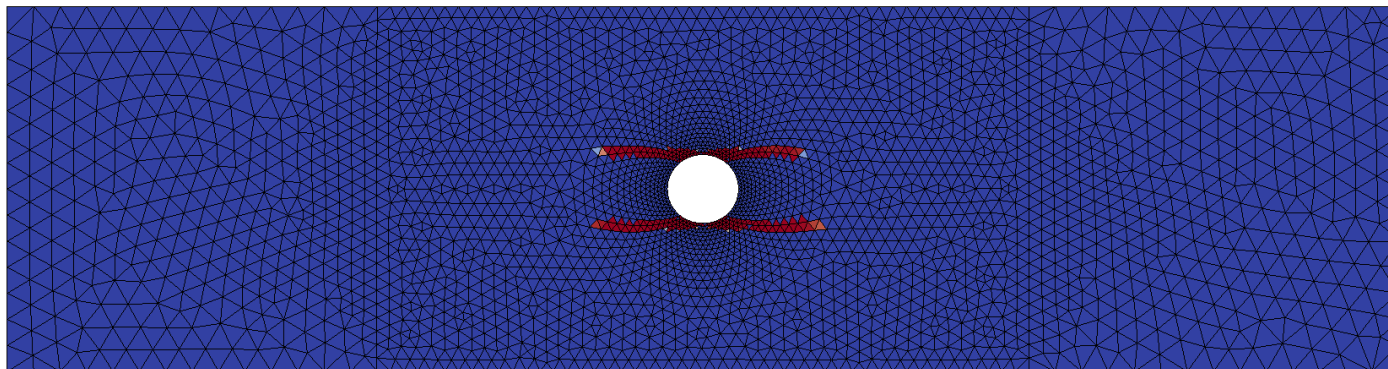
## Partie 5 – effet de l'empilement

- **Q13** Simuler l'endommagement de ce nouveau stratifié. Qu'observez-vous en termes de modes d'endommagement par rapport à l'empilement quasi-iso précédent ?

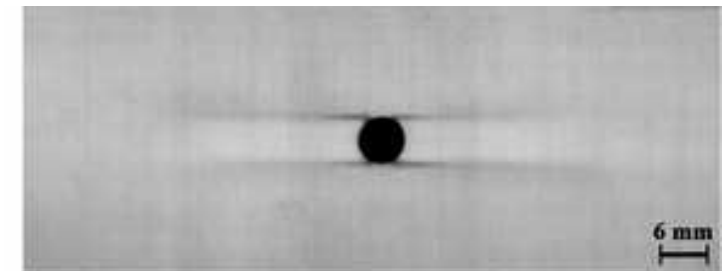
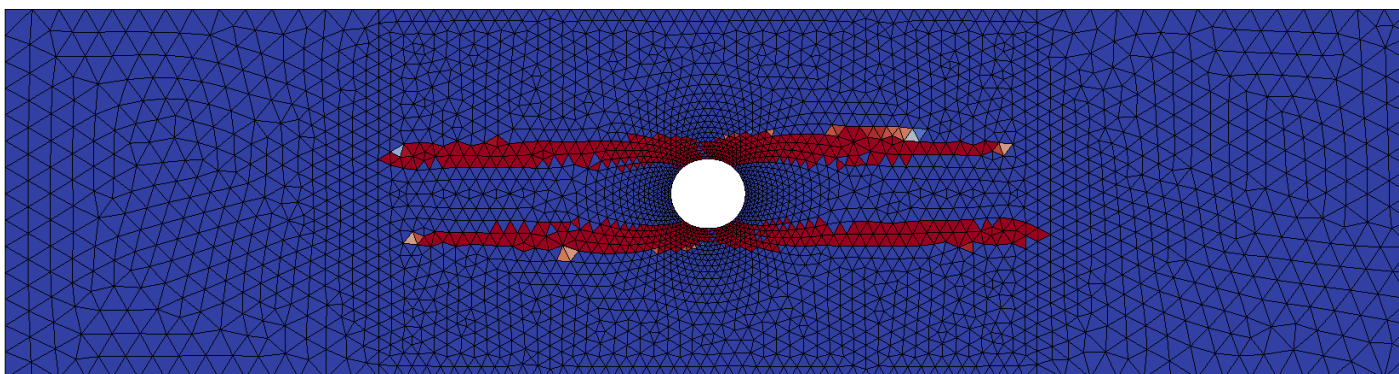
*Observer notamment le développement des fissures de splitting dans les plis à  $0^\circ$ , typique des éprouvettes trouées  $[0/90]$*

*Pli  $0^\circ$  – DAMAGE*

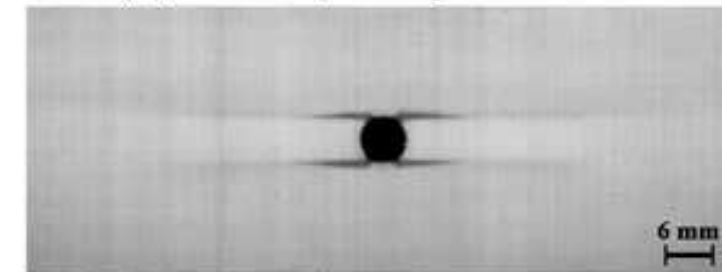
$t=0.40$



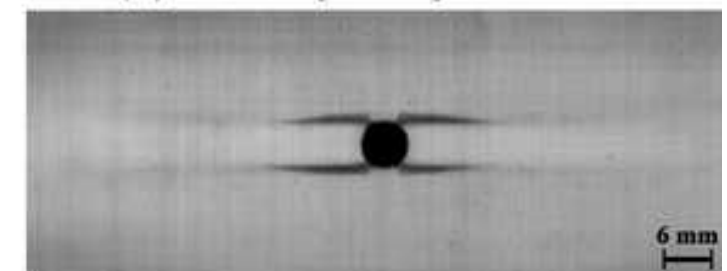
$t=0.50$



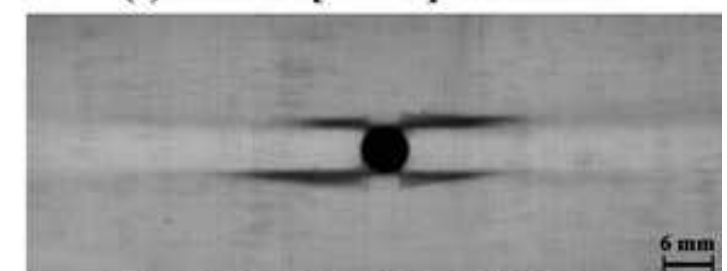
(b) GFRP  $[90_2/0_2]_s$  65%  $S_{OHT}$



(d) GFRP  $[90_2/0_2]_s$  75%  $S_{OHT}$



(f) GFRP  $[90_2/0_2]_s$  85%  $S_{OHT}$



(h) GFRP  $[90_2/0_2]_s$  95%  $S_{OHT}$

[McCarthy2008]