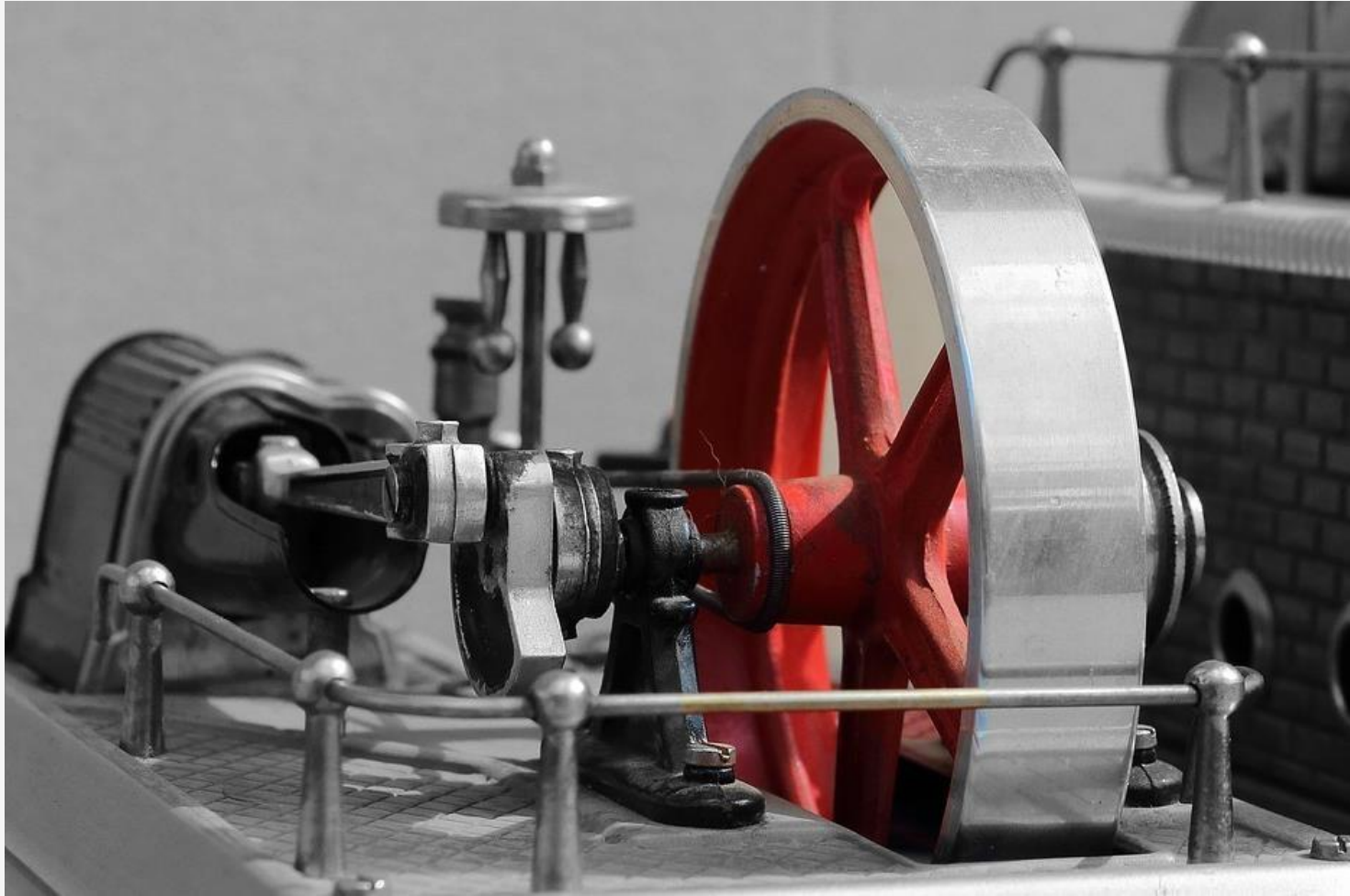


(l'inoubliable) TP3 : Etude du volant d'inertie



TP3 : Etude du volant d'inertie

1

Contexte de l'étude

2

Hypothèses de modélisation

3

Modélisation axisymétrique

4

Modélisation 3D

5

Prise en compte de l'anisotropie du matériau

6

Effet de la forme de la jante



Contexte de l'étude

Le stockage inertiel

- ✓ **Stockage inertiel** ou **volant d'inertie**
= système rotatif de stockage et restitution d'énergie cinétique
- ✓ $E_k = \frac{1}{2} J \omega^2$: d'autant plus d'énergie que le moment d'inertie est grand et que le solide tourne vite
- ✓ Absorbe les irrégularités d'un moteur (à-coups des pistons)
- ✓ Stockage d'énergie → conversion d'énergie
- ✓ **Exemple** : stockage de courte durée (~15min)
pour réguler la production électrique
(roulements magnétiques, confinement sous vide)



Le stockage inertiel

- ✓ **Avantages** : très haut rendement, temps de réponse court, technologie fiable et sans entretien, aucun produit fossile
- ✓ **Inconvénients** : temps de stockage limité (15-30min), efforts en jeu !

*Exemple : centrale de 20MW
constitué de 200 volants
inertiels pour la régulation de
fréquence de New York*



*Le Gyrobus : recharge du
volant lors de la montée /
descente des passagers*



Choix du matériau ?

- **limite d'élasticité** du matériau rapidement atteinte sous la force centrifuge ...
- *Exemple* : un volant en acier éclate avant d'atteindre la vitesse du son (utilisation de titane inutile car plus résistant mais moins lourd)
- Solution actuelle : volants en **kevlar** ou en **fibres de carbone**
- Les efforts sur les paliers sont très importants, notamment en raison de l'effet **gyroscopique** du volant soumis aux **forces de Coriolis**

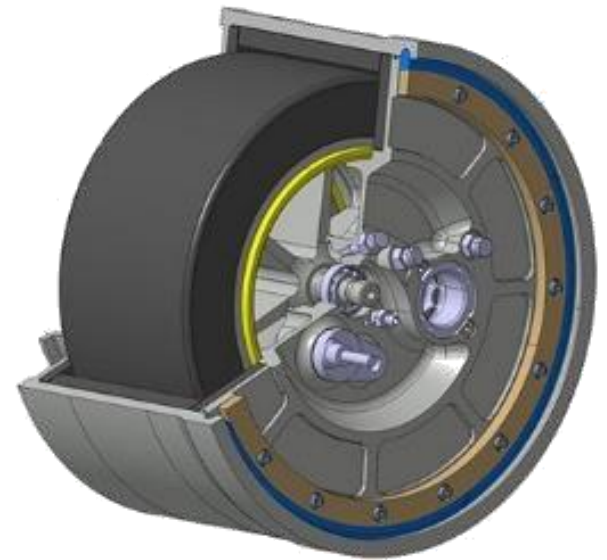


Problématique :

pour une forme et un matériau donné, quelle est la vitesse de rotation maximale ?

Le système de recuperation d'énergie cinétique (SREC, ou KERS en anglais)

- ✓ **Idée** : récupérer l'énergie lors du freinage
→ habituellement perdue sous forme de chaleur
- ✓ Solution datant des **années 50** !
- ✓ Plusieurs solutions possibles :
 - Air comprimé
 - Batteries
 - Transformation en électricité
 - Volant d'inertie
- ✓ En formule 1 depuis 2009 :
permet de gagner **80 chevaux** pendant 6.5 secondes !



Le système de recuperation d'énergie cinétique (SREC, ou KERS en anglais)

✓ Volant d'inertie



pas de conversion de l'énergie mécanique
donc bon rendement



encombrant, poids, pertes mécaniques

✓ Batterie



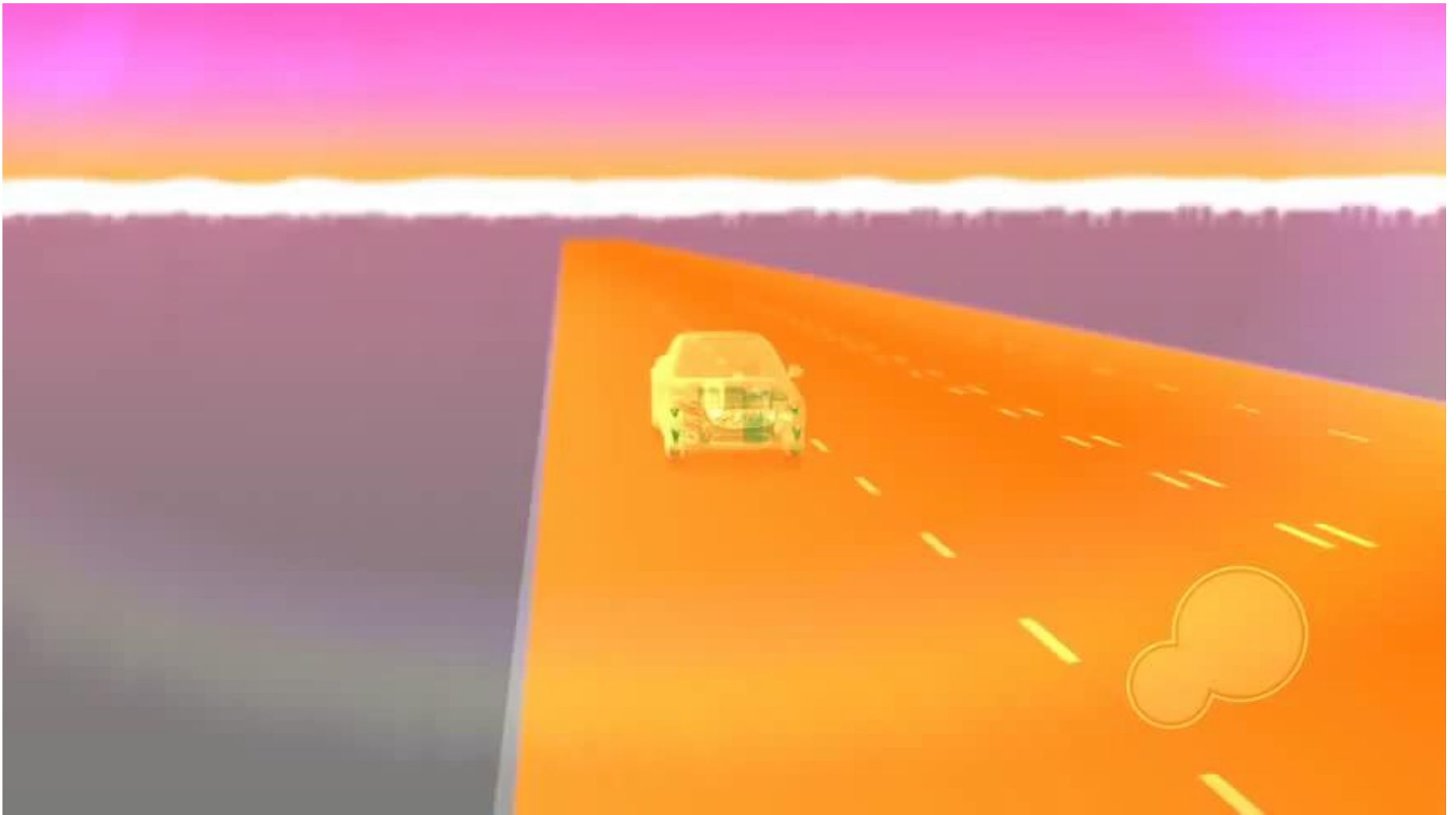
pas d'embrayage



tolérance aux charges / décharges
→ supercondensateurs dans le futur ?

- ✓ Quelques propositions en endurance automobile,
en formule 1, et en automobile de tourisme
(ex : Ferrari Fiorano 599 HY-KERS)

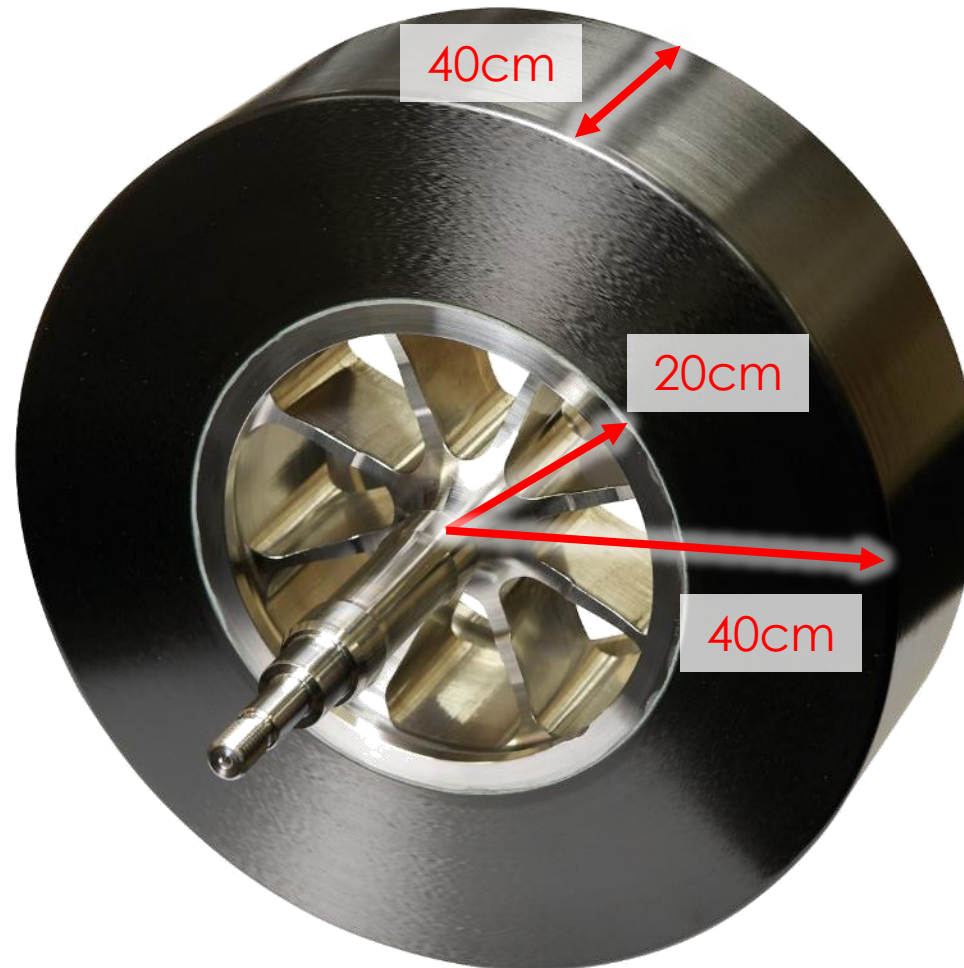






Hypothèses de modélisation

Cas d'étude : volant d'inertie en fibre de carbone



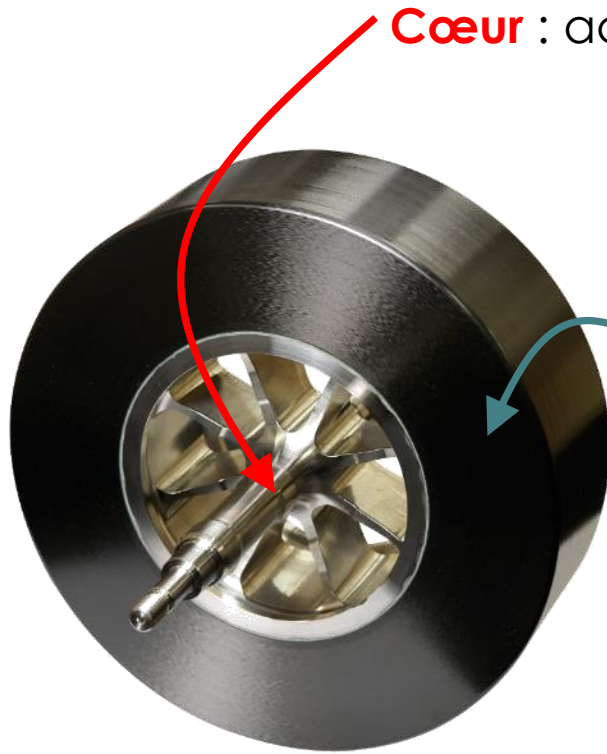
Cas d'étude : volant d'inertie en fibre de carbone

Cœur : acier allié « 36 Ni Cr Mo 16 »

Limite d'élasticité : 1050 Mpa

Module d'Young : 205 Gpa

Masse volumique : 7800 kg/ m³



Volant : composite fibres longues
carbone + résine époxy

Masse volumique : 1500 kg/ m³

Propriétés mécaniques ...?

Hypothèse 1 : isotrope

Hypothèse 2 : anisotrope



Parenthèse théorique : les matériaux anisotropes

- En **élasticité linéaire** en **HPP**, on a les relations (dans le cas **isotrope**):

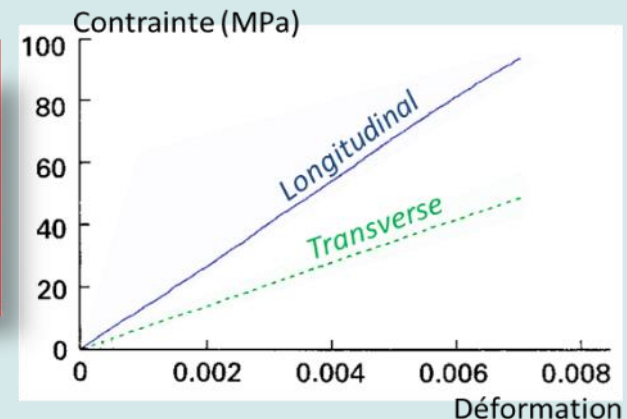
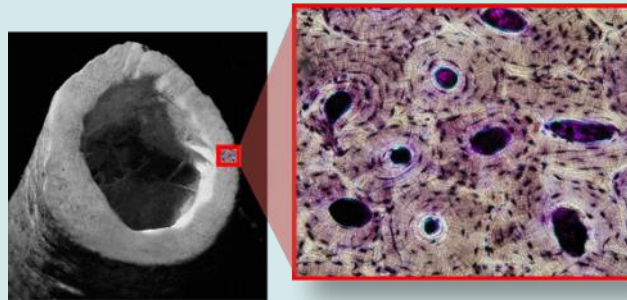
$$\underline{\underline{\sigma}} = \lambda \text{Tr}(\underline{\underline{\varepsilon}}) \underline{\underline{I}} + 2\mu \underline{\underline{\varepsilon}}$$

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \frac{1+\nu}{E} \underline{\underline{\sigma}} - \frac{\nu}{E} \text{Tr}(\underline{\underline{\sigma}}) \underline{\underline{I}}$$

→ **deux** paramètres scalaires uniquement

→ **Anisotropie: nécessite davantage de paramètres**

Exemple :
l'os cortical



- Cas général de l'élasticité linéaire : $\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{A}} : \underline{\underline{\varepsilon}}$



Parenthèse théorique : les matériaux anisotropes

- Tenseur d'ordre 4 des modules d'élasticité

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{A}} : \underline{\underline{\varepsilon}} \Rightarrow \sigma_{ij} = A_{ijkl} \varepsilon_{kl}$$

→ Notation de **Voigt** pour des tenseurs symétriques

- Exemple pour la composante σ_{13} :

$$\begin{aligned} \sigma_{13} &= A_{1311} \varepsilon_{11} + A_{1312} \varepsilon_{12} + A_{1313} \varepsilon_{13} + A_{1321} \varepsilon_{21} + A_{1322} \varepsilon_{22} + A_{1323} \varepsilon_{23} + A_{1331} \varepsilon_{31} + A_{1332} \varepsilon_{32} + A_{1333} \varepsilon_{33} \\ &= A_{1311} \varepsilon_{11} + A_{1322} \varepsilon_{22} + A_{1333} \varepsilon_{33} + 2A_{1312} \varepsilon_{12} + 2A_{1313} \varepsilon_{13} + 2A_{1323} \varepsilon_{23} \end{aligned}$$

- Ecriture **matricielle** :

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{1111} & A_{1122} & A_{1133} & A_{1123} & A_{1113} & A_{1112} \\ A_{2211} & A_{2222} & A_{2233} & A_{2223} & A_{2213} & A_{2212} \\ A_{3311} & A_{3322} & A_{3333} & A_{3323} & A_{3313} & A_{3312} \\ A_{2311} & A_{2322} & A_{2333} & A_{2323} & A_{2313} & A_{2312} \\ A_{1311} & A_{1322} & A_{1333} & A_{1323} & A_{1313} & A_{1312} \\ A_{1211} & A_{1222} & A_{1233} & A_{1223} & A_{1213} & A_{1212} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix}$$



Parenthèse théorique : les matériaux anisotropes

- En « notation de Voigt » on fait apparaître la matrice de **souplesse** :

Effet **direct** des contraintes normales

Couplages déformations normales – contraintes normales

Couplages déformations normales – contraintes tangentielles

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1113} & C_{1112} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2213} & C_{2212} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3313} & C_{3312} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2313} & C_{2312} \\ C_{1311} & C_{1322} & C_{1333} & C_{1323} & C_{1313} & C_{1312} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1213} & C_{1212} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}$$

Couplages déformations tangentielles – contraintes tangentielles

Effet **direct** des contraintes de cisaillement



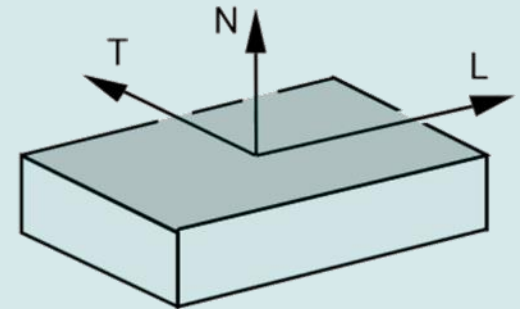
Parenthèse théorique : les matériaux anisotropes

- Dans le cas où le matériau à 3 directions privilégiées (matériau orthotrope): **9 paramètres indépendants**

E_1, E_2, E_3 : modules de Young

$\nu_{12}, \nu_{31}, \nu_{32}$: coefficients de Poisson

G_{12}, G_{13}, G_{23} : modules de cisaillement

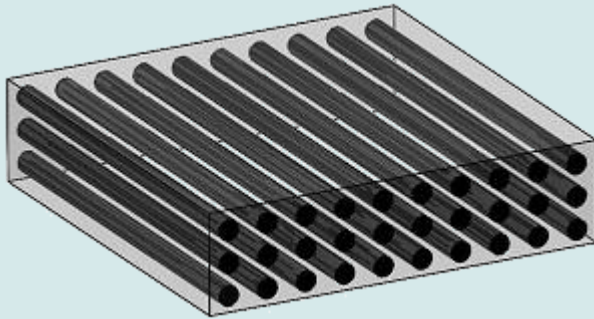


$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E_1 & -\nu_{12}/E_1 & -\nu_{13}/E_1 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{23}/E_2 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}$$

- Attention** : notations valables uniquement dans le **repère d'orthotropie**



Parenthèse théorique : les matériaux anisotropes



- Composite à fibres longues : les directions « 2 » et « 3 » sont les mêmes

Module longitudinal : $E_1 = 140 \text{ GPa}$

Module transverse : $E_2 = E_3 = 8 \text{ GPa}$

Module de cisaillement $G_{12} = G_{13} = 4,5 \text{ GPa}$

Module de cisaillement $G_{23} = 3 \text{ GPa}$

Coefficient de Poisson $\nu_{12} = \nu_{13} = 0.27$

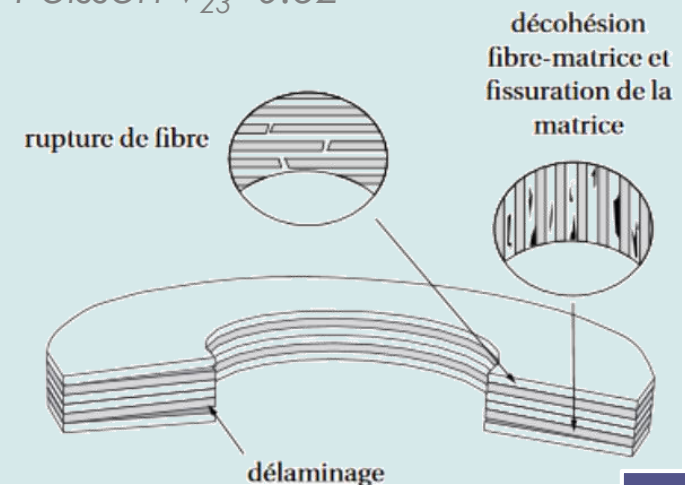
Coefficient de Poisson $\nu_{23} = 0.32$

- Les mécanismes physiques sont différents dans les différentes directions

→ **Limites d'élasticité** très différentes!

Limite d'élasticité longitudinale : **2400 Mpa**

Limite d'élasticité transversale : **100 Mpa**



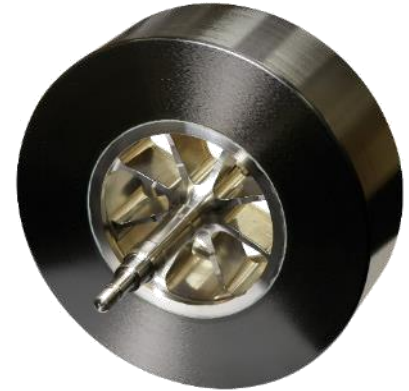
Hypothèse 1 : isotrope

Limite d'élasticité : 2400 Mpa

Module d'Young : 102 Gpa

Masse volumique : 1500 kg/ m³

Coefficient de Poisson = 0.3



Module longitudinal : $E_1=140$ Gpa

Module transverse : $E_2=E_3=8$ GPa

Module de cisaillement $G_{12} = G_{13} = 4,5$ GPa

Module de cisaillement $G_{23} = 3$ GPa

Coefficient de Poisson $\nu_{12} = \nu_{13} = 0.27$

Coefficient de Poisson $\nu_{23}=0.32$

Limite d'élasticité longitudinale : 2400 Mpa

Limite d'élasticité transverse : 100 Mpa

Masse volumique : 1500 kg/ m³

Hypothèse 2 : anisotrope

Hypothèses de modélisation

Partie 1 :

- Modèle 2D axisymétrique
- Volant seul sans jante **PUIS** volant + jante
- Matériau **is**otrope

Partie 2 :

- Modèle 3D
- Volant + jante
- Matériau **is**otrope

Partie 3 :

- Modèle 3D
- Volant + jante
- Matériau **an**isotrope

Partie 4 :

- Etude du design de la jante



Modélisation axisymétrique

Partie 1 : volant seul

Création de la pièce axisymétrique

- ✓ *File* → *New model database* → *Standard/explicit*
- ✓ Définir son répertoire de travail (*set work directory*)
- ✓ Créer une pièce : axisymmetric
- ✓ Attention aux unités dans la suite !!
- ✓ Dans l'esquisse : l'axe de symétrie est l'axe vertical par défaut
- ✓ Autre plan de symétrie : la moitié du volant suffit !!!



Create Part

Name: volant

Modeling Space

☐ 3D ☐ 2D Planar ☒ Axisymmetric

Type

☒ Deformable
☐ Discrete rigid
☐ Analytical rigid
☐ Eulerian

Options

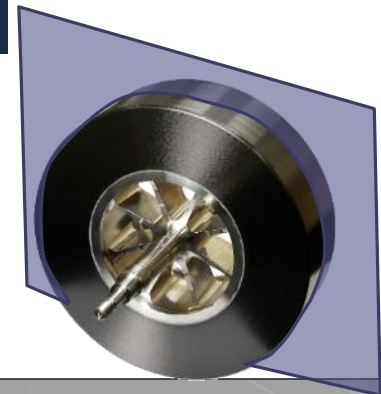
☐ Include twist

Base Feature

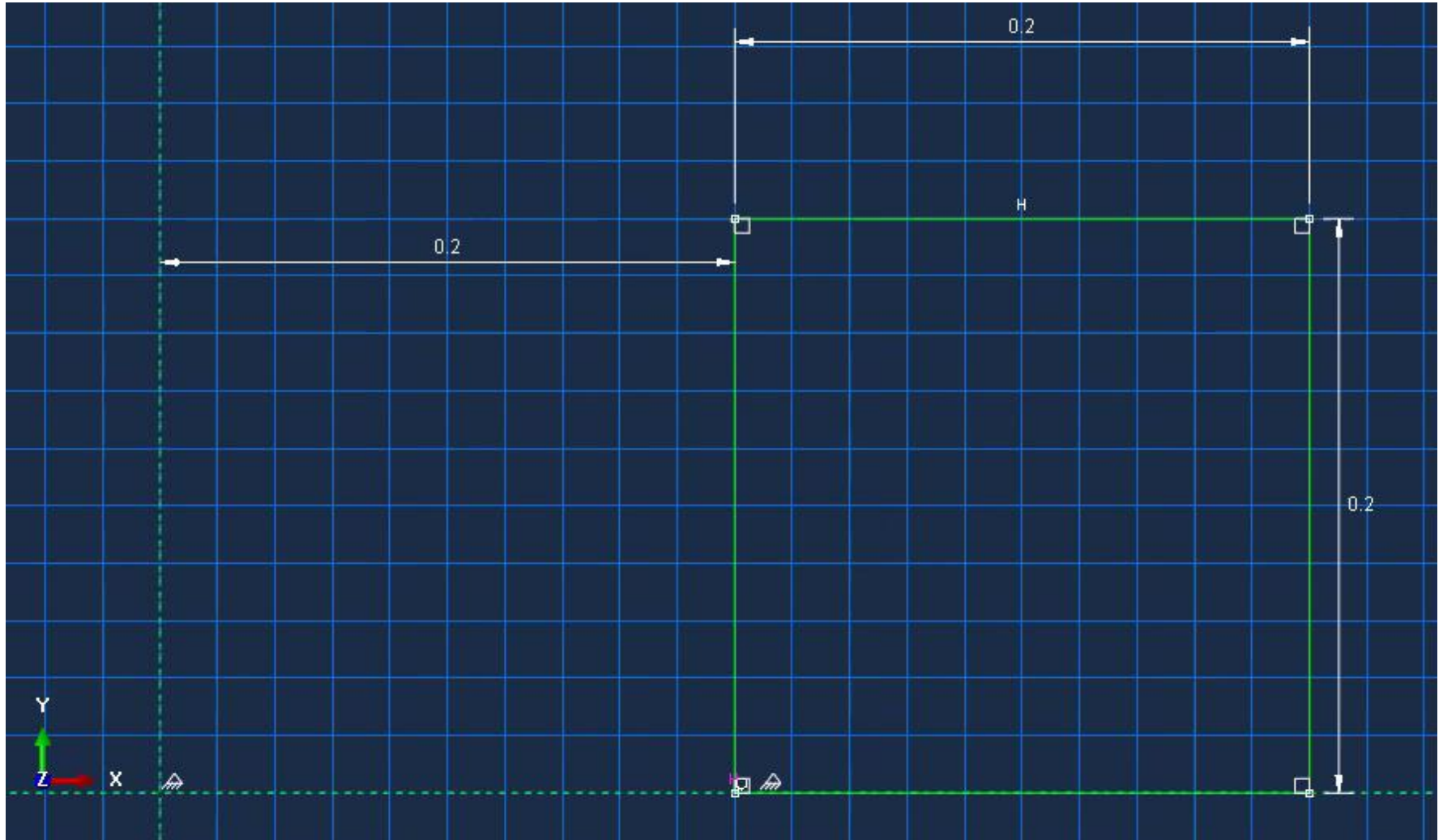
☒ Shell
☐ Wire
☐ Point

Approximate size: 1

Continue... Cancel



Création de la pièce axisymétrique



Matériaux

- ✓ Matériau isotrope avec les propriétés précédentes
- ✓ Propriétés élastiques + masse volumique !

Section

- ✓ Section « solid », « homogeneous »

Assemblage

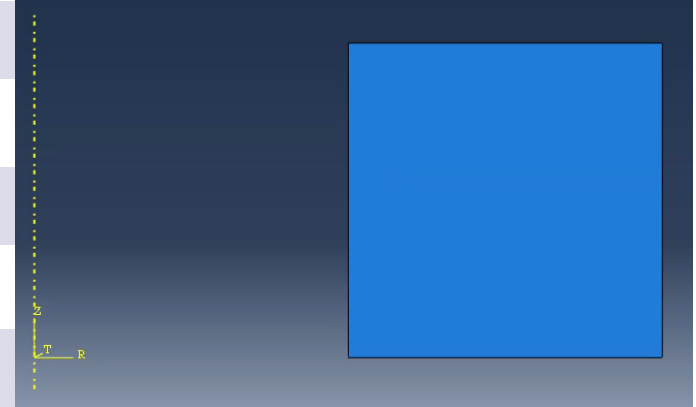
- ✓ Comme d'habitude

Step

- ✓ General, static (NLgeom=OFF)
→ pourquoi « statique », alors que le volant tourne ???

- Rotation du volant : ne nous intéresse pas!
- En revanche : force centrifuge ++ !
- Modélisation par un **champ de force volumique**

$$\cancel{\rho \underline{a}} = \underline{\underline{\text{div}}} \underline{\underline{\sigma}} + \rho \underline{\underline{f}}^m$$



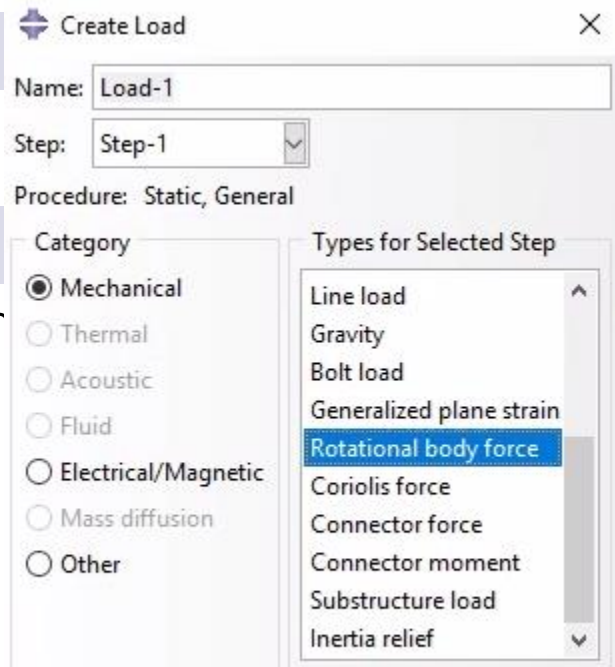
Modèle axisymétrique : jeu de données

Interactions

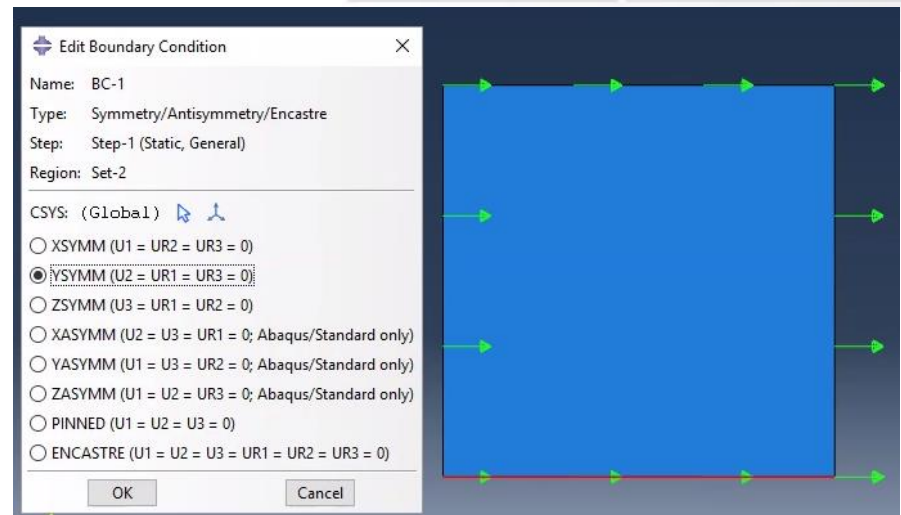
- ✓ Aucune !

Load

- ✓ Champ de forces volumiques dû à la rotation
- ✓ Intensité : dépend de la vitesse de rotation !
- ✓ Exemple pour commencer :
Vitesse de « 1000 radians/time »
→ $= 1000 / (2 * \pi) * 60 \sim \mathbf{9500 \text{ trs/min}}$



- ✓ Condition de symétrie selon un plan (z,θ)

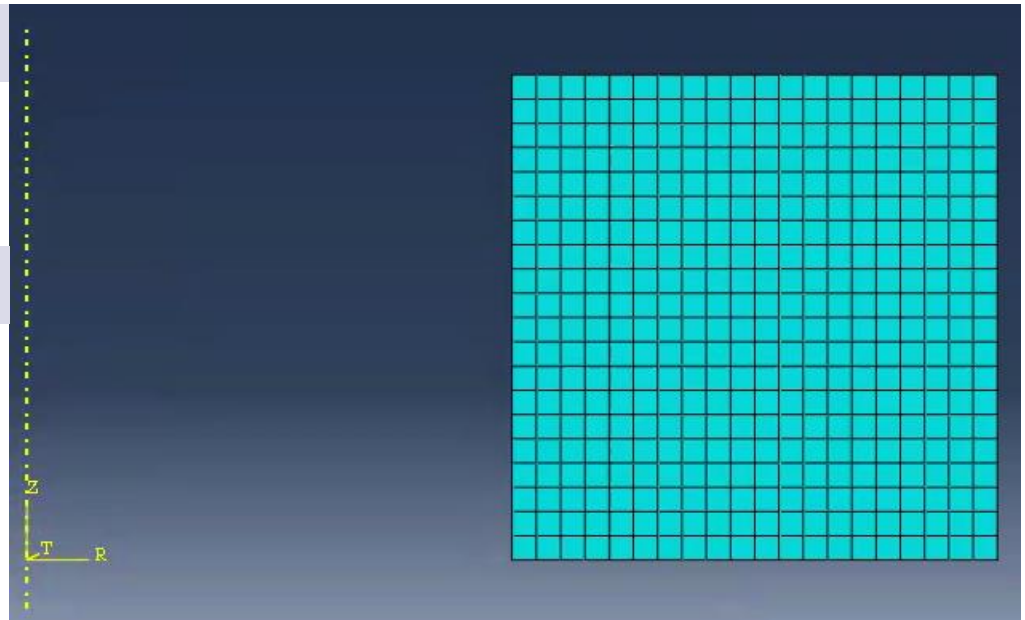


Modèle axisymétrique : jeu de données

Maillage

✓ A vous de décider !

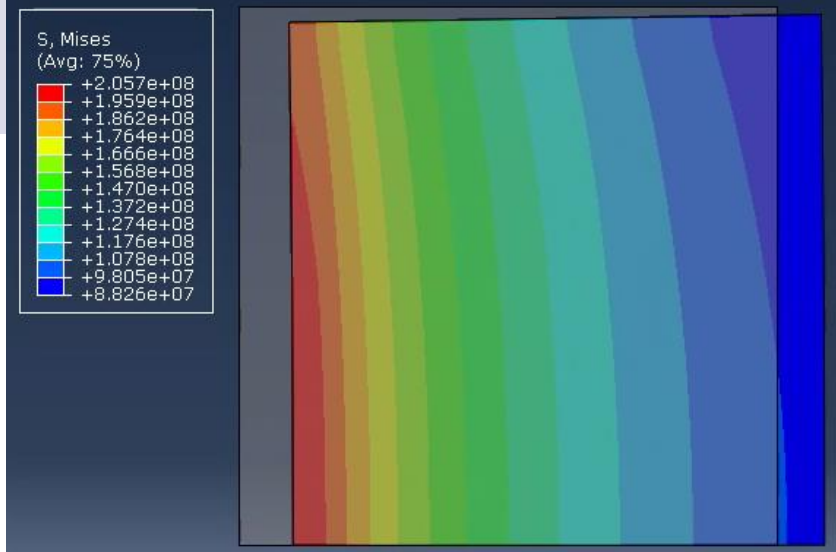
Soumettre le job



Visualiser les contraintes et déplacements

Question :

Est-on loin de la rupture pour cette vitesse ?

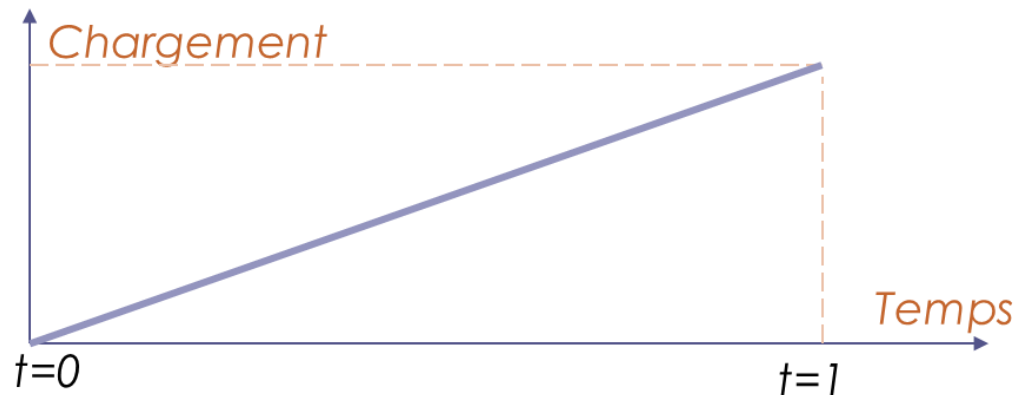


Tracer l'évolution de la contrainte en fonction du chargement

- ✓ Si le phénomène est linéaire → on peut faire des règles de 3

QUESTION : le phénomène est-il linéaire ?

- ✓ **Proposition** : tracer l'évolution de la contrainte lorsque le chargement augmente
- ✓ **Rappel** : le chargement augmente en rampe durant le calcul



- ✓ Il faut d'abord s'assurer que cette courbe soit décrite par un minimum de points
→ Modification des paramètres du STEP !

Tracer l'évolution de la contrainte en fonction du chargement

- ✓ Modification des paramètres du step
- ✓ Si la taille de l'incrément maxi est de 0.1
→ au moins 10 étapes entre 0 et 1 !
- ✓ Relancer le calcul
- ✓ Job → option « *monitor* » : étapes de calcul

Type: ☒ Automatic ☐ Fixed

Maximum number of increments: 100

	Initial	Minimum	Maximum
Increment size:	0.1	1E-05	0.1

Job-axi-iso Monitor

Job: Job-axi-iso Status: Completed

Step	Increment	Att	Severe Discon Iter	Equil Iter	Total Iter	Total Time/Freq	Step Time/LPF	Time/LPF Inc
1	1	1	0	1	1	0.1	0.1	0.1
1	2	1	0	1	1	0.2	0.2	0.1
1	3	1	0	1	1	0.3	0.3	0.1
1	4	1	0	1	1	0.4	0.4	0.1
1	5	1	0	1	1	0.5	0.5	0.1
1	6	1	0	1	1	0.6	0.6	0.1
1	7	1	0	1	1	0.7	0.7	0.1
1	8	1	0	1	1	0.8	0.8	0.1
1	9	1	0	1	1	0.9	0.9	0.1
1	10	1	0	1	1	1	1	0.1

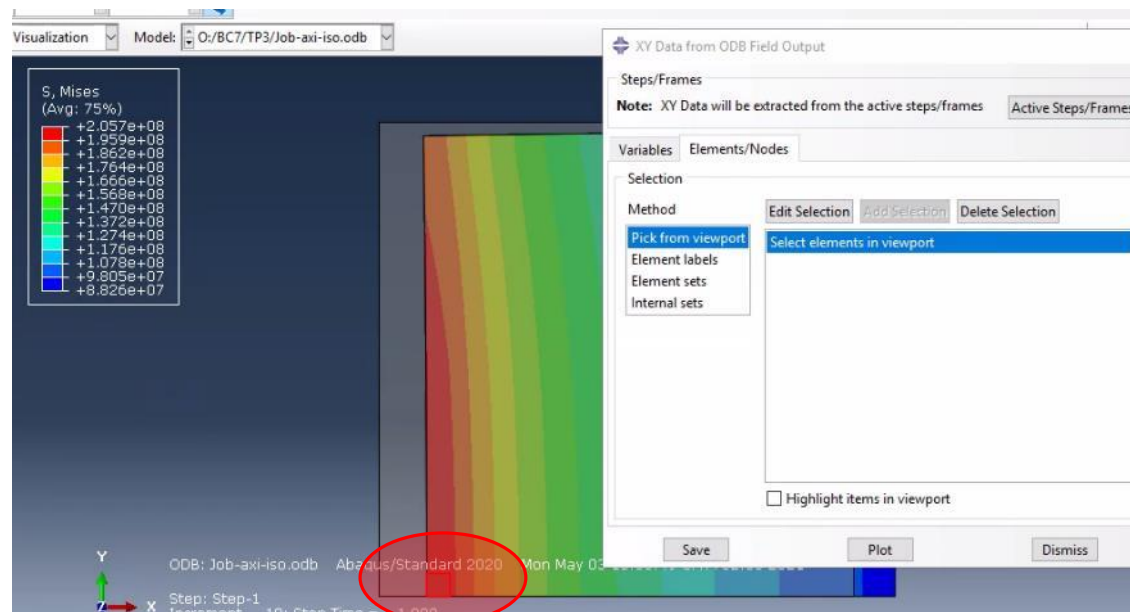
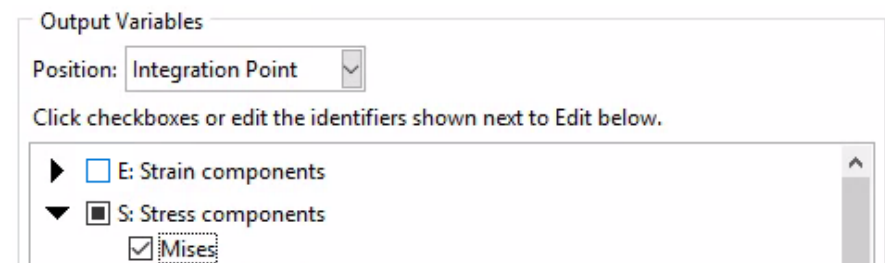
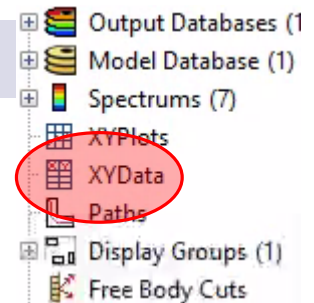
Log Errors Warnings Output Data File Message File Status File

10 étapes de calcul !

Modèle axisymétrique : RESULTATS

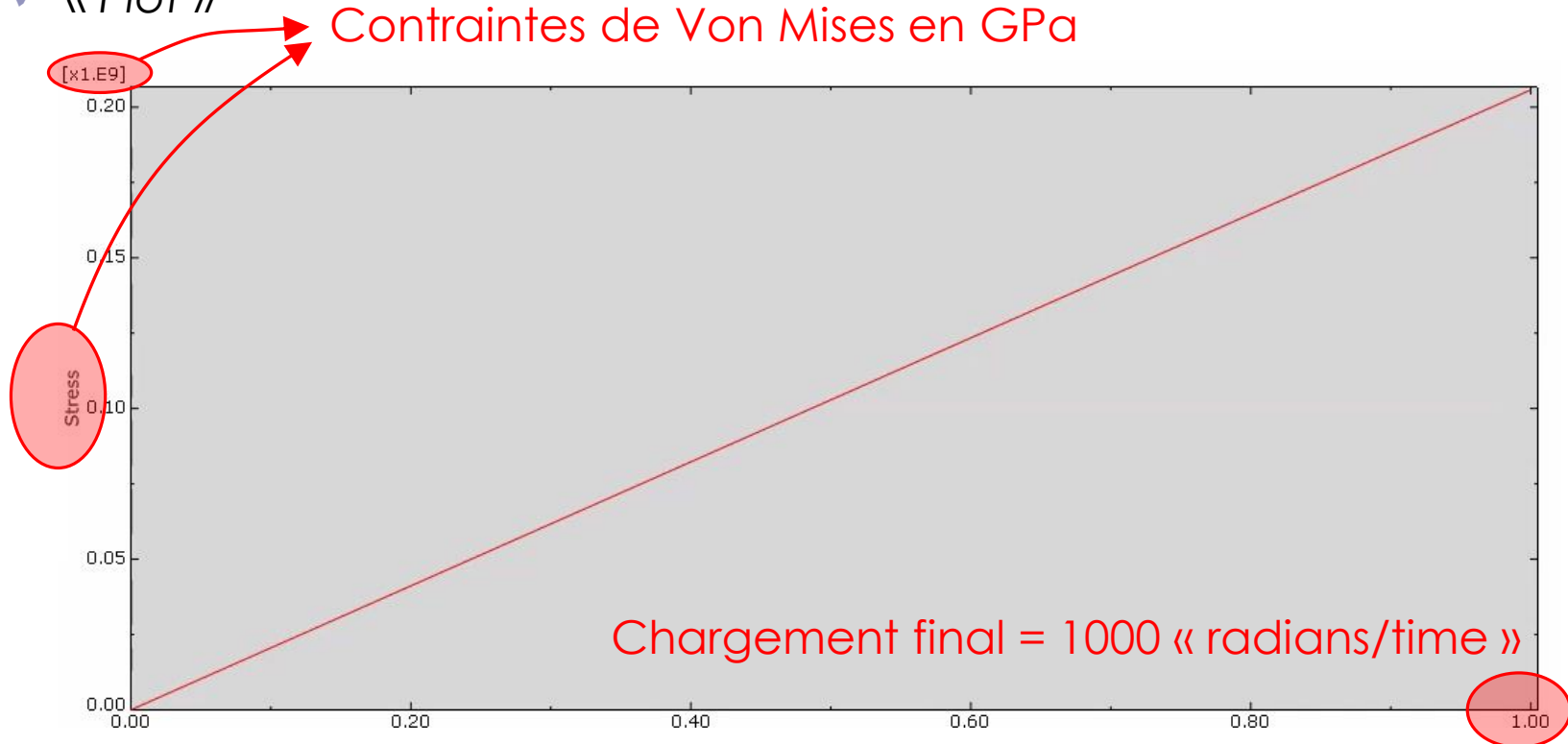
Tracer l'évolution de la contrainte en fonction du chargement

- ✓ Créer un tableau « XYdata »
- ✓ ODB field output (on veut l'historique des champs)
- ✓ Champ d'intérêt : contrainte de VON MISES
 - À comparer avec la limite Élastique du matériau !
- ✓ Choisir le ou les éléments où les contraintes sont maximales



Tracer l'évolution de la contrainte en fonction du chargement

✓ « Plot »



✓ Phénomène linéaire → on peut faire des règles de 3 !!

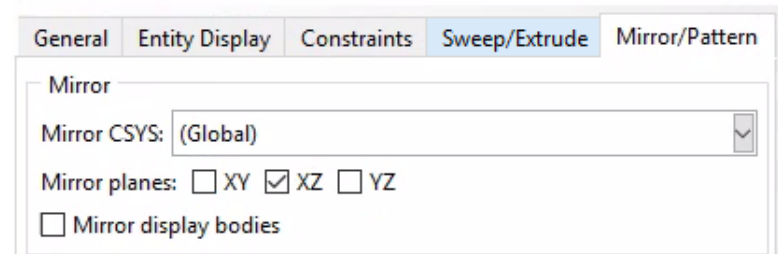
✓ Limite d'élasticité = 2400 Mpa

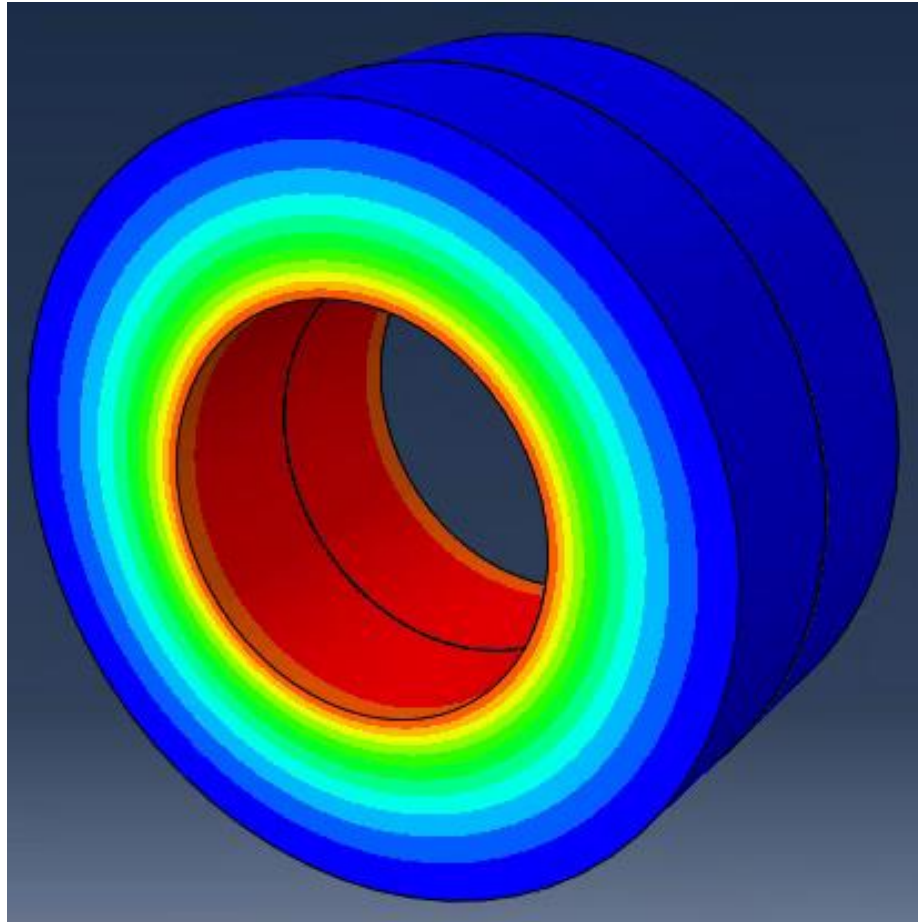
→ **CONCLUSION** sur la vitesse de rotation critique ?

Visualisation du comportement 3D

- ✓ Visualisation 2D axisymétrique : pas sexy, mais suffisante !
- ✓ Représentation de la solution en 3D ?
- ✓ « ODB display options » 

- ✓ Deux symétries :
 - ✓ symétrie plane selon le plan XZ
 - ✓ symétrie de révolution autour de l'axe de symétrie

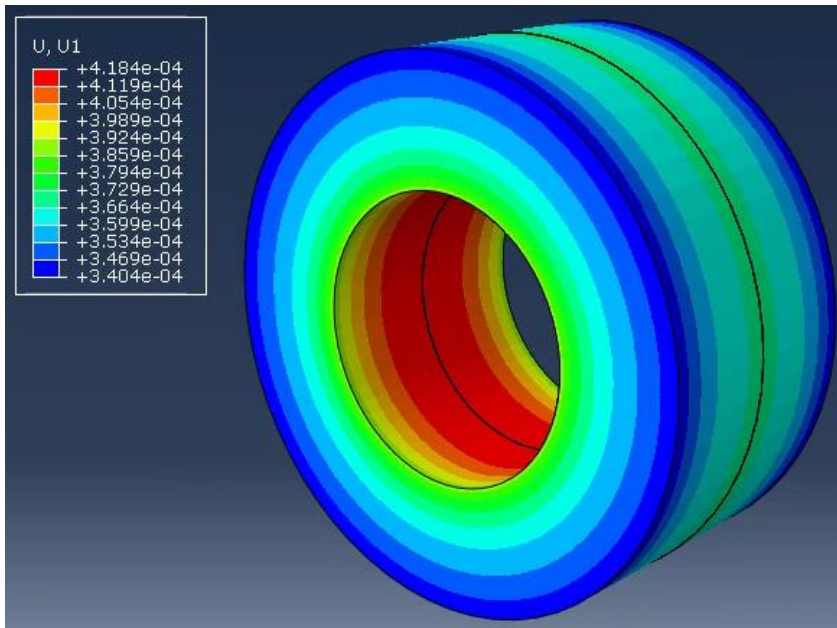




CONCLUSION : la modélisation 3D était vraiment inutile !!!

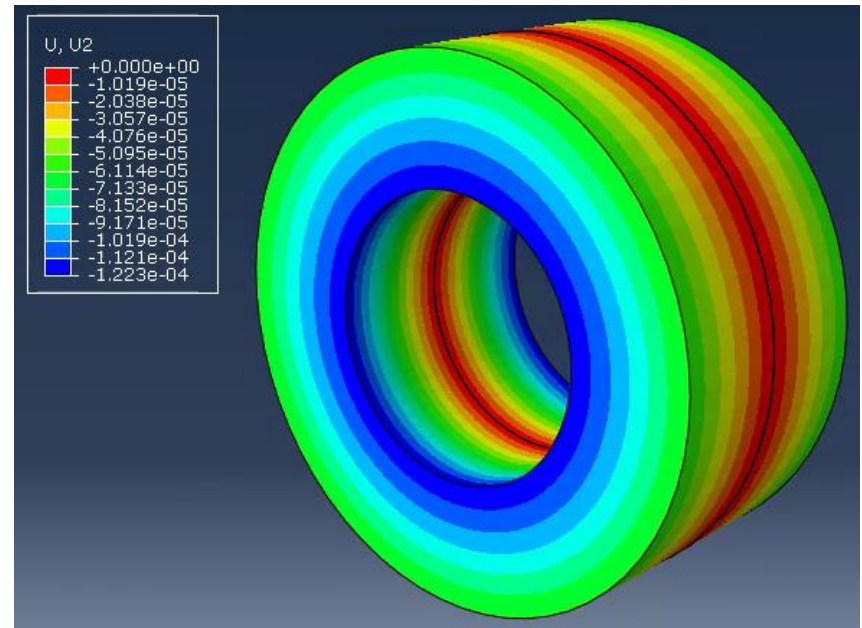
Modèle axisymétrique : RESULTATS

- ✓ Hypothèse sous-jacente : absence de jante → **IMPOSSIBLE !!**
- ✓ En réalité : le bord intérieur n'est pas libre !!! → **modélisation FAUSSE !**



Champ de déplacement $u_1 = u_r$

Compatible avec celui de la jante ?



Champ de déplacement $u_2 = u_z$

Compatible avec celui de la jante ?



Modélisation axisymétrique

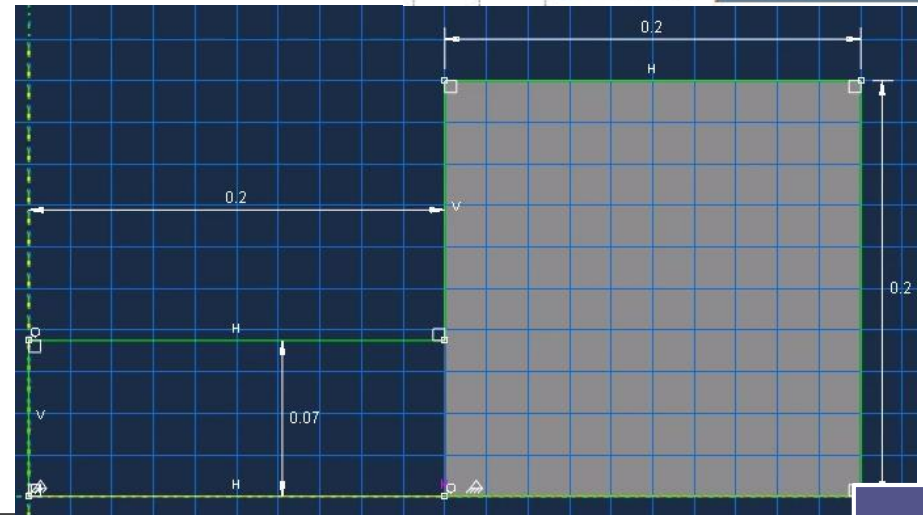
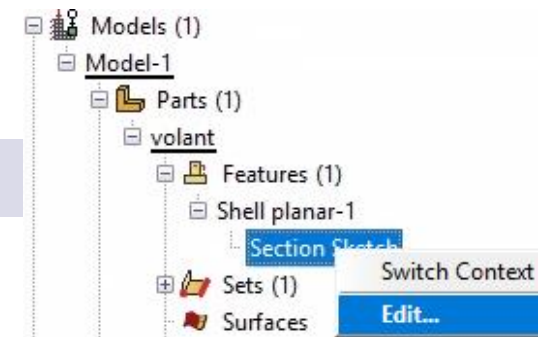
Partie 2 : volant + jante

Modèle axisymétrique : volet PART

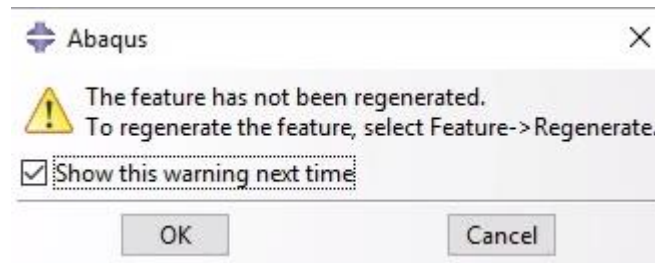
- ✓ **OBJECTIF** : ajouter un jante
 - ✓ **PLUSIEURS SOLUTIONS** :
 - Créer une autre pièce puis les assembler
 - Modifier la pièce et partitionner en plusieurs matériaux
- On choisit la seconde (pourquoi pas?)

Modification de l'esquisse

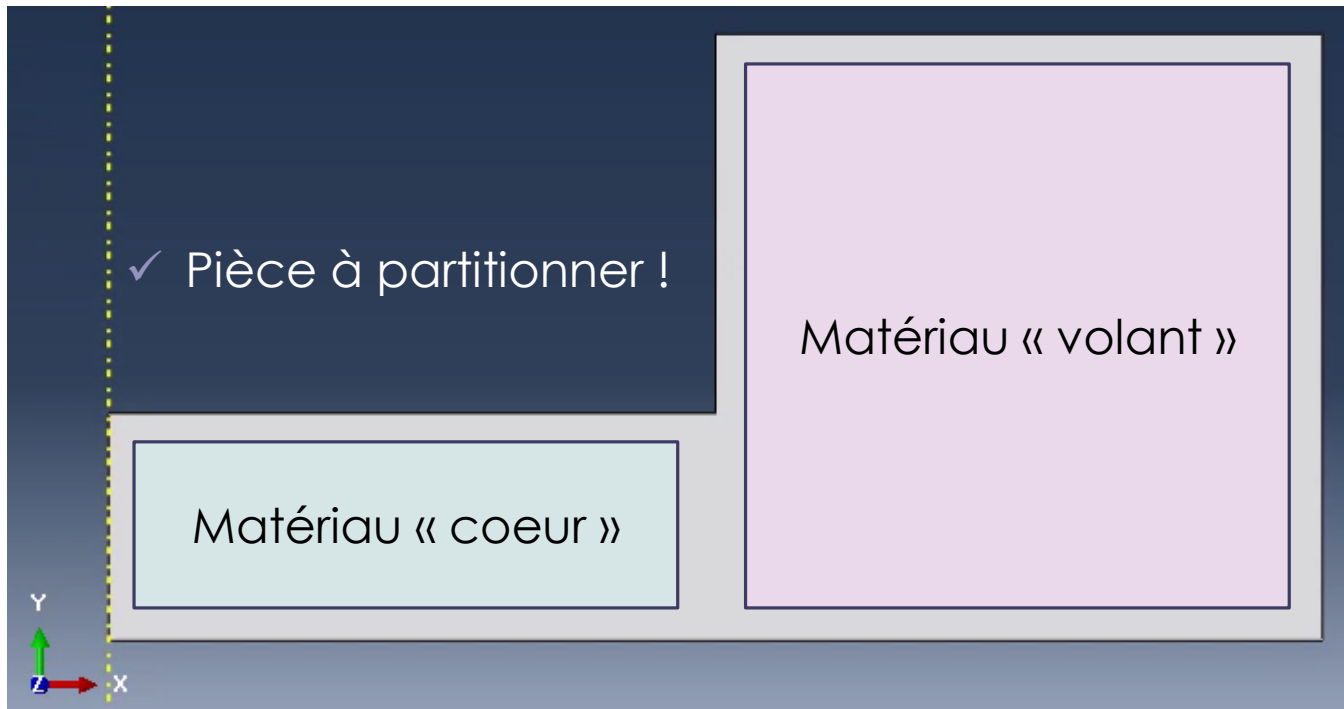
- ✓ **Hypothèse** :
épaisseur de la jante = 15cm
- ✓ Symétrie → épaisseur = 7,5cm sur l'esquisse!



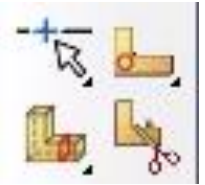
Modèle axisymétrique : volet PART



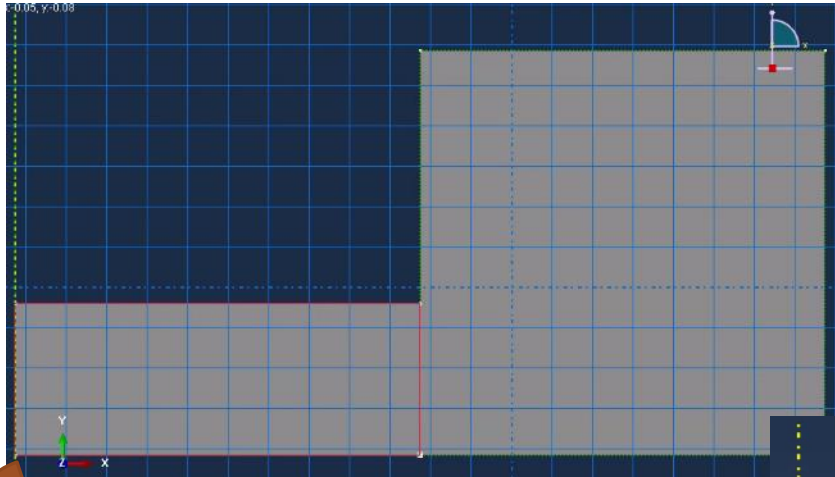
- ✓ Esquisse pas mise à jour par défaut
- ✓ Feature → regenerate



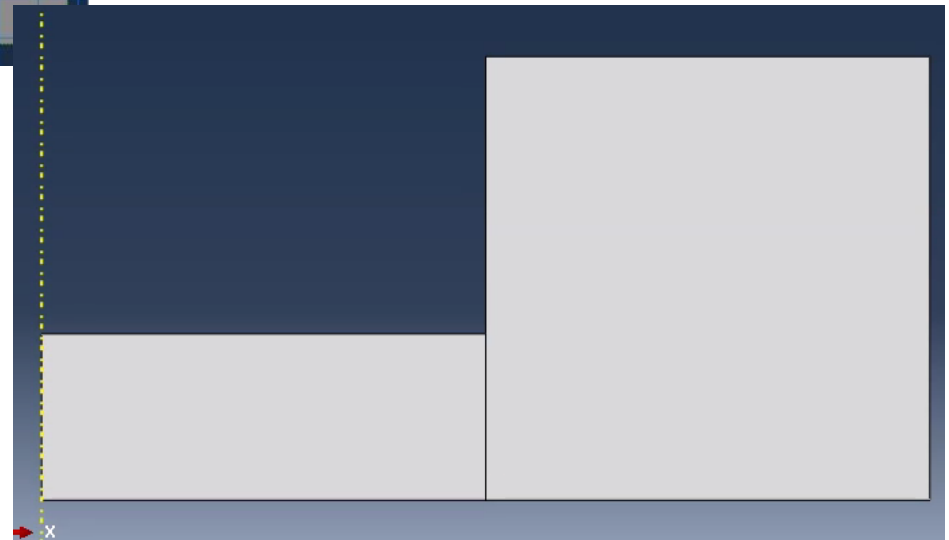
Outils de partition d'esquisse



- ✓ Ici : on doit partitionner la face en 2 morceaux

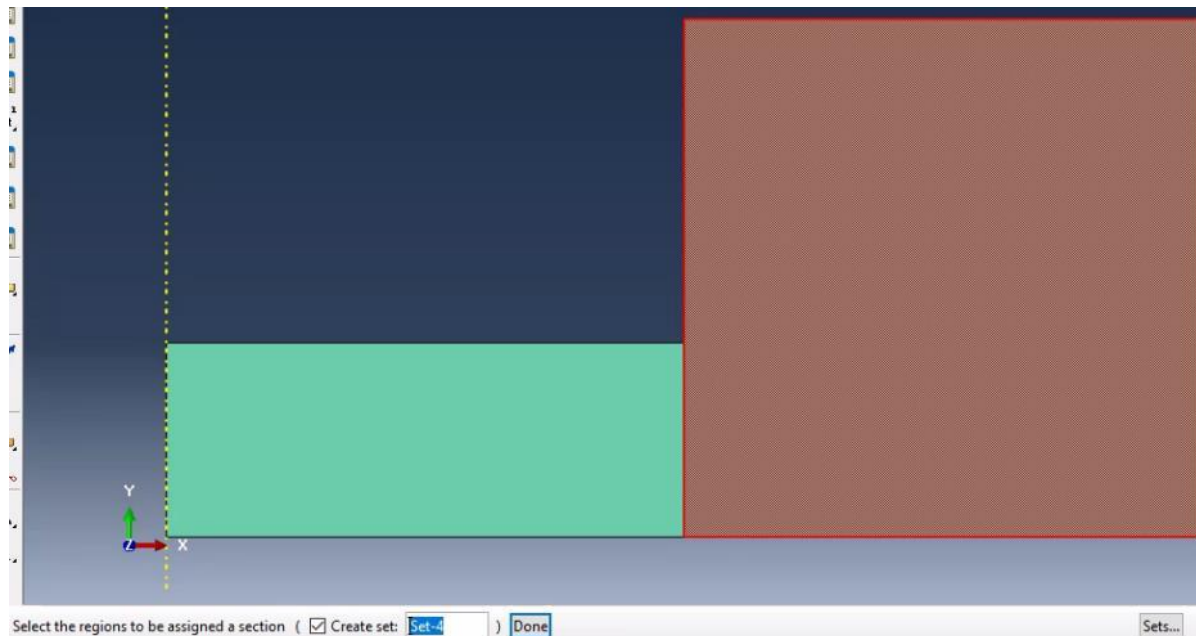


 Sketch partition geometry 



Matériaux

- ✓ 2 matériaux différents pour le volant et la jante
- ✓ Reprendre les propriétés précédentes : jante acier et volant composite (considéré isotrope pour l'instant)

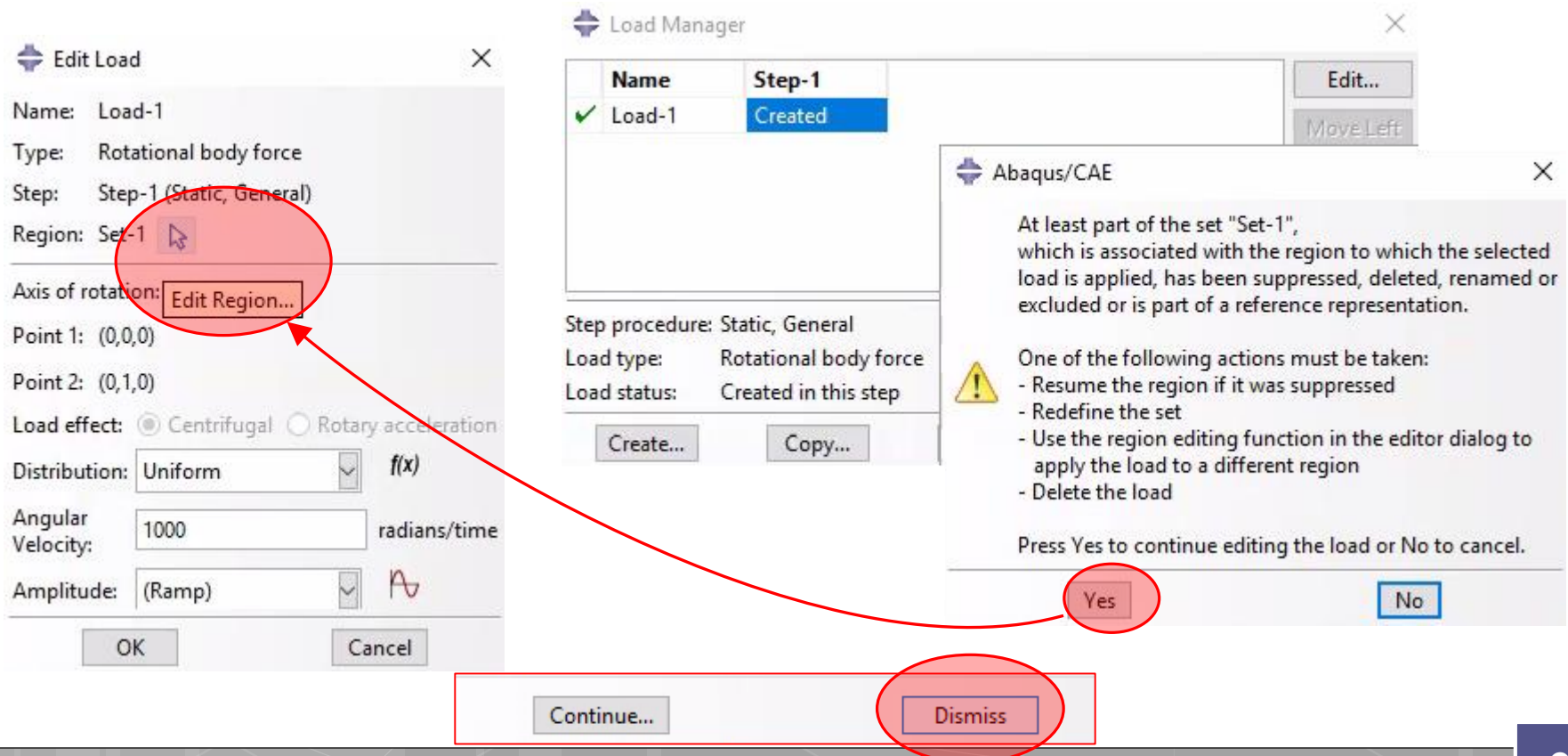


Sections

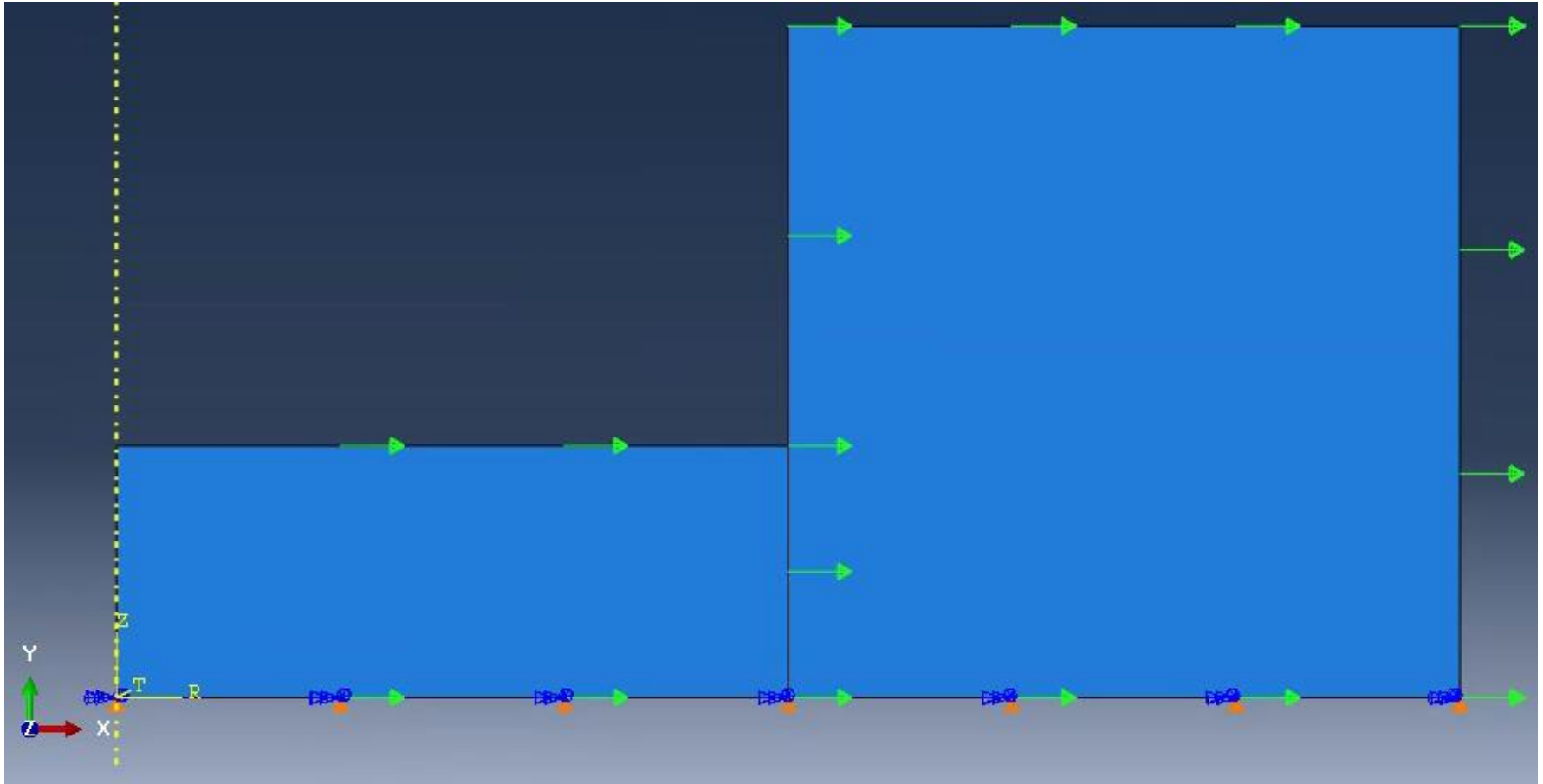
- ✓ 2 sections différentes à assigner (jante acier et volant composite)

Load

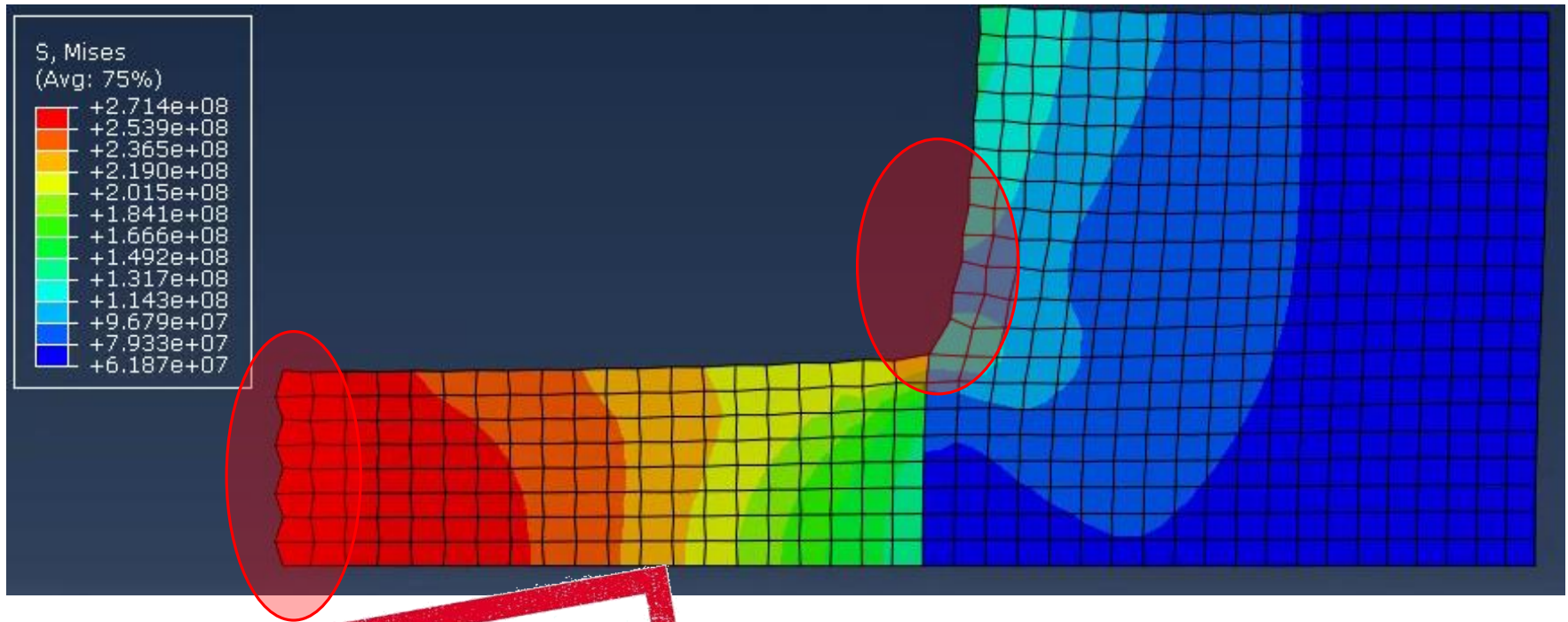
- ✓ Il faut redéfinir les zones où sont appliquées les CL et chargements
- ✓ **Solution 1** : tout supprimer et tout recommencer !
- ✓ **Solution 2** : éditer le chargement précédent



Load

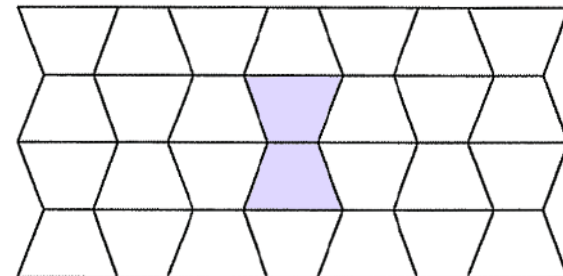


Maillage en quadrangles, linéaires, integration réduite (CAX4R)

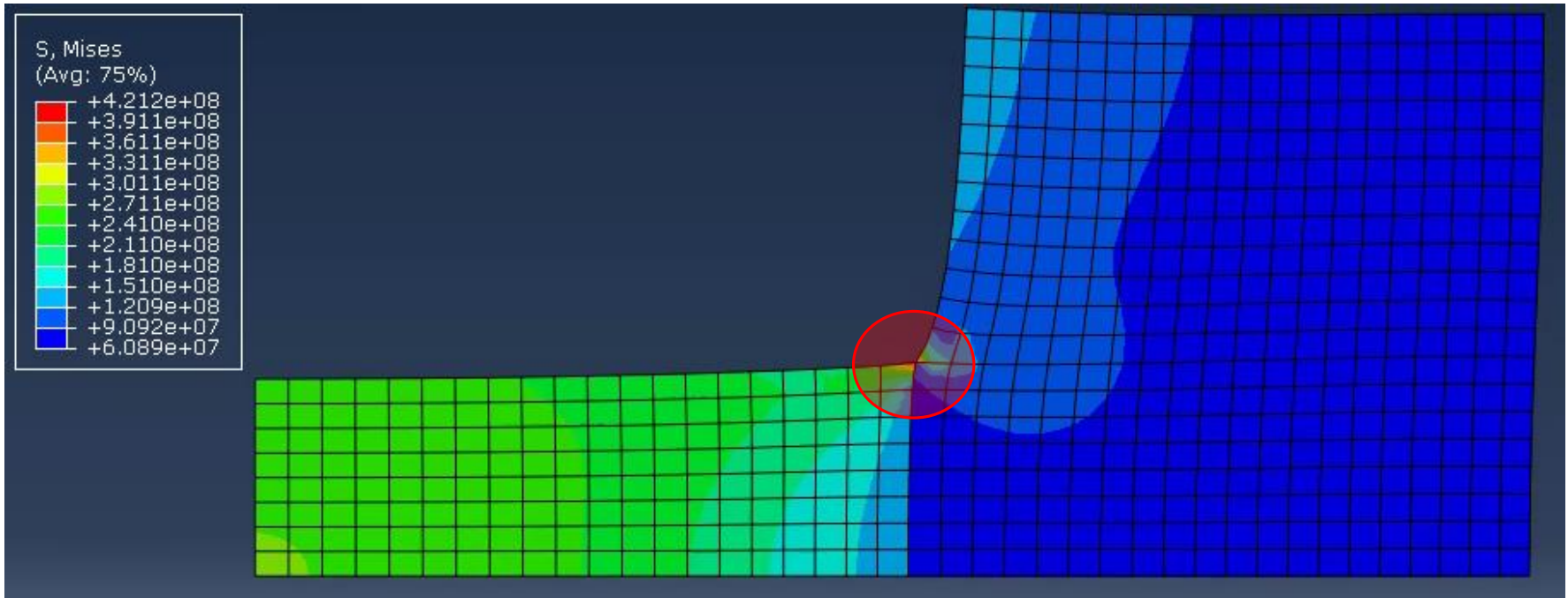


ATTENTION

Mode hourglass détecté !

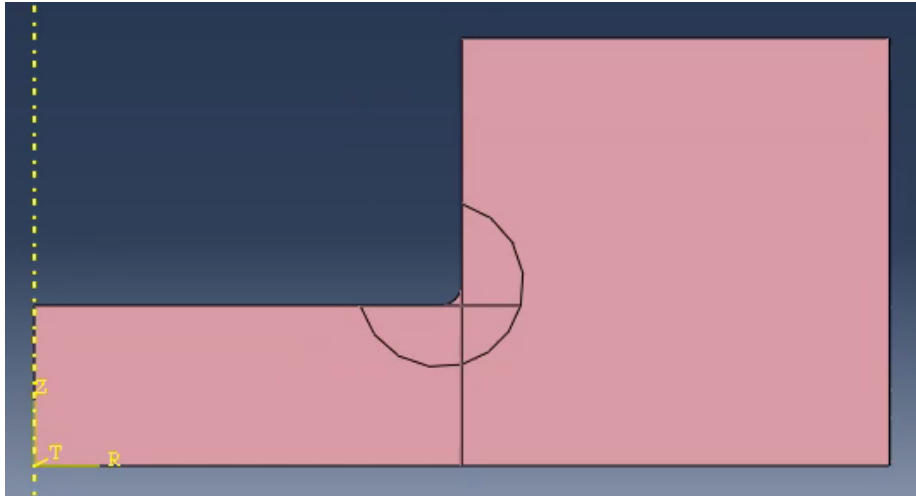


Maillage en quadrangles, quadratiques, integration complète (CAX8)



- ✓ Le mode hourglass est corrigé
- ✓ La contrainte est très localisée
 - Normal : **jamais** de variation d'angle brusque !!!
 - **SOLUTION** : ajouter un congés ! → **retour dans l'esquisse !**

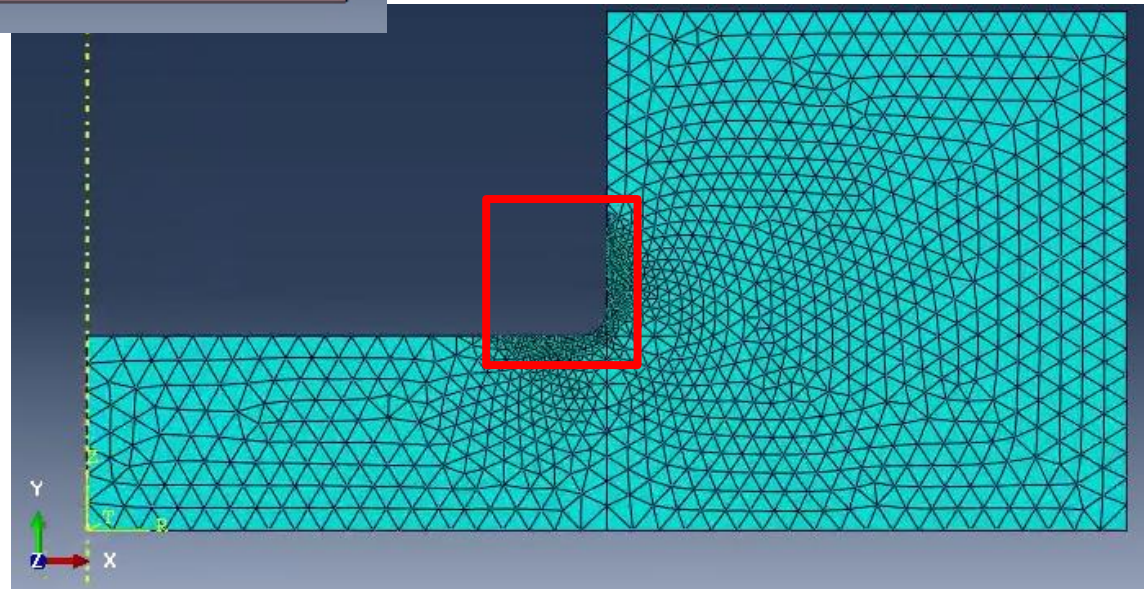
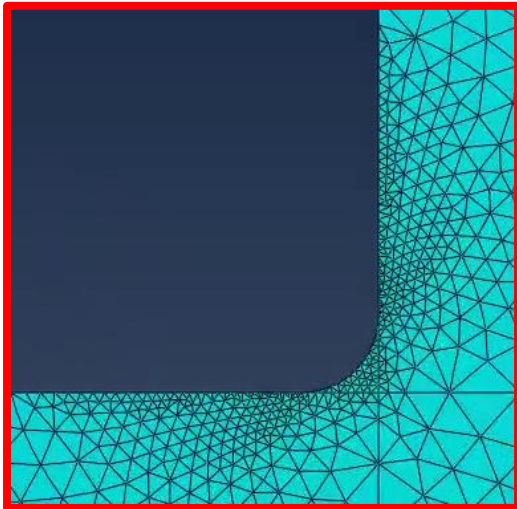
Maillage en triangles quadratiques (CAX6)



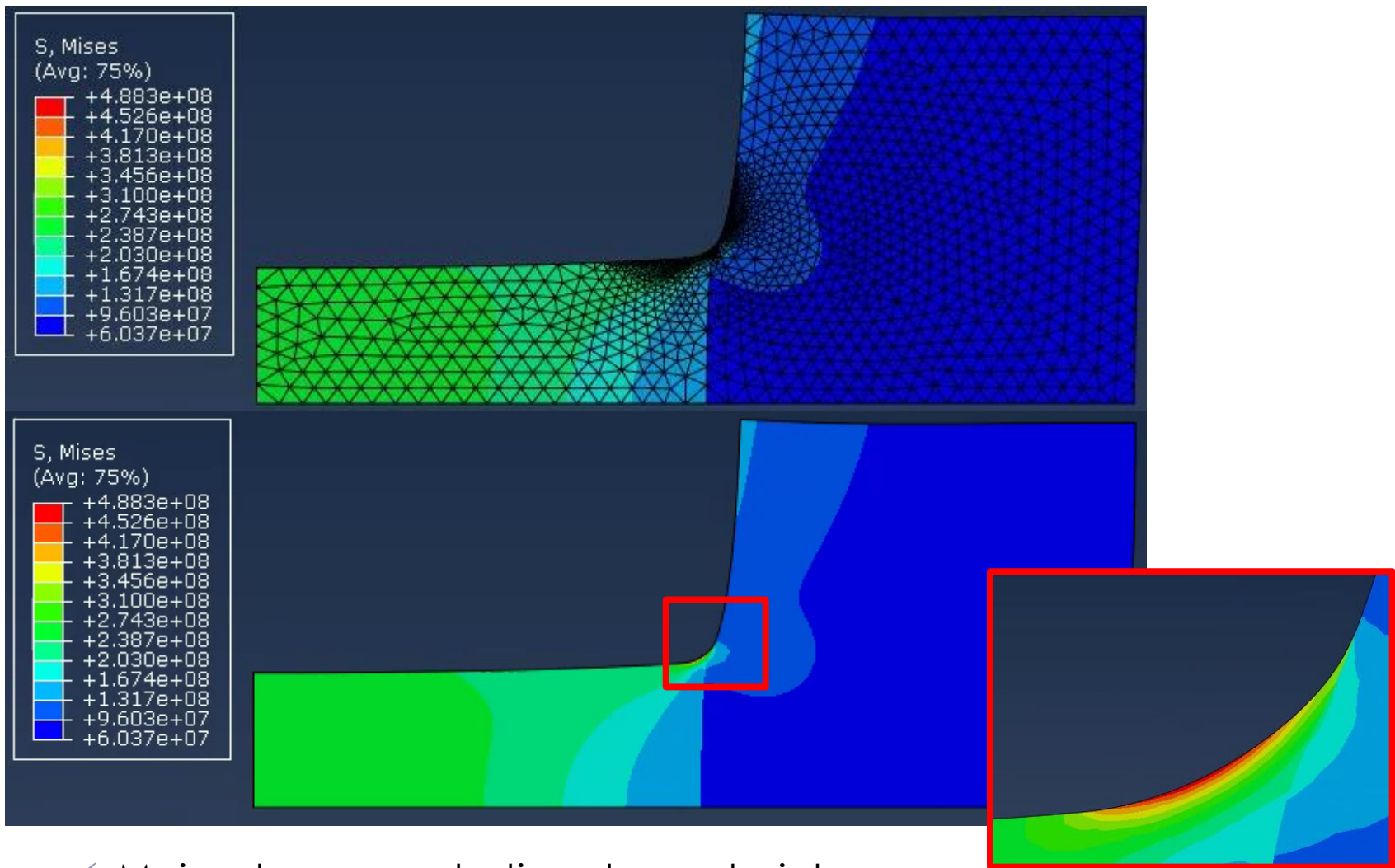
- ✓ Travail sur le maillage : possibilité de partitionner la pièce



- ✓ Exigences différentes sur la taille des éléments suivant la région!

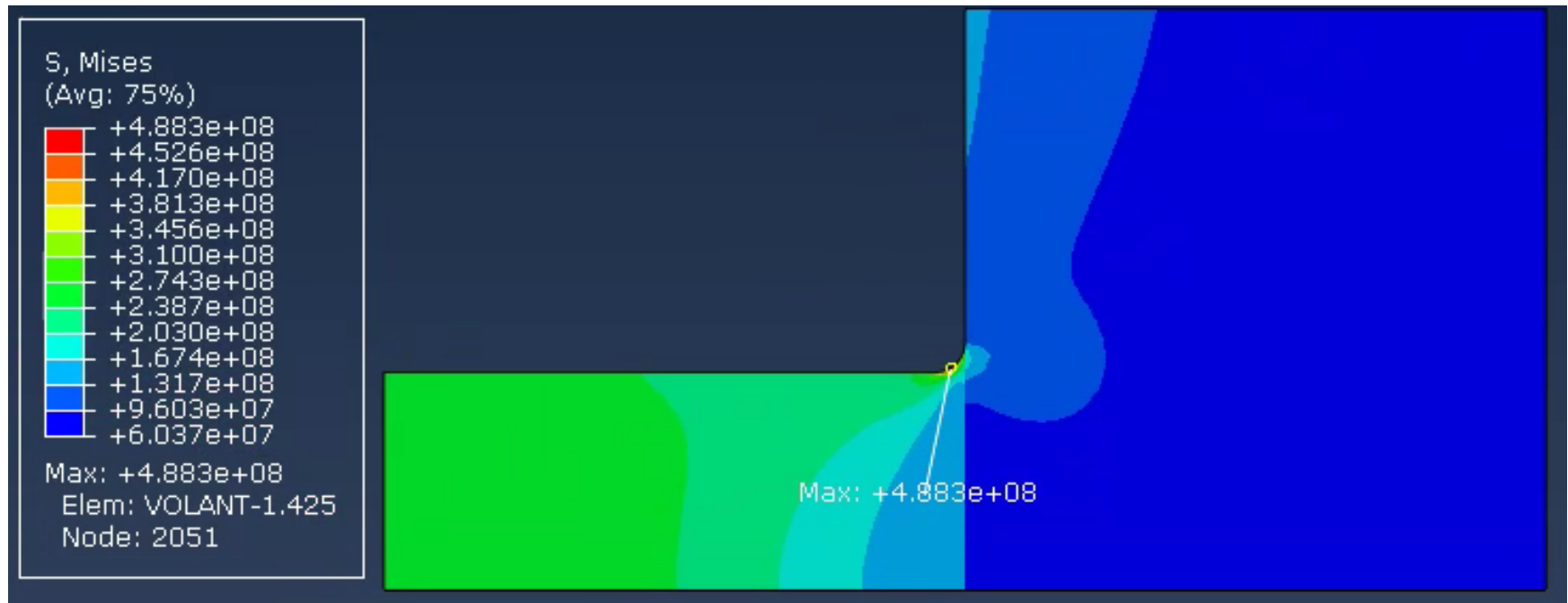


Modèle axisymétrique : RESULTATS



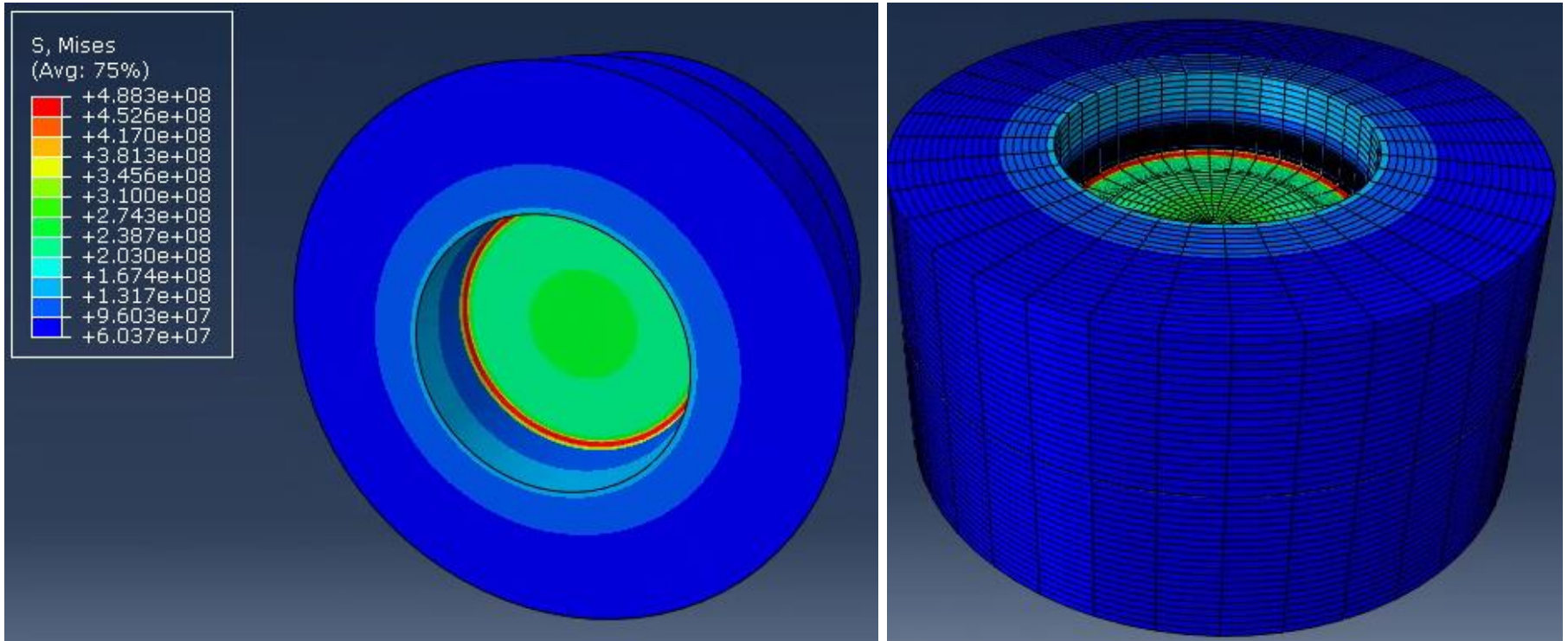
- ✓ Moins de concentration de contraintes
- ✓ **Quelle est la nouvelle vitesse de rotation maximale ???**

Modèle axisymétrique : RESULTATS



- ✓ Exemple de résultat pour 1000 radians/time
- ✓ Hétérogénéité des contraintes dans les 2 matériaux !
- ✓ **Attention** : limites d'élasticité différentes pour les deux matériaux...
→ Est-ce la jante ou le volant qui posera problème en premier ?

Modèle axisymétrique : RESULTATS



✓ Visu 3D : « sweep » à 360° + « mirror » selon l'axe XZ

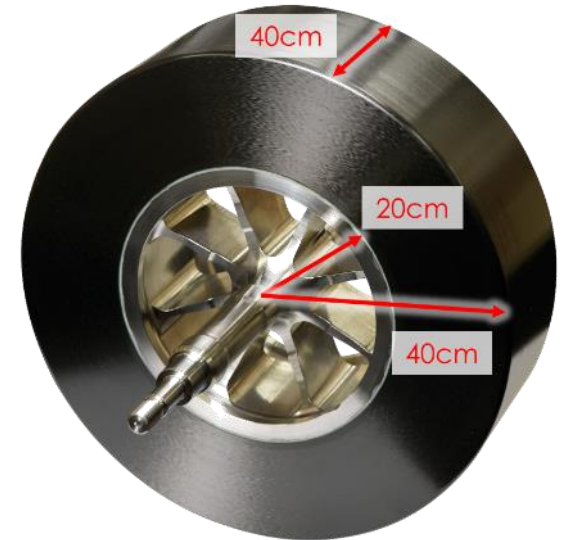
Modèle axisymétrique : **RESULTATS**

- ✓ En réalité : la masse doit être placée **loin de l'axe**



- ✓ Si l'on veut ajouter des « branches » à la jante
→ le problème n'est plus axisymétrique !!

- ✓ On va tenter de reproduire (à peu près)
la géométrie ci-contre

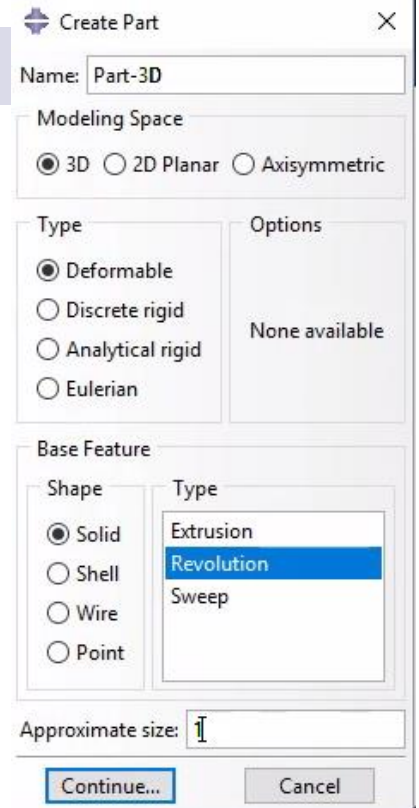
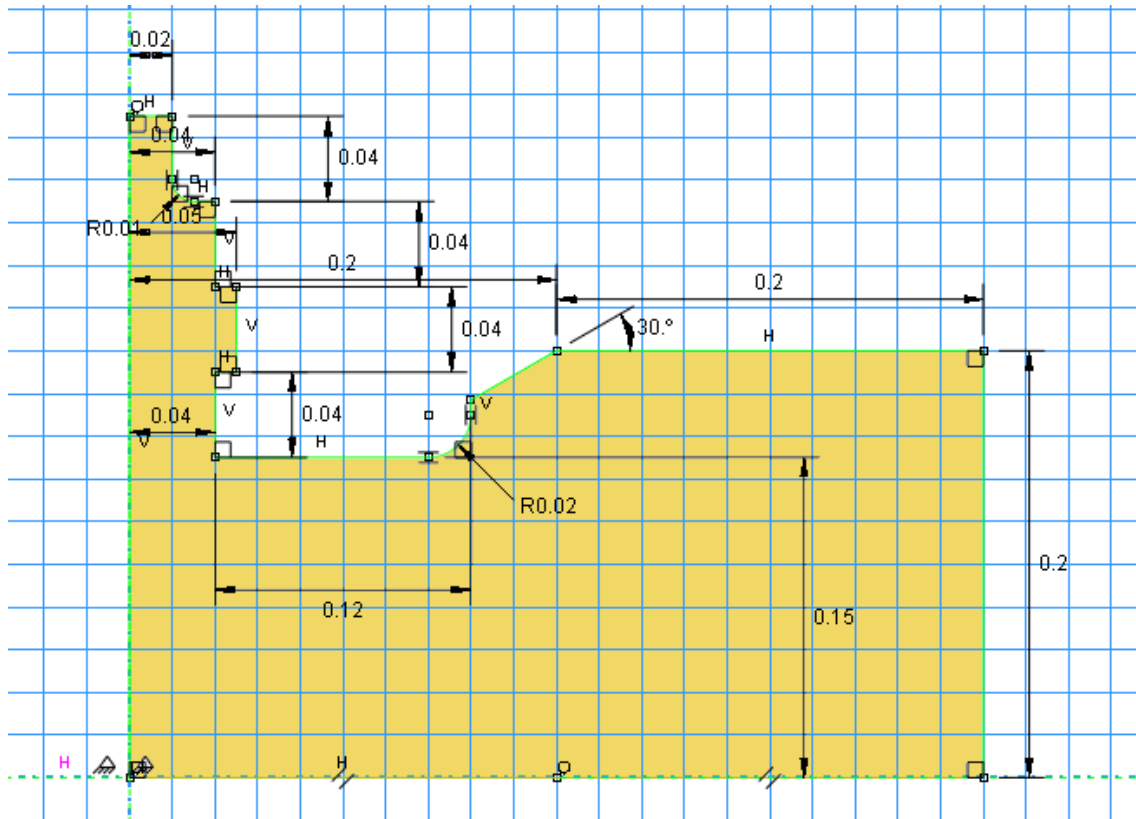




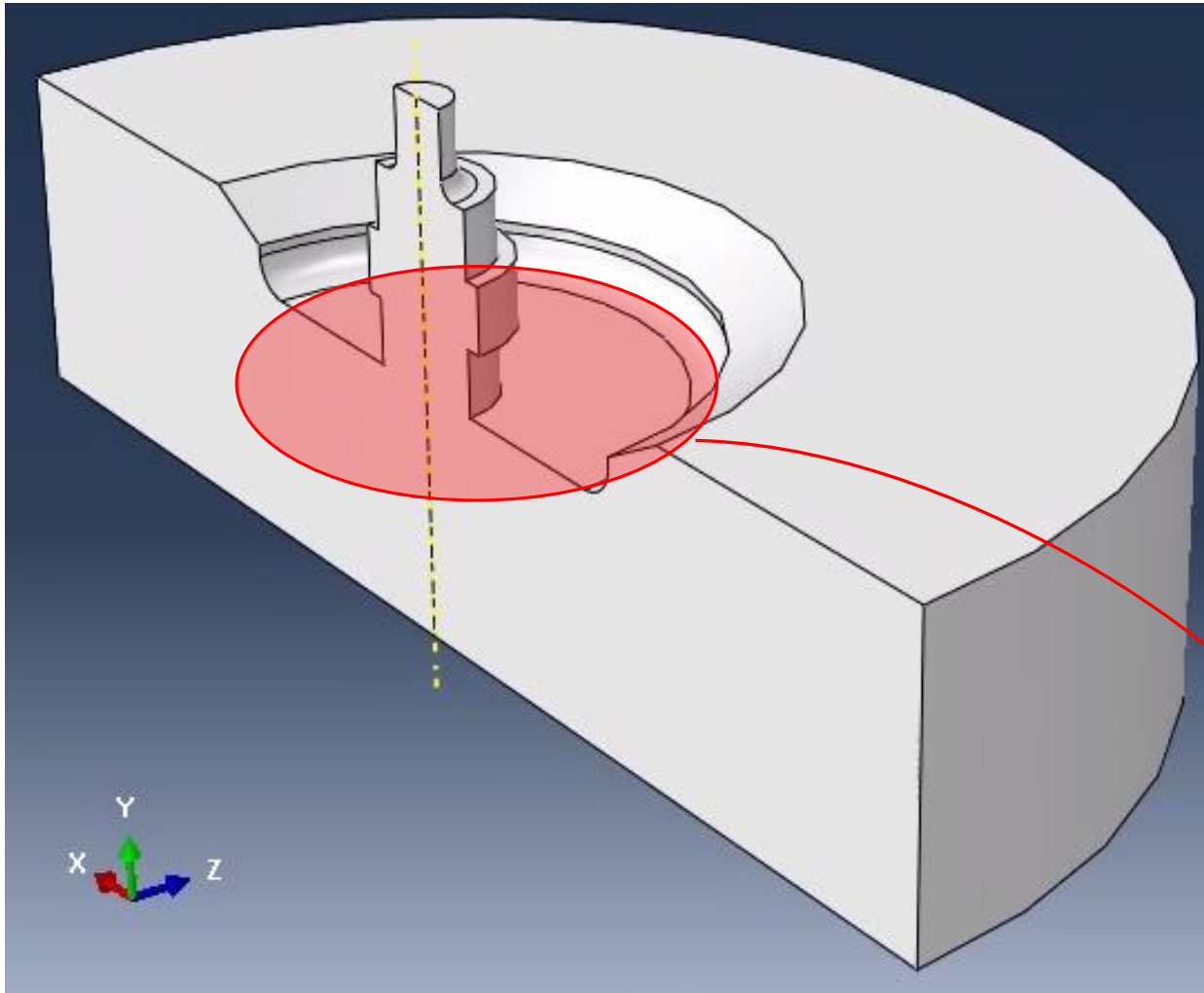
Modélisation 3D

Dessin d'un pièce de révolution

- ✓ New part → 3D → revolution
- ✓ **Symétrie** : on ne dessine (bien sûr!) que la moitié
- ✓ Exemple d'esquisse (à votre guise!!!)



Dessin d'un pièce de révolution

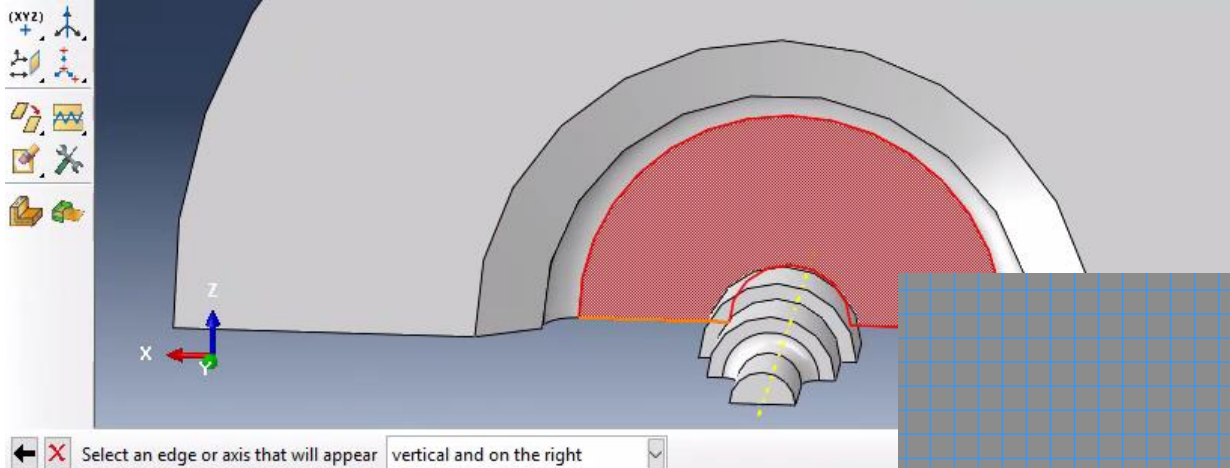


✓ Révolution à **180°** suffisante si symétrie !!

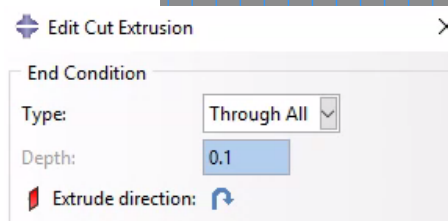
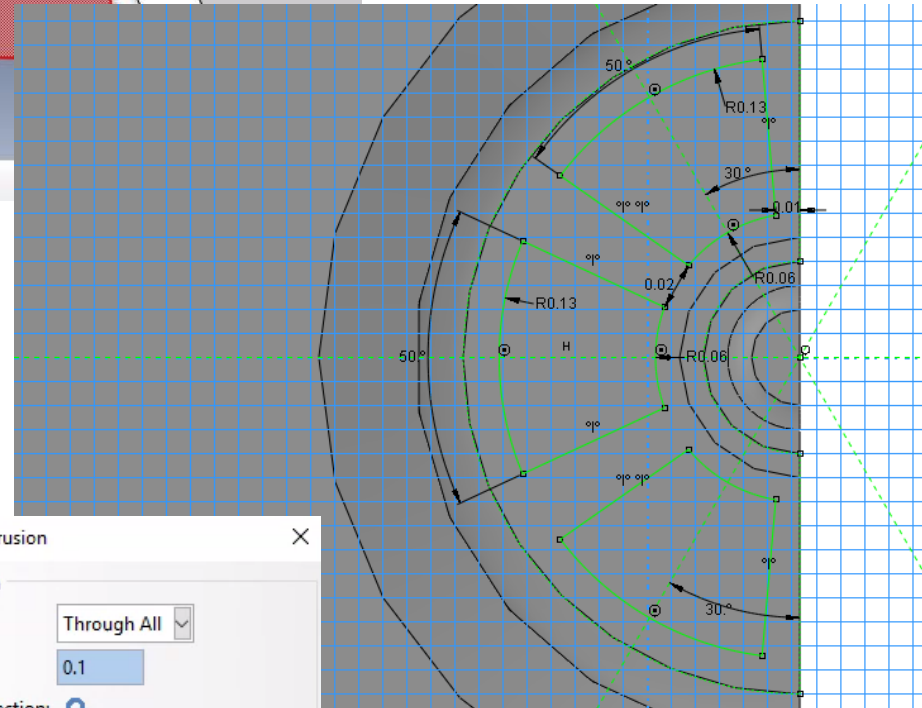
✓ Il reste des « trous » à faire

Ajout des “branches” de la jante

✓ « create cut : extrude »



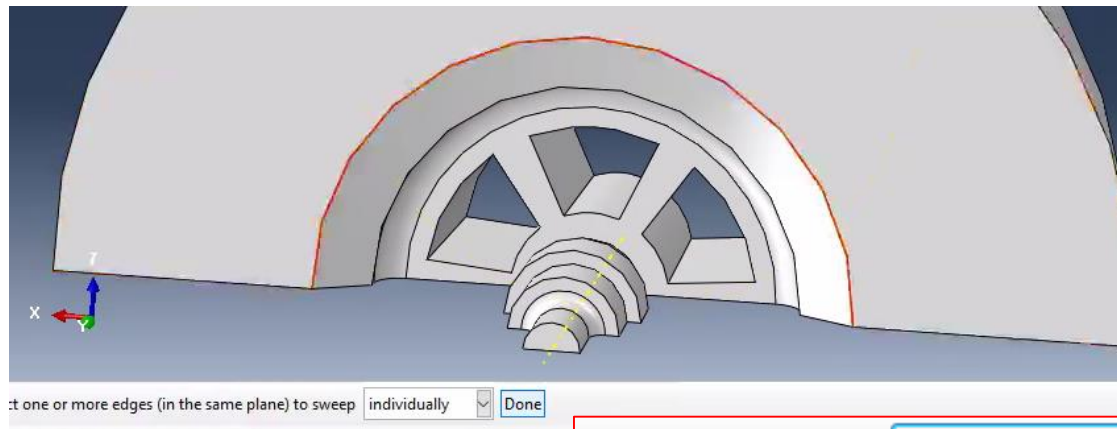
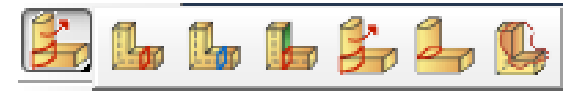
- ✓ Dessiner des branches (à votre guise!)
- ✓ **Exemple ici** : 6 branches
- ✓ Extrusion : à travers tout !



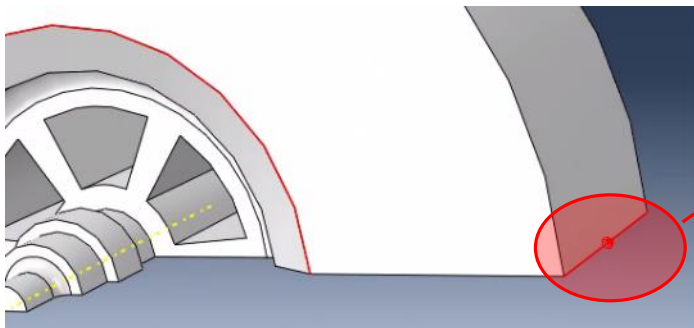
Partitionner la pièce jante / volant

✓ Plusieurs options de partition

→ Ici : on peut « extruder » à partir d'une arête
= « partition cell : extrude/sweep edges »

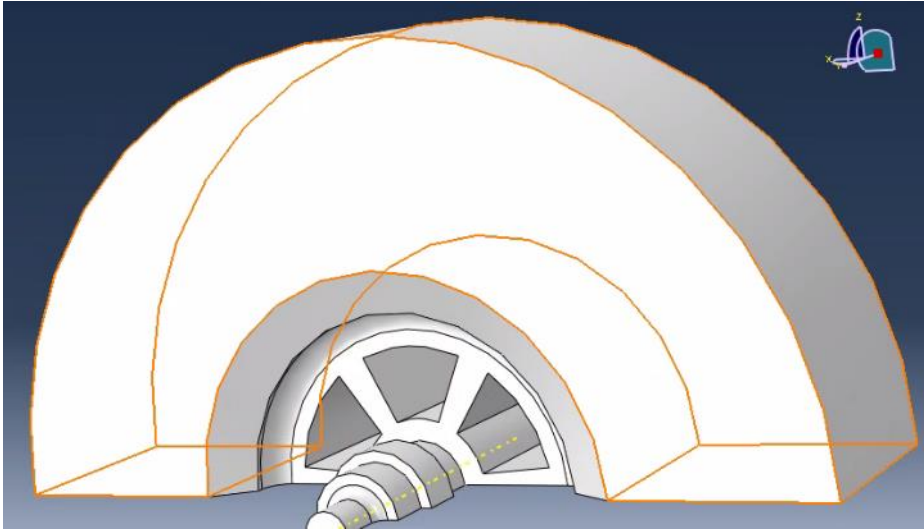


How do you want to sweep? **Extrude Along Direction** Sweep Along Edge

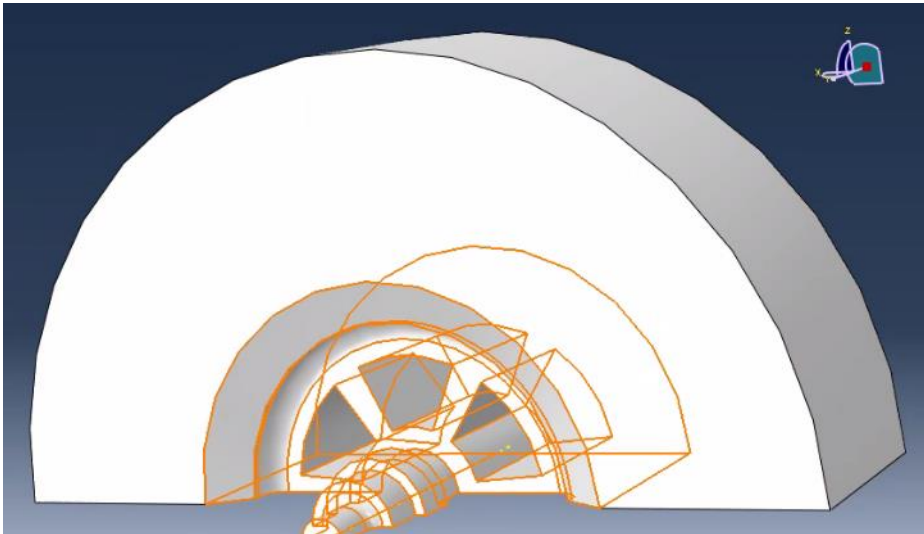


✓ Par exemple : définir la direction d'extrusion à partir de cette arête

Partitionner la pièce jante / volant



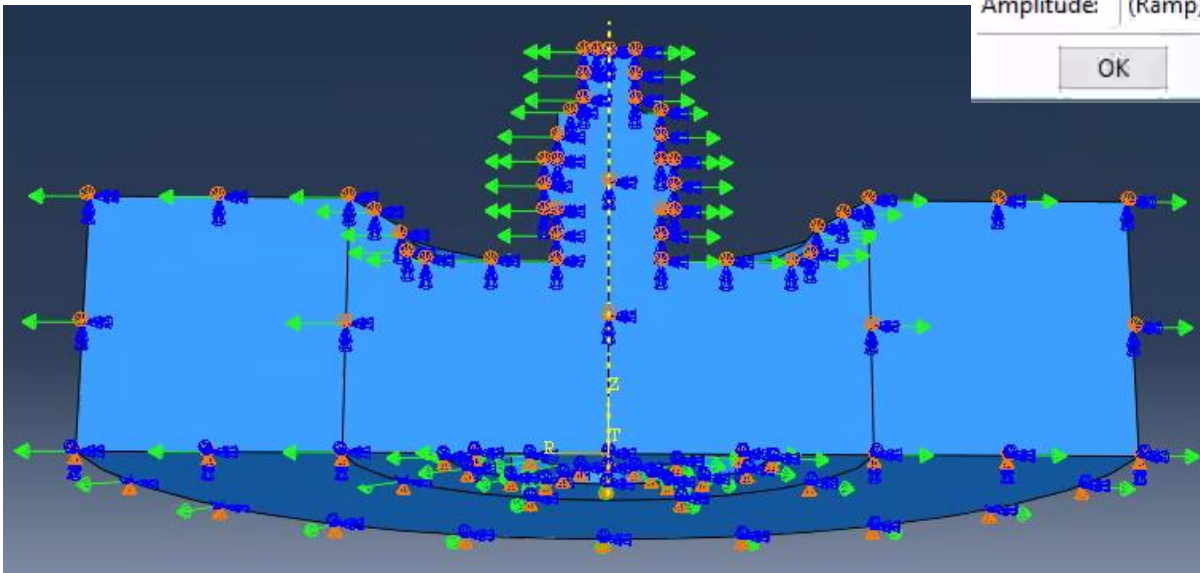
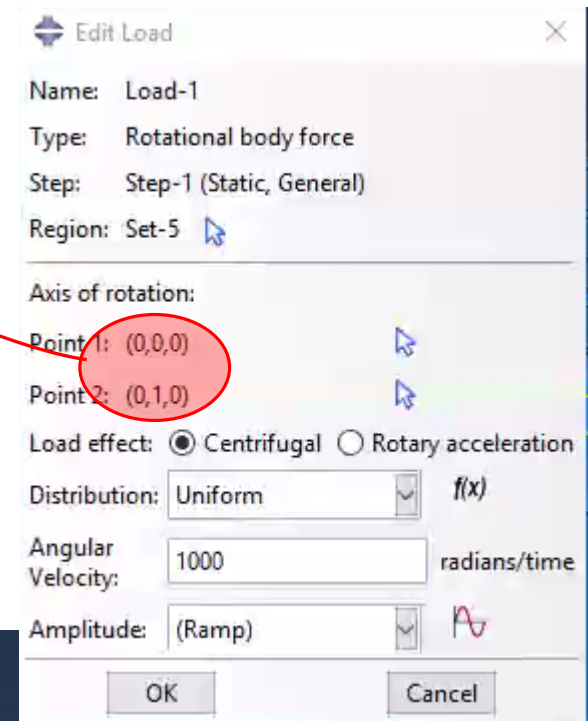
- ✓ Partition 1 : affecter le matériau correspondant au volant



- ✓ Partition 2 : affecter le matériau correspondant à la jante

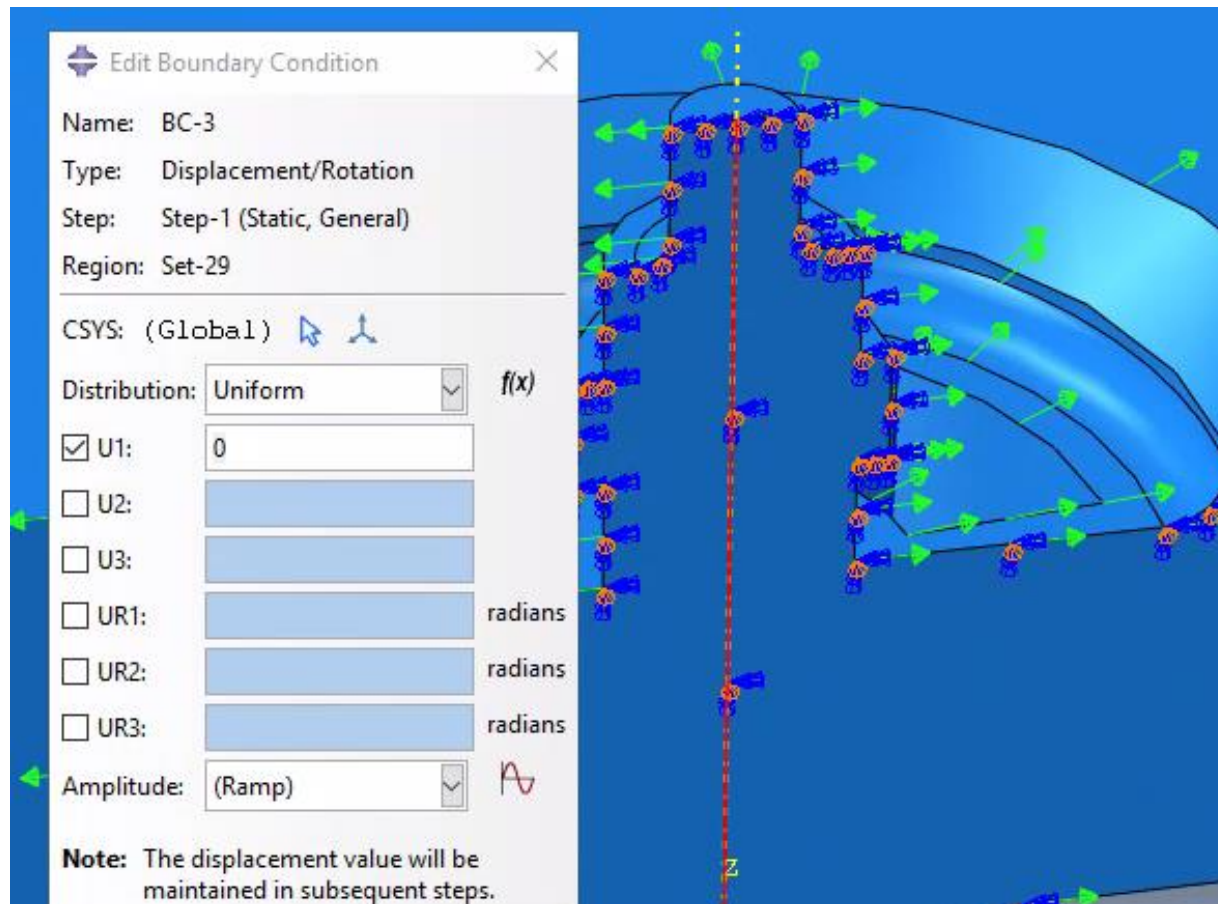
Modèle 3D : module LOAD

- ✓ Edition du chargement précédent
 - **ATTENTION** : l'axe n'est plus forcément le bon, vérifier !
 - **Redéfinir** la région concernée par ce chargement
- ✓ **Deux symétries** à prendre en compte
 - Par rapport au plan XY
 - Par rapport au plan XZ

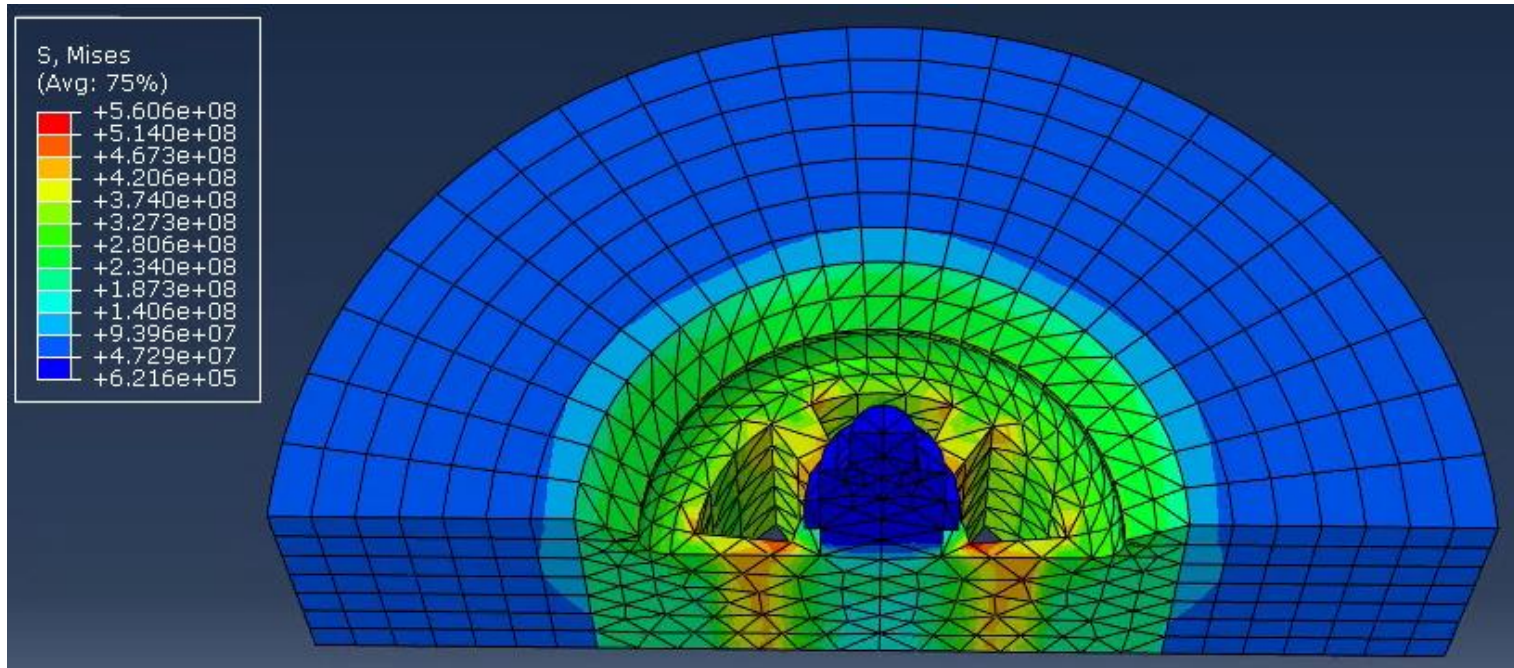


Modèle 3D : module LOAD

- ✓ **Les mouvements de corps rigide** sont-ils tous supprimés...?
- ✓ **NON**: l'axe peut translater !!
- ✓ Exemple de solution : fixer le déplacement de l'axe



Modèle 3D : RESULTATS

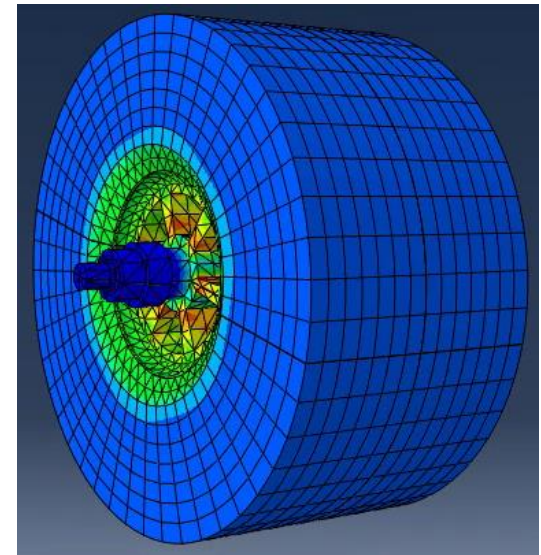


- ✓ Comme précédemment pour visualiser la totalité du volant :

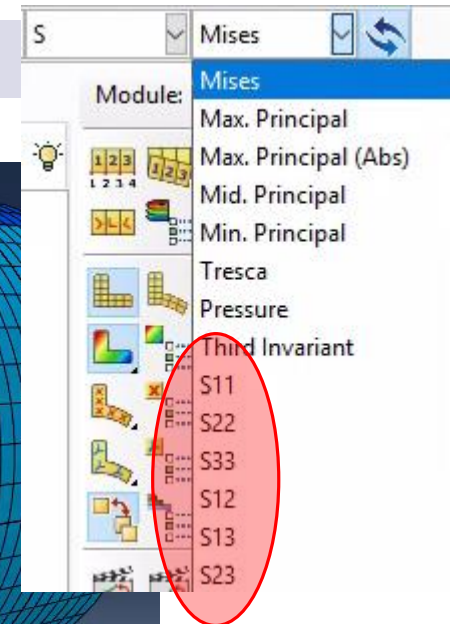
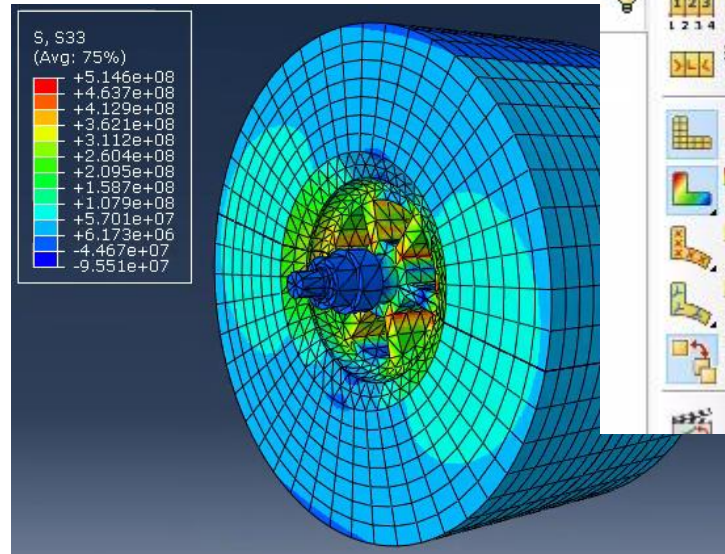
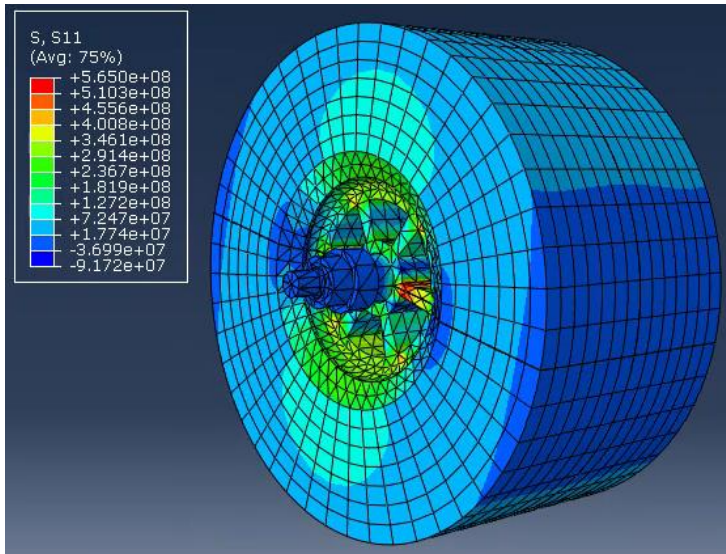
Symétrie miroir selon XY

Symétrie miroir selon XZ

- ✓ **QUESTION** : nouvelle vitesse de rotation maximale ??



Analyse des composantes du tenseur des contraintes

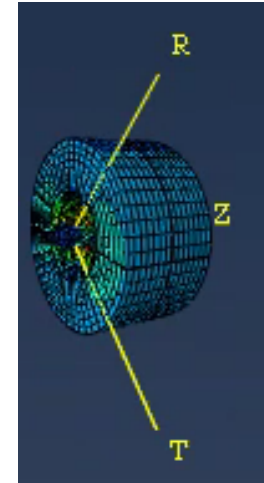
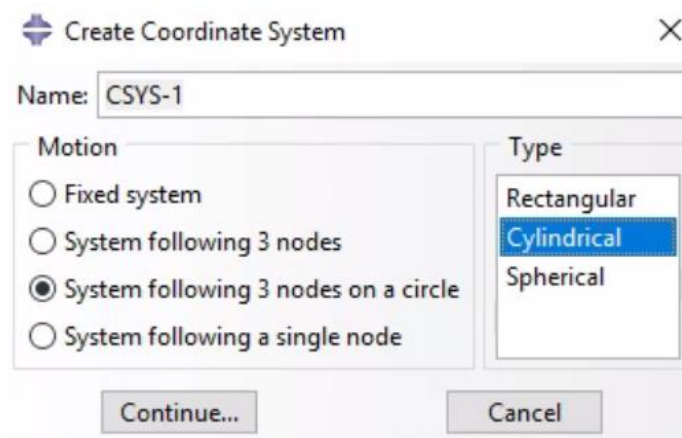


- ✓ **PROBLEME** : la solution n'est pas axisymétrique !!!
- ✓ **LOGIQUE** : le repère par défaut est cartésien, et non cylindrique
 - visualisation des résultats en coordonnées cylindriques ?
 - il faut créer un nouveau repère

Création d'un nouveau système de coordonnées (CSYS)

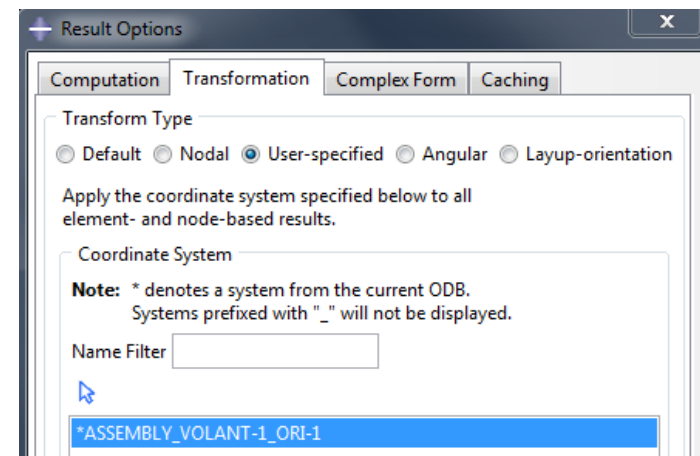
✓ Tools → coordinate system → create

✓ Sélectionner 3 nœuds sur une arête circulaire

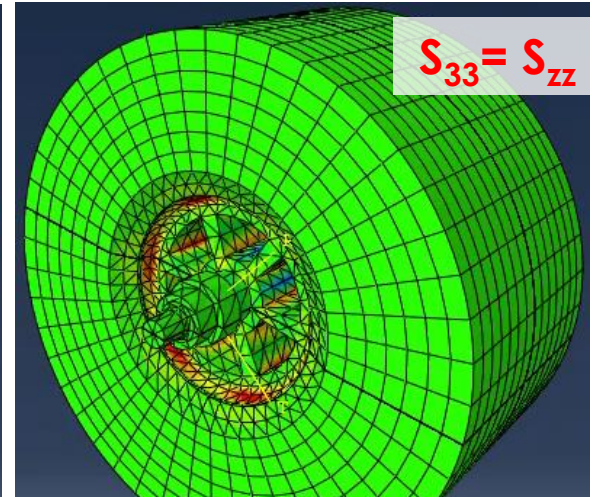
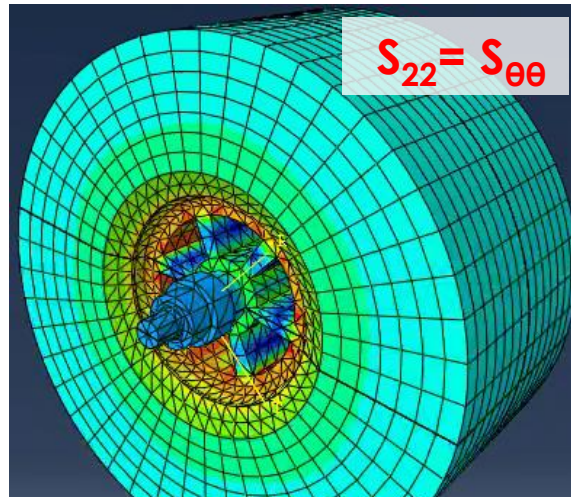
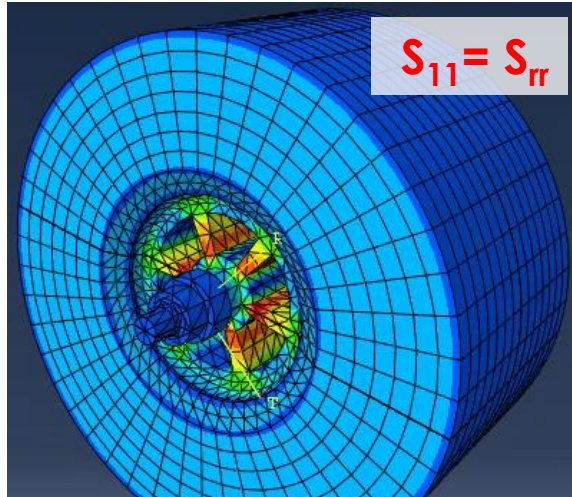


✓ Transformer les résultats dans ce repère

✓ Results options 
→ transformation
→ user-specified
→ select coordinate system

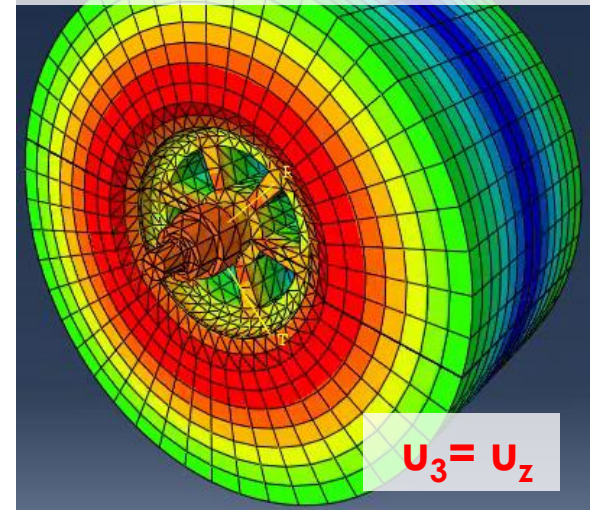
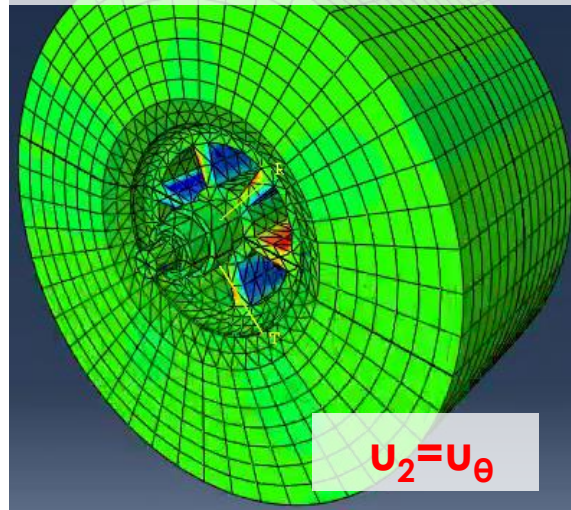
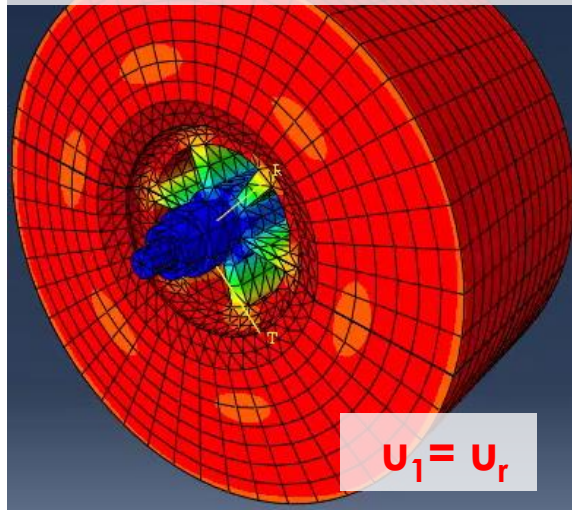


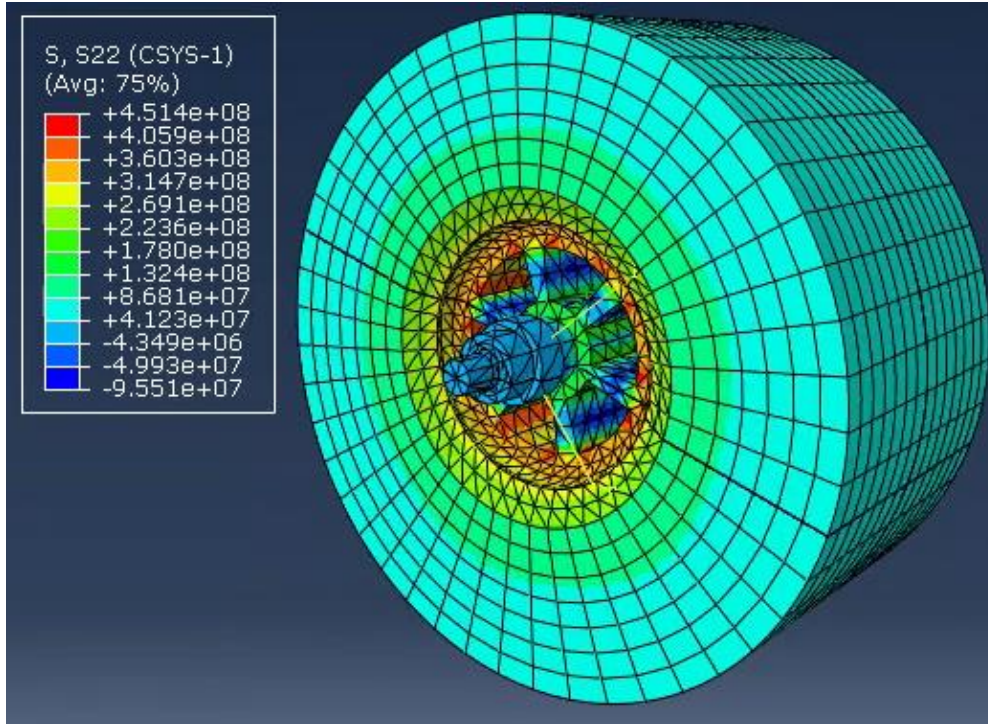
Modèle 3D : RESULTATS



IMPORTANT : analyser chacune de ces composantes

→ Sont-elles cohérentes et logiques ???





- ✓ Contraintes prédominantes :
contrainte tangentielle $S_{\theta\theta}$

- ✓ Cohérent avec les fasciés
de rupture observés !





Prise en compte de l'anisotropie du matériau

Imposer un matériau anisotrope

- ✓ Créer un nouveau matériau anisotrope

Module longitudinal : $E_1 = 140 \text{ GPa}$

Module transverse : $E_2 = E_3 = 8 \text{ GPa}$

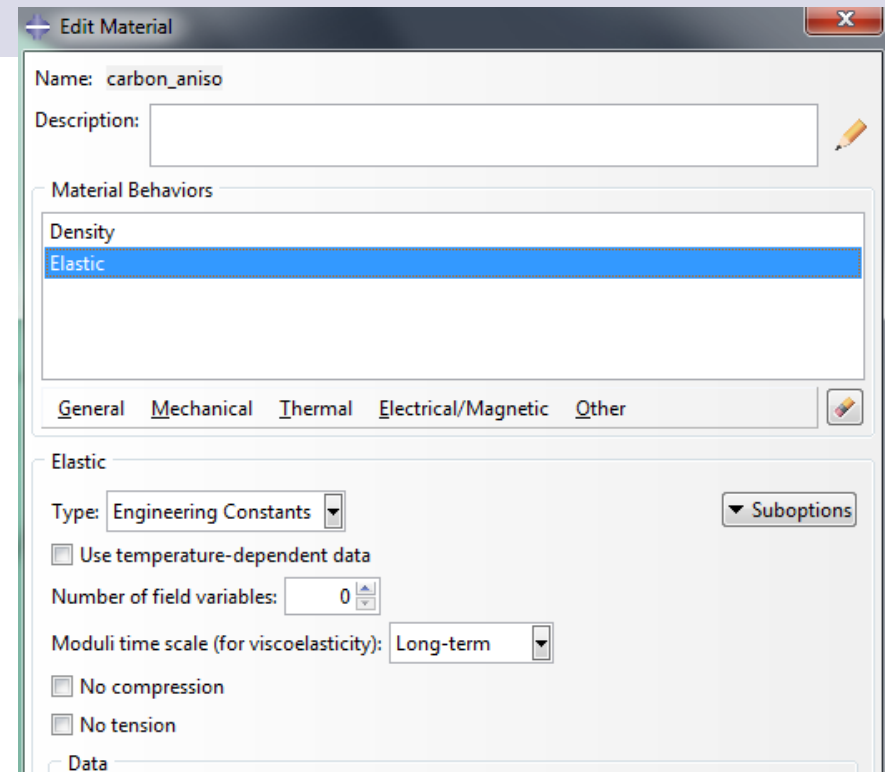
Module de cisaillement $G_{12} = G_{13} = 4,5 \text{ GPa}$

Module de cisaillement $G_{23} = 3 \text{ GPa}$

Coefficient de Poisson $\nu_{12} = \nu_{13} = 0.27$

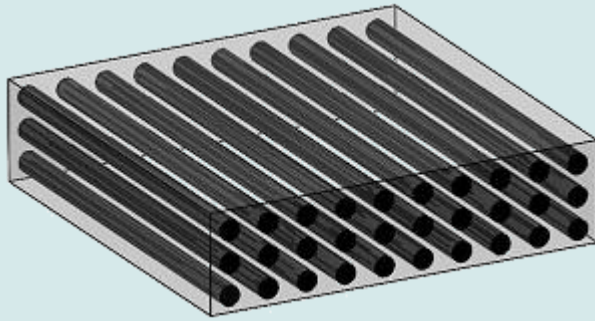
Coefficient de Poisson $\nu_{23} = 0.32$

- ✓ Densité : comme précédemment
- ✓ Assigner une nouvelle section homogène avec ce matériau



Question : à quoi corresponde les axes 1,2 et 3 ?

→ On doit définir un repère local d'anisotropie



Module longitudinal : $E_1=140$ GPa

Module transverse : $E_2=E_3=8$ GPa

Module de cisaillement $G_{12} = G_{13} = 4,5$ GPa

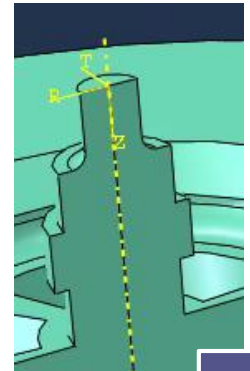
Module de cisaillement $G_{23} = 3$ GPa

Coefficient de Poisson $\nu_{12}=\nu_{13}=0.27$

Coefficient de Poisson $\nu_{23}=0.32$

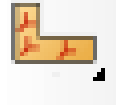
Définir un repère local d'anisotropie

- ✓ Comme précédemment : définir un repère cylindrique comme repère d'anisotropie
 - Module *property* : *Tools* → *Datum* → *Csys* → 3 points → *cylindrical*
 - Laissez-vous guider ! (sélectionner l'origine puis les axes)
- ✓ Sens des fibres ?
 - e_θ bien sûr , puisque la contrainte $S_{\theta\theta}$ est prédominante !!!



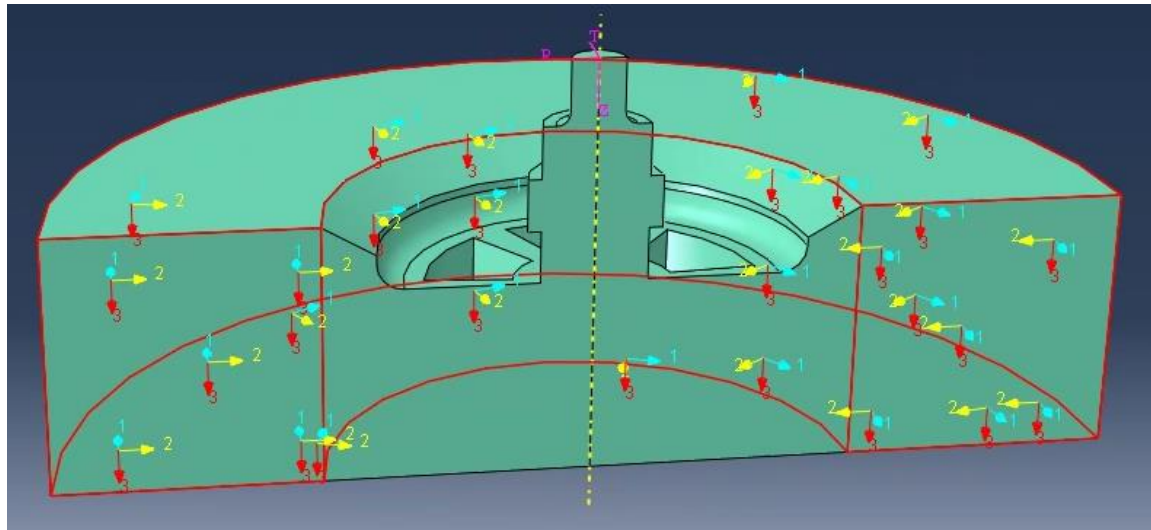
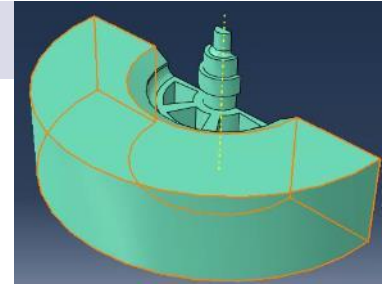
Définir un repère local d'anisotropie

✓ « Assign material orientation »

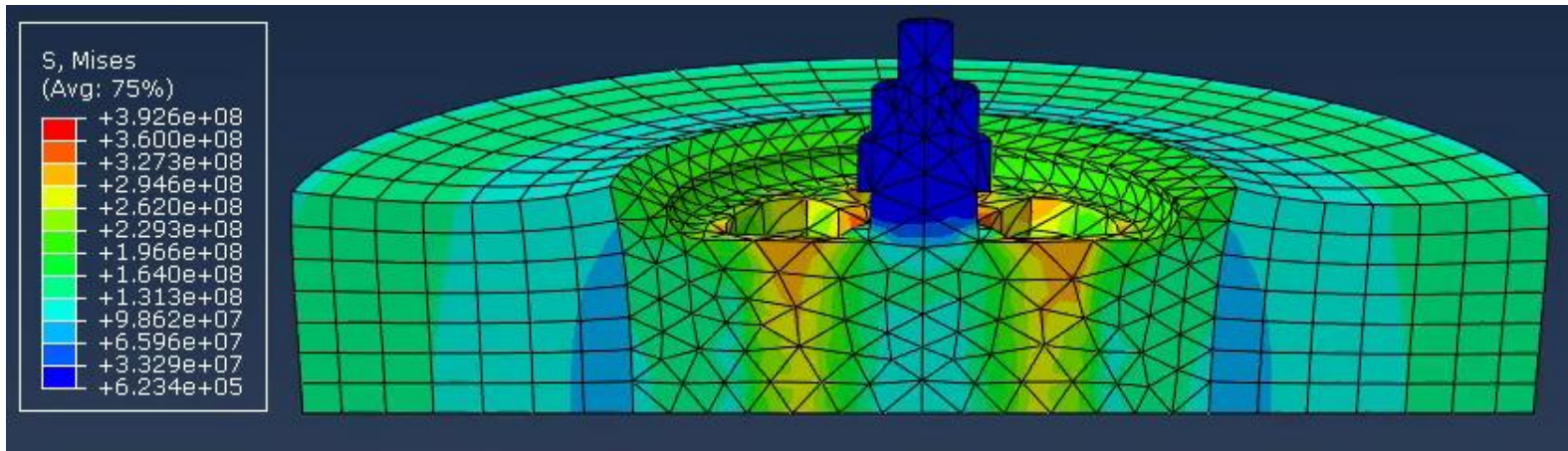


✓ Sélectionner le volant uniquement

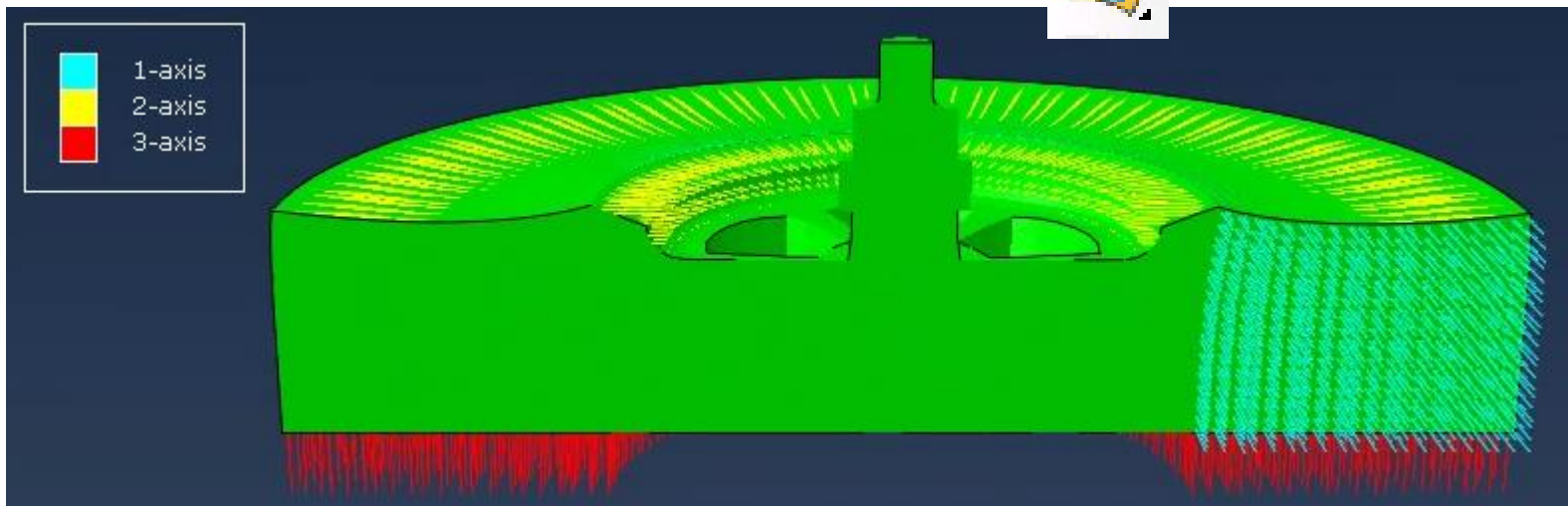
- Dans la définition du matériau, la direction « 1 » correspond à la direction des fibres = tangent au volant d'inertie
- Sélectionner le CSYS
- Si besoin, tourner le repère pour que la direction « 1 » soit tangente au volant !

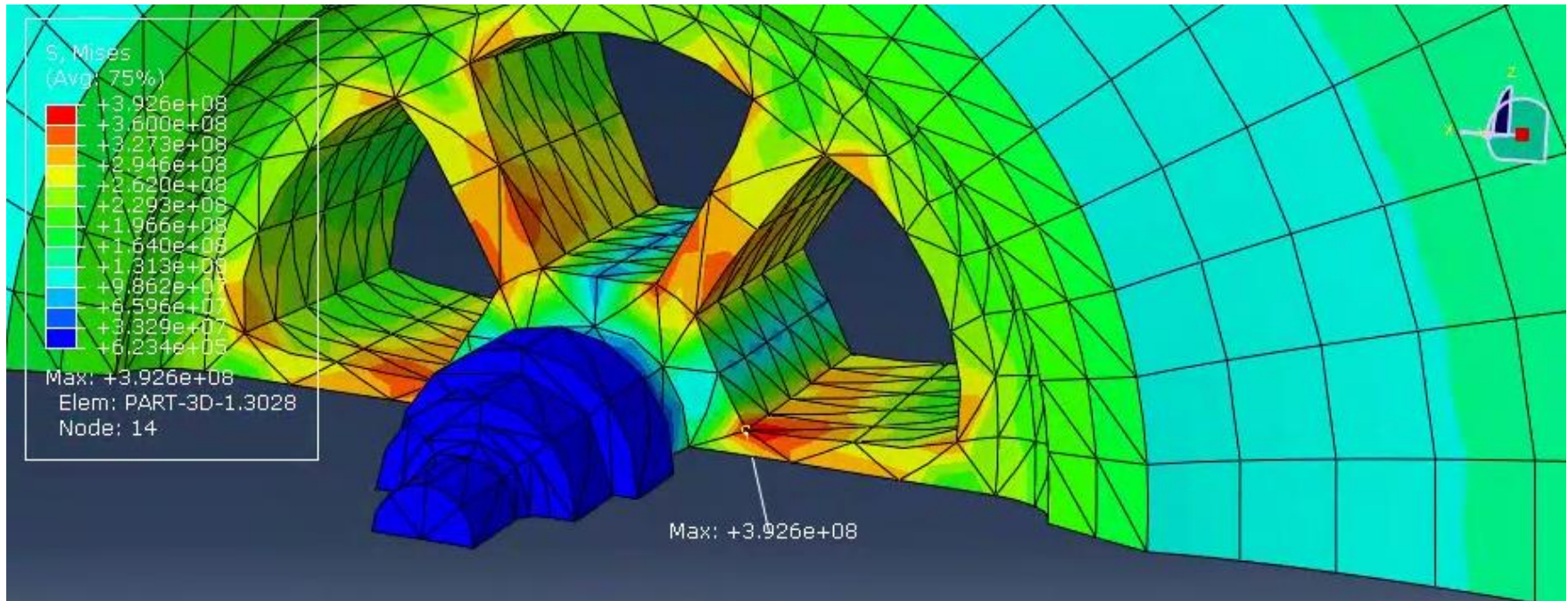


Anisotropie du matériau: RESULTATS

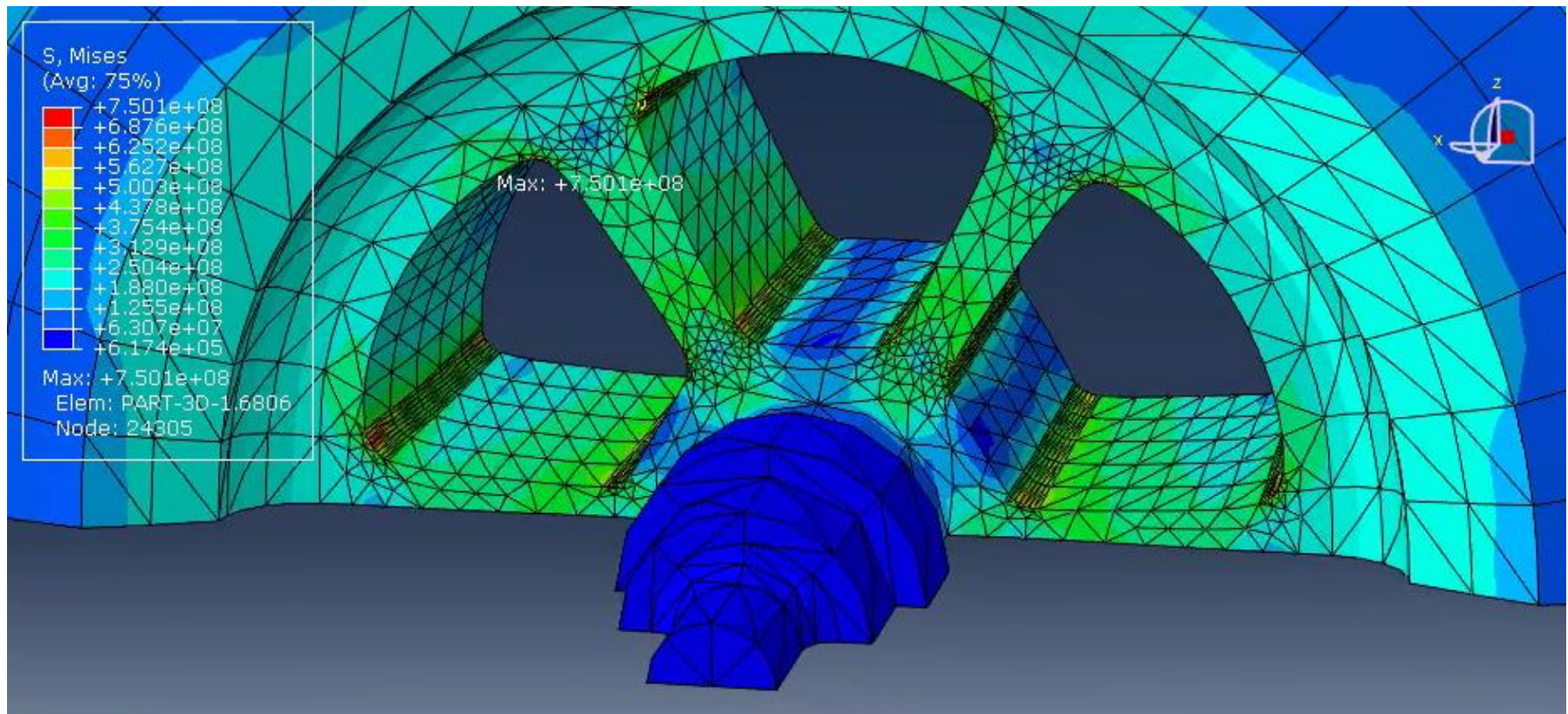


- ✓ La **déformée** est visiblement différente que précédemment !!
- ✓ **Nouvelle vitesse de rotation critique ?**
- ✓ Visualisation de l'orientation des fibres :





- ✓ La contrainte est très localisée
 - Normal : **jamais** de variation d'angle brusque !
 - **ET** : le maillage devrait être localement raffiné !

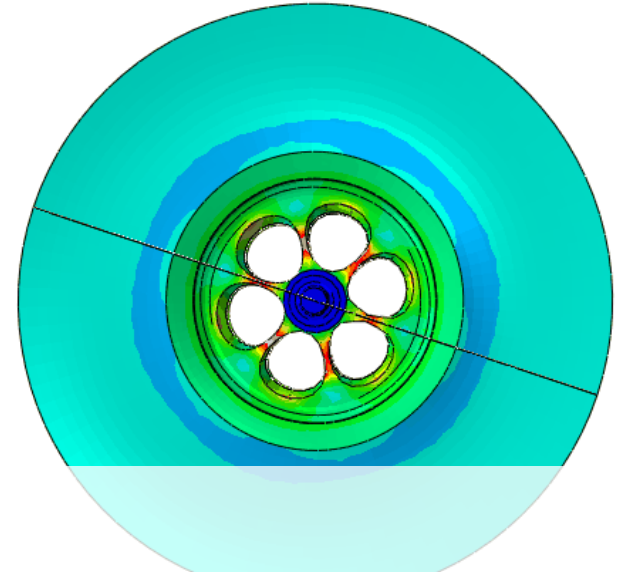
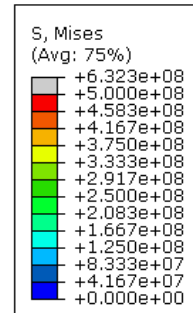
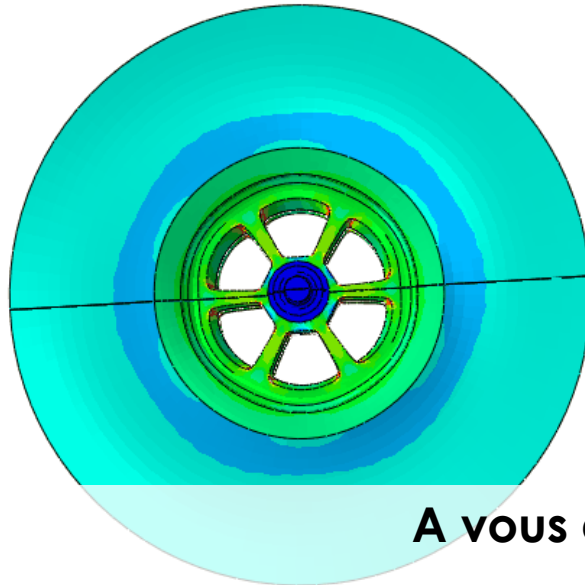
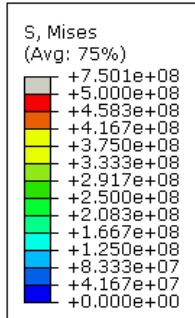


- ✓ Même géométrie avec congés + maillage raffiné localement
- ✓ **MAIS** : cette géométrie de jante est-elle pertinente ???



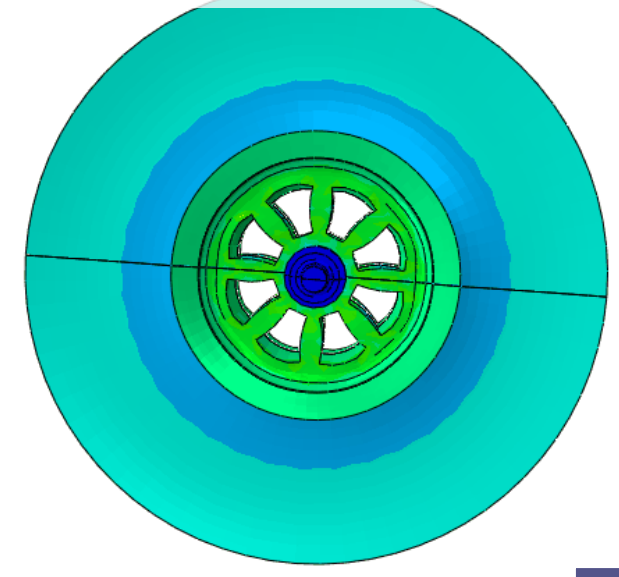
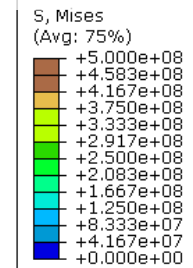
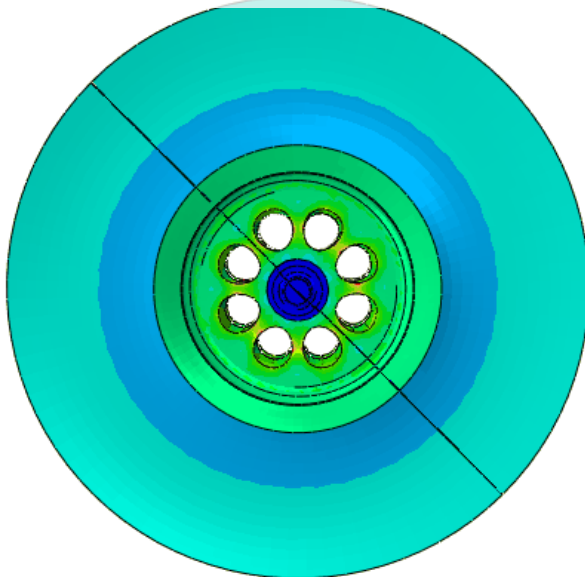
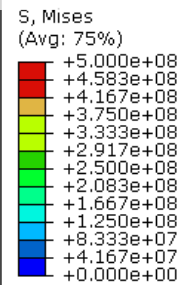
Effet de la forme de la jante

Effet de la forme de la jante



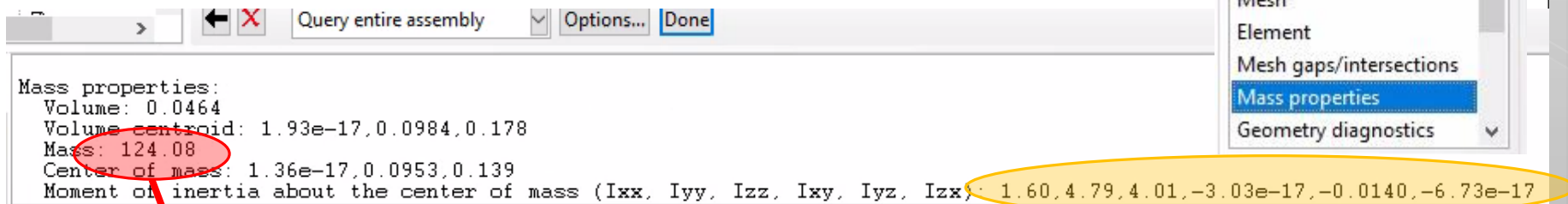
A vous de jouer !

Objectif : Maximiser la vitesse de rotation critique du matériau



Effet de la forme de la jante

- ✓ Intéressant également : **masse** de l'objet généré ?
- ✓ Les informations sur la densité et la géométrie existent
 - Possibilité de mesurer la masse totale !
 - Tools → Query → Mass properties



Masse du **demi**-volant d'inertie

Rappel : pas d'unité intrinsèque :
dépend de votre système d'unités



En l'état : grosse quantité d'acier!!

Moment d'inertie :
à maximiser pour
stocker l'énergie !

A retenir aujourd'hui

- ✓ Modèle 2D axisymétrique
- ✓ Repères cartésiens / cylindriques
- ✓ Matériau anisotrope
- ✓ Concentration de contraintes
- ✓ Mode hourglass / choix des éléments

