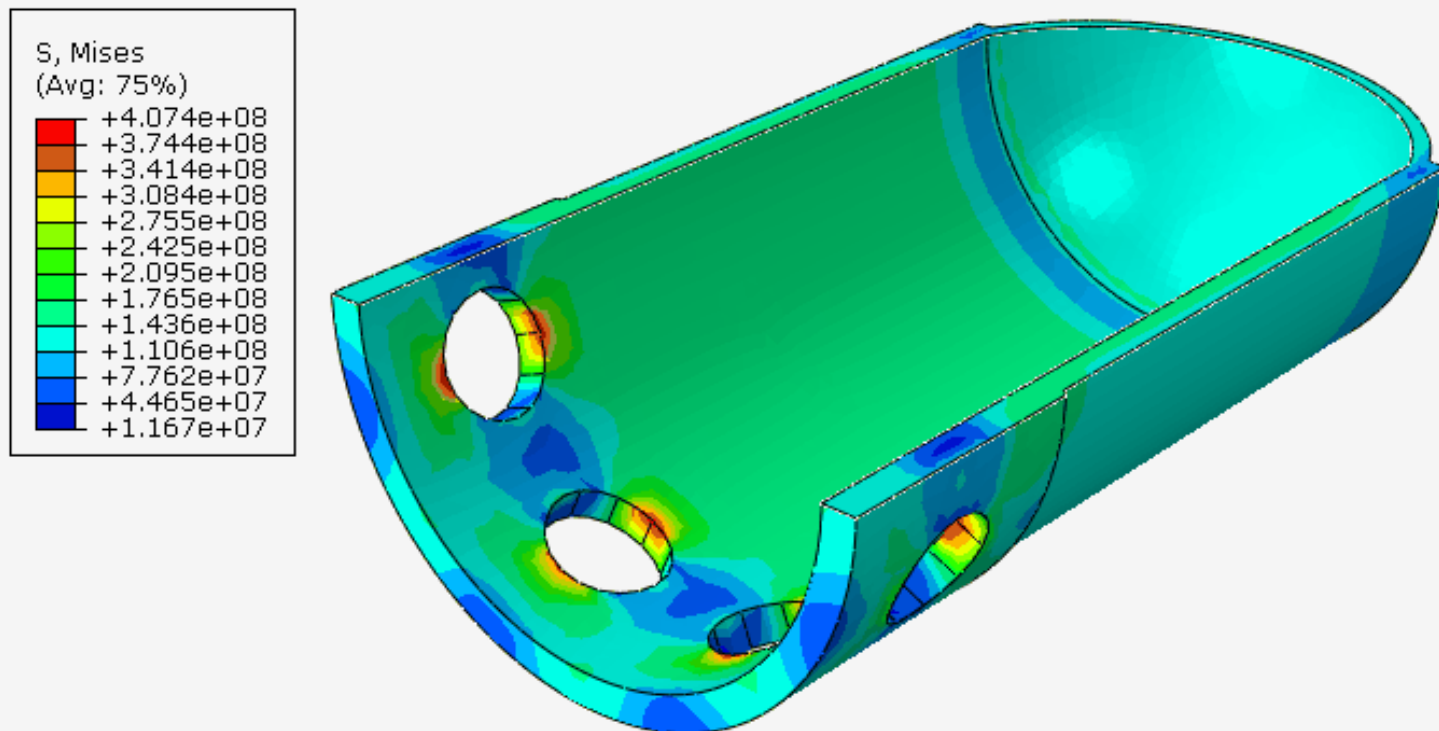


TP2 : Dimensionnement d'une cuve de réacteur



TP2 : Dimensionnement de la cuve

1

Contexte de l'étude

2

Hypothèses de modélisation

3

Modèle axisymétrique sans revêtement

4

Modèle axisymétrique avec revêtement

5

Modèle 3D à partir de la CAO

6

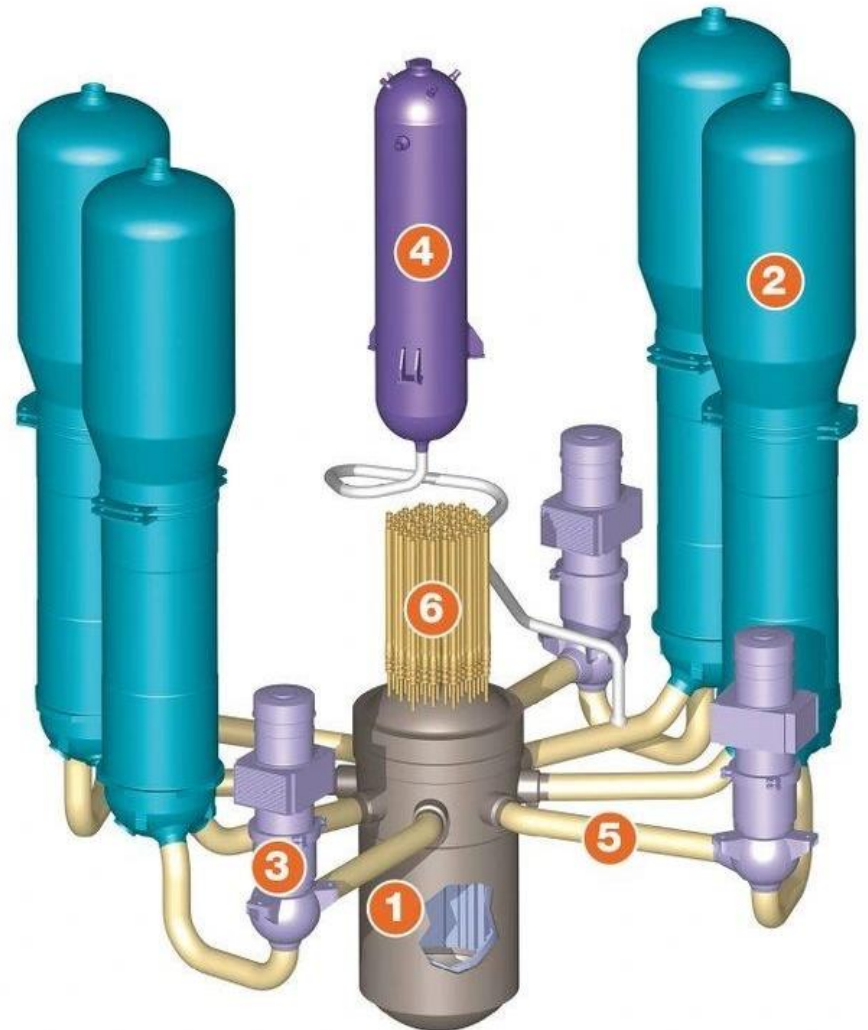
Facteur de sécurité et analyse des contraintes



Contexte de l'étude

La cuve du réacteur

- ❶ **Cuve de réacteur et internes de cuve** : enceinte métallique étanche de forte épaisseur en acier renfermant le cœur du réacteur : les assemblages combustibles.
- ❷ **Générateurs de Vapeur (GV)** : assurent le transfert de chaleur de l'eau du circuit primaire à l'eau du circuit secondaire, la transformant ainsi en vapeur qui entraîne une turbine couplée à un alternateur.
- ❸ **Groupes MotoPompes Primaires (GMPP)** : participent à la sûreté de l'installation en permettant la circulation de l'eau primaire à travers le cœur du réacteur et les générateurs de vapeur.
- ❹ **Pressuriseur** : maintient l'eau du circuit primaire en phase liquide grâce à une pression de 155 bars.
- ❺ **Tuyauteries primaires** : assurent le transfert de l'eau entre la cuve et les générateurs de vapeur.
- ❻ **Mécanismes de Commande de Grappes (MCG)** : permettent de réguler la réaction nucléaire dans la cuve du réacteur et de la stopper en 2 secondes, assurant ainsi la sûreté de la centrale.

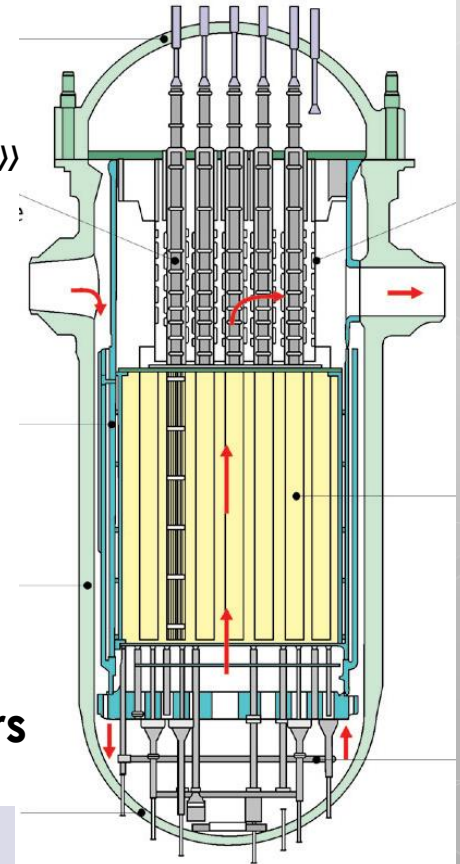


La cuve du réacteur

« deuxième barrière de confinement des éléments radioactifs (la première est la gaine des assemblages combustibles et la troisième l'enceinte de confinement) »

- ✓ élément **critique** de la sécurité d'une centrale!
- ✓ **acier de forte épaisseur** afin d'assurer la résistance à une surpression
- ✓ **revêtement intérieur** en acier inoxydable (corrosion)
- ✓ fonctionnement normal : cuve remplie **d'eau à 155 bars**

- **Question 1** : facteur de sécurité à l'usage
- **Question 2** : rôle mécanique du revêtement?
- **Question 3** : concentrations de contraintes ?



La cuve du réacteur : matériaux

- ✓ matériau constitutif de la cuve :
acier faiblement allié Fe-Mn-Ni (Cu-P)

$$E=210 \text{ GPa}$$

$$\nu=0.3$$

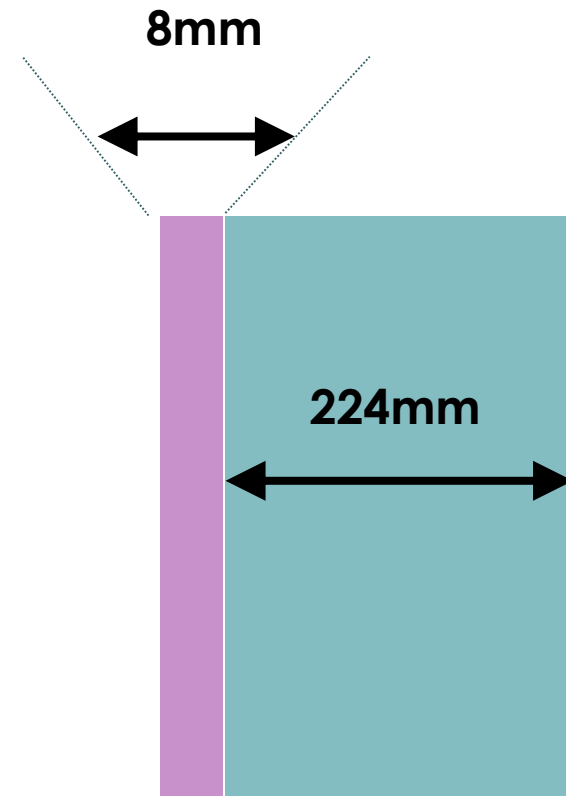
$$Re=750 \text{ MPa}$$

- ✓ revêtement de la cuve :
acier austénitique 304L 18 %Cr-10 %Ni

$$E=200 \text{ GPa}$$

$$\nu=0.3$$

$$Re = 210 \text{ MPa}$$



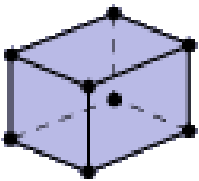
La cuve du réacteur



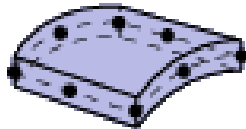
Choix des éléments dans la modélisation par éléments finis

- Cas général (1D, 2D, 3D) : choix de **sous-domaines** appelés **éléments**

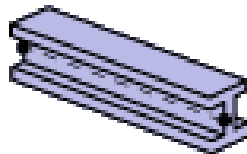
Solide continu



Coque



Poutre

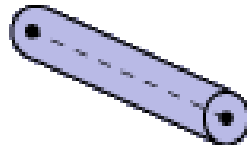


- ✓ Élément 1D : **barre** et **poutre**

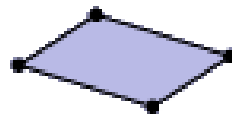
- ✓ Élément 2D : **axisymétrique**, **membrane** et **coque**



Membrane



Barre



Rigide

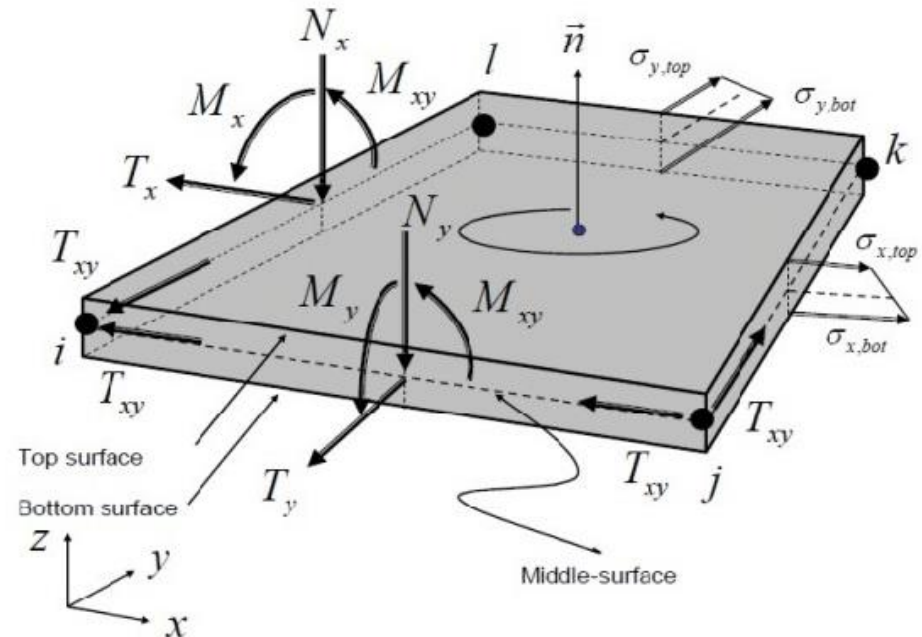
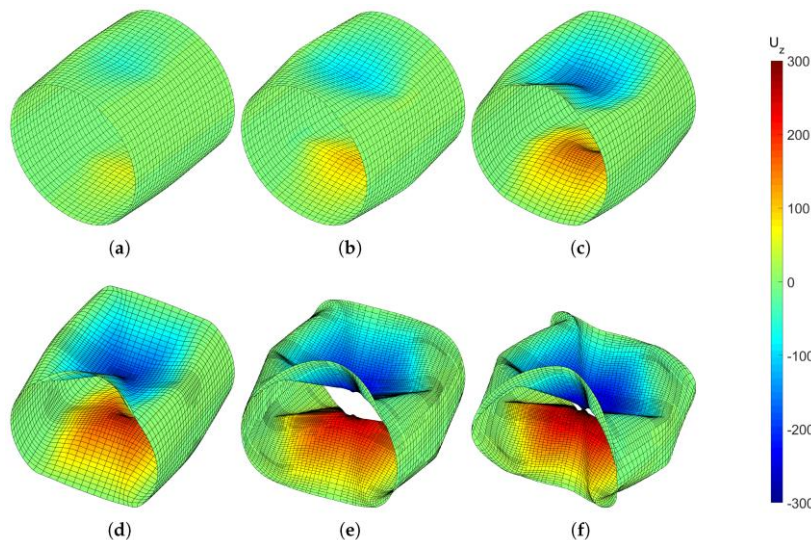
- ✓ Élément 3D : **solide continu**

- Le choix du type d'éléments fait partie des hypothèses de modélisation **centrales** dans la qualité et la pertinence d'une modélisation EF
= « *talent* » de l'ingénieur calcul !

Choix des éléments dans la modélisation par éléments finis

Éléments coques (shells) :

- ✓ une dimension est petite devant les autres
- ✓ résistance à la flexion / torsion de la plaque
- ✓ modélisation du plan moyen uniquement! =2D



- ✓ préférable pour toutes les structures à paroi mince (*thin-walled structures*)
- ✓ **est-ce le cas ici ??**

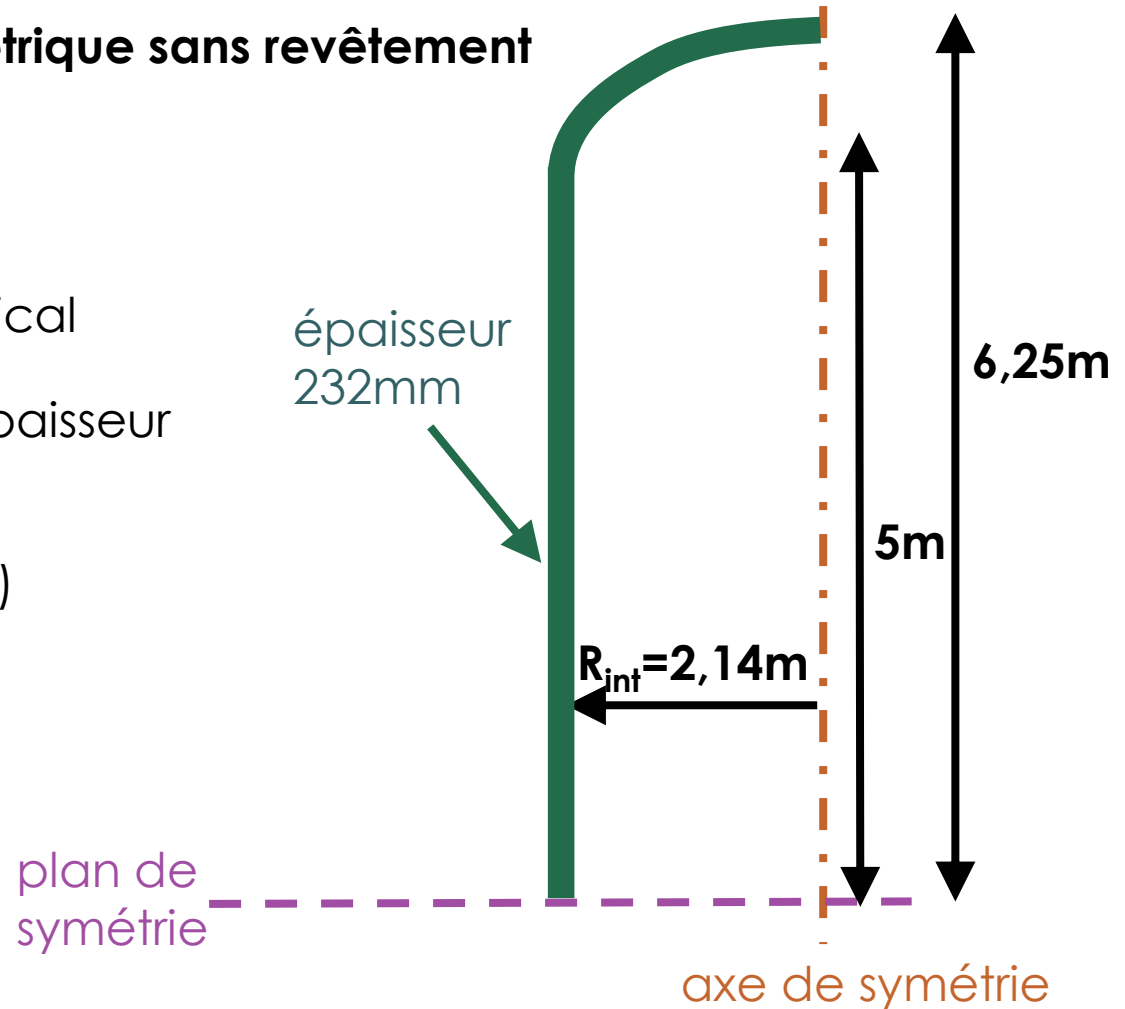


Hypothèses de modélisation

Progression du TP : du plus simple au plus complexe

Cas 1 : modèle axisymétrique sans revêtement

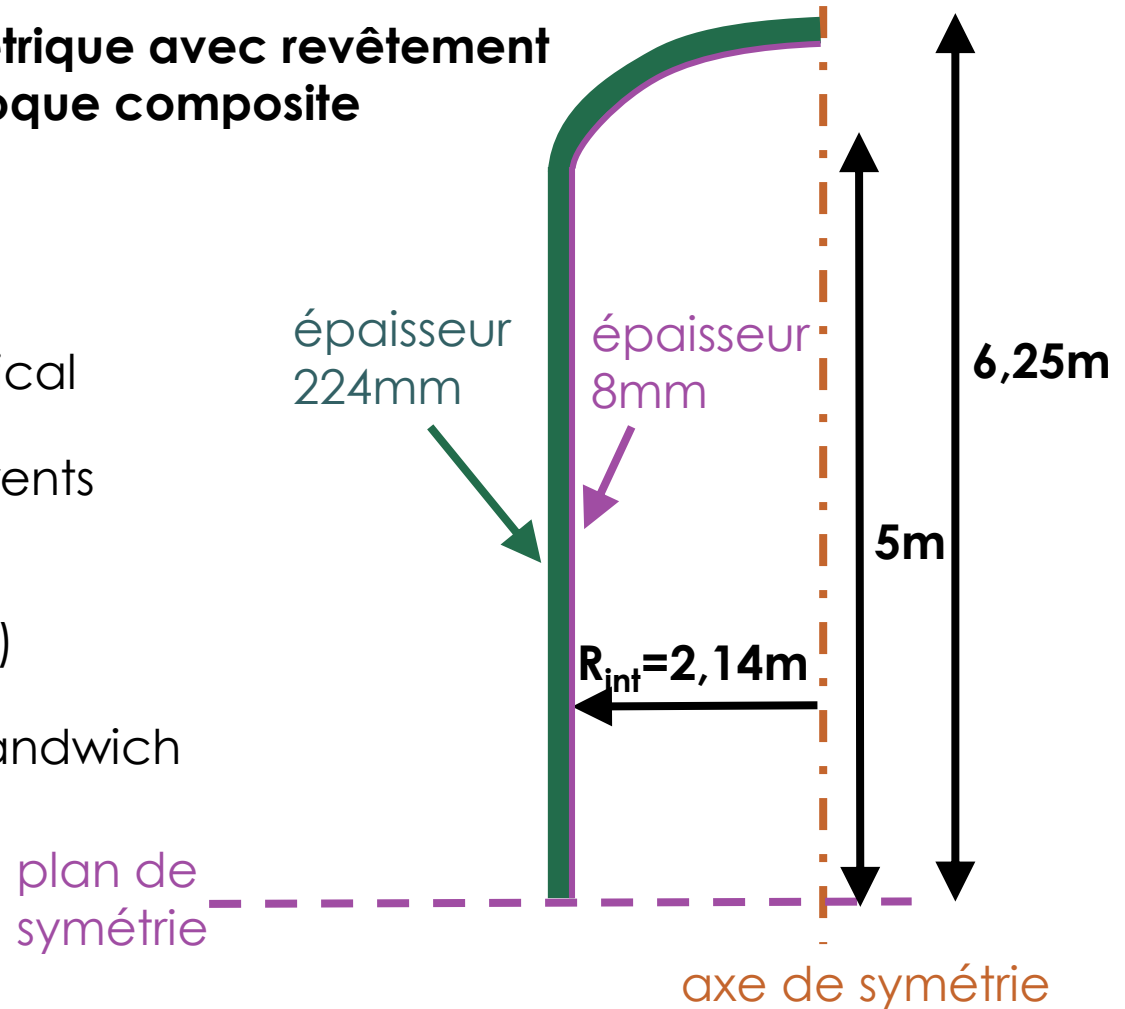
- ❑ cuve **axisymétrique**
- ❑ plan de symétrie vertical
- ❑ un seul matériau d'épaisseur totale $224+8=232$ mm
- ❑ éléments coques (2D)



Progression du TP : du plus simple au plus complexe

Cas 2 : modèle axisymétrique avec revêtement modélisation coque composite

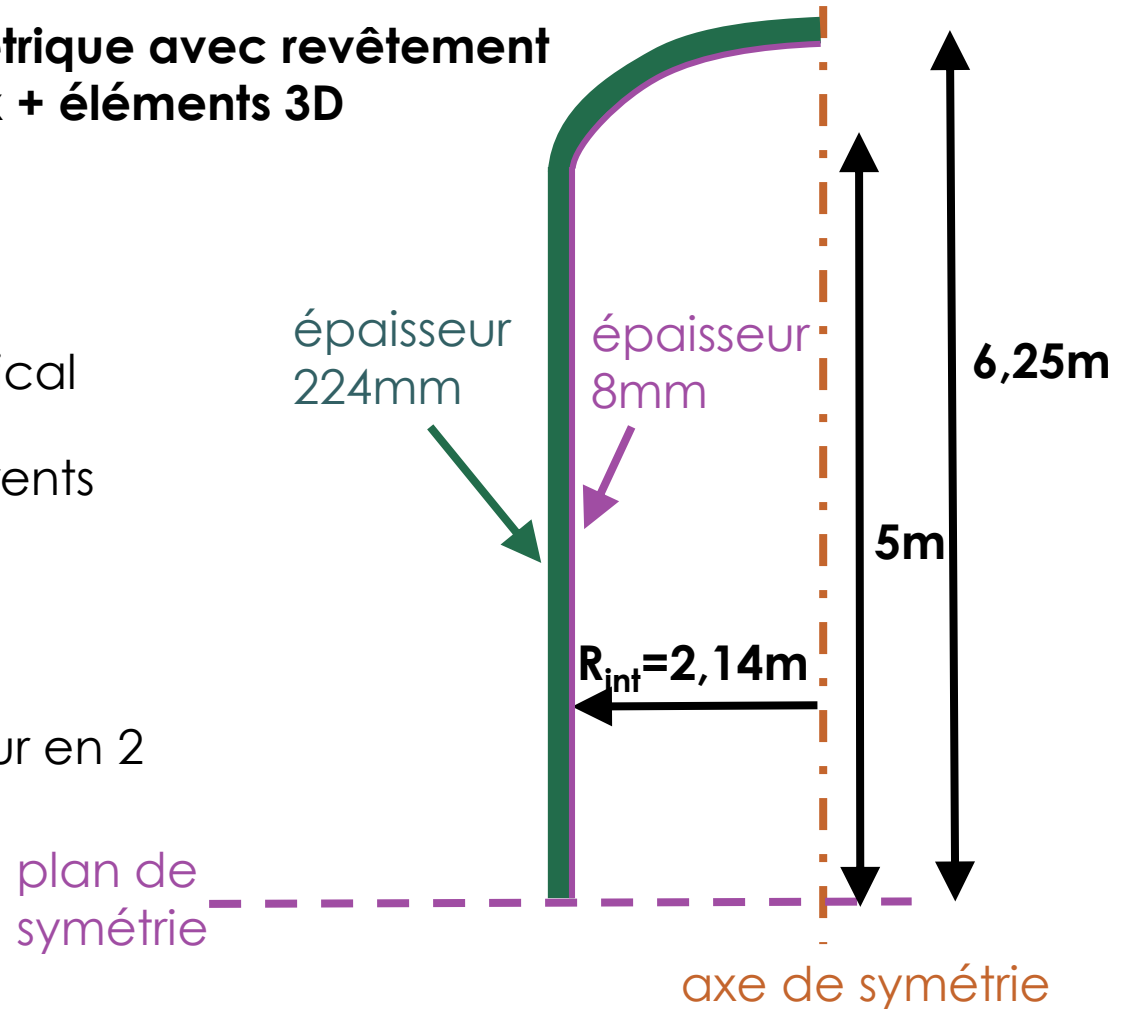
- ❑ cuve **axisymétrique**
- ❑ plan de symétrie vertical
- ❑ deux matériaux différents
acier + acier inox
- ❑ éléments coques (2D)
- ❑ modèle **composite** sandwich



Progression du TP : du plus simple au plus complexe

Cas 3 : modèle axisymétrique avec revêtement deux matériaux + éléments 3D

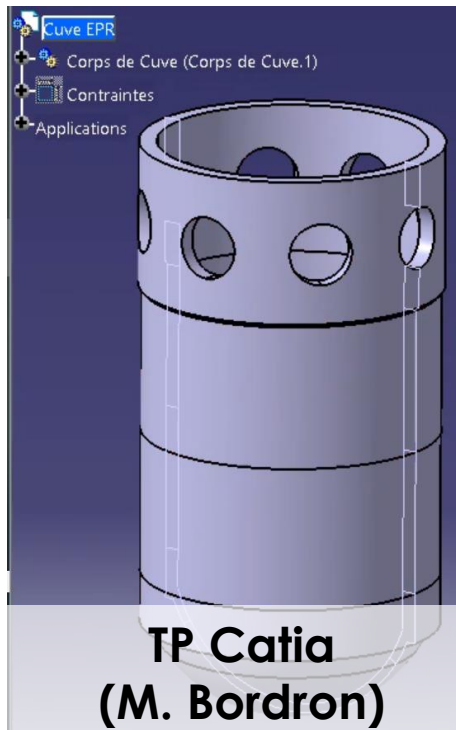
- ❑ cuve **axisymétrique**
- ❑ plan de symétrie vertical
- ❑ deux matériaux différents
acier + acier inox
- ❑ éléments 3D
- ❑ **partition** de l'épaisseur en 2



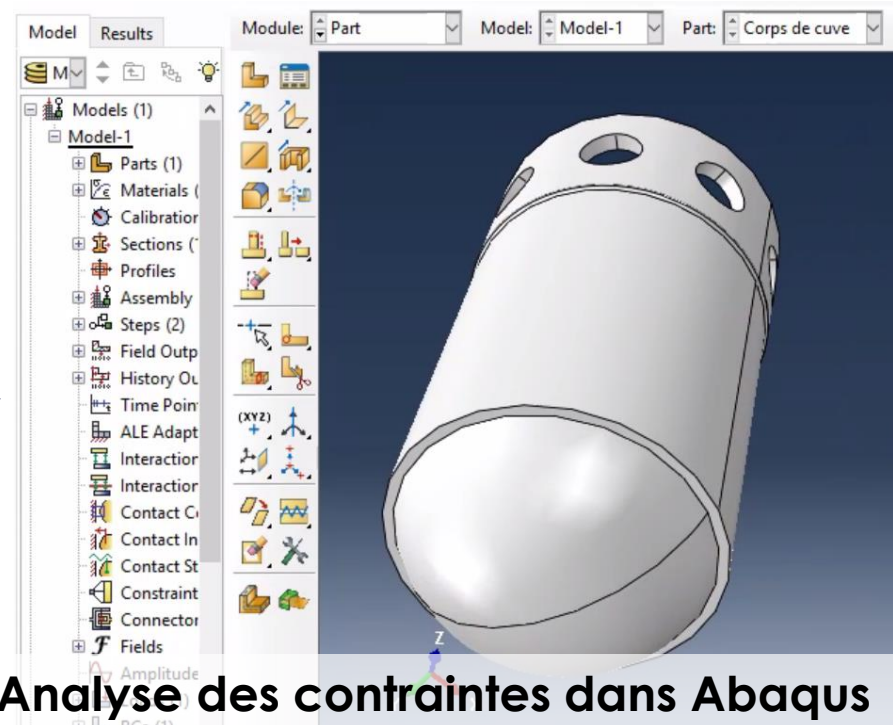
Progression du TP : du plus simple au plus complexe

Cas 4 : modèle 3D complet à partir de la CAO

- ☐ import du **corps de cuve** uniquement
- ☐ un seul matériau constitutif acier



import

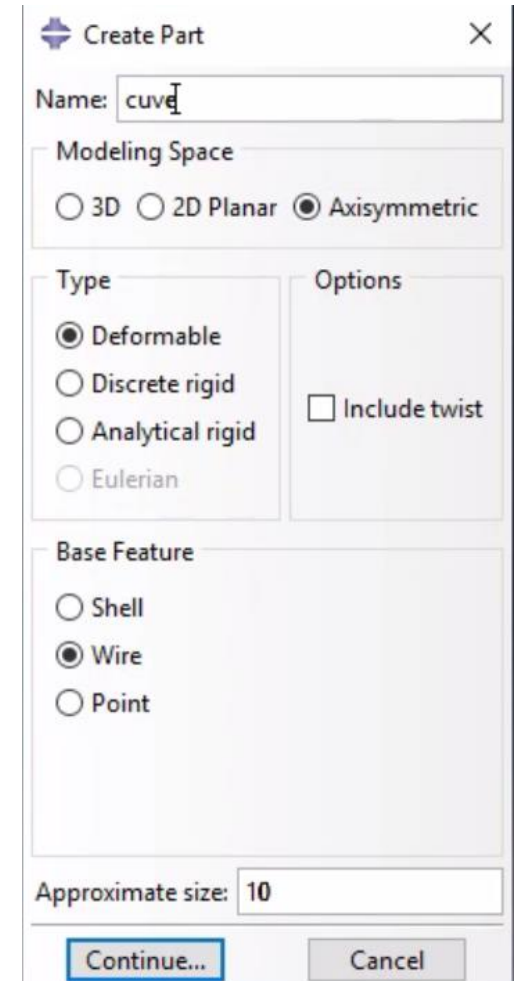
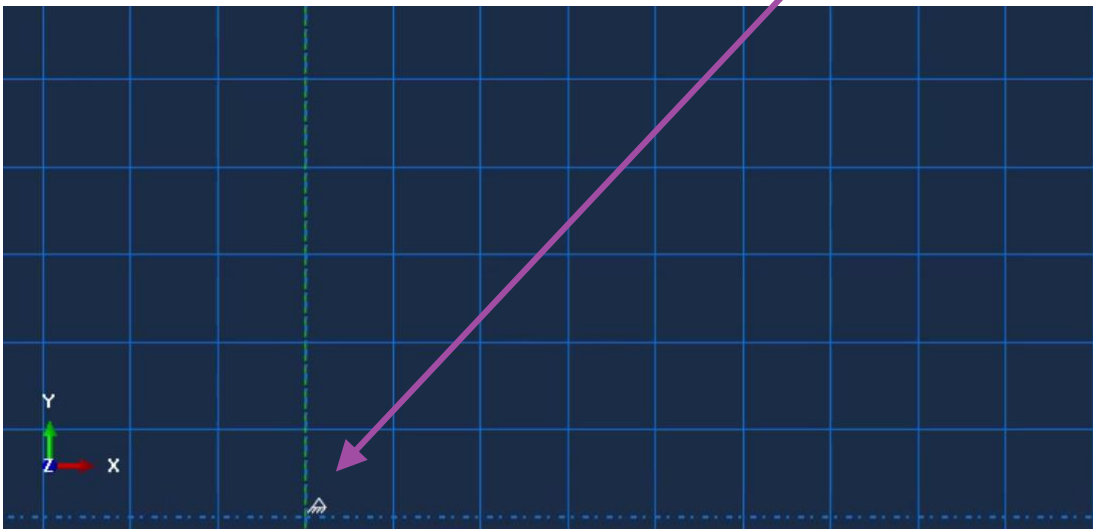




Modèle axisymétrique sans revêtement

Création du modèle

- ✓ créer une **nouvelle pièce**
- ✓ espace : axisymétrique (l'espace est donc 2D)
- ✓ les éléments qui seront dessinés seront des lignes uniquement (wire)
- ✓ taille approximative de la pièce (ordre de grandeur) ~10m par exemple
- ✓ l'esquisse possède un **axe de symétrie**

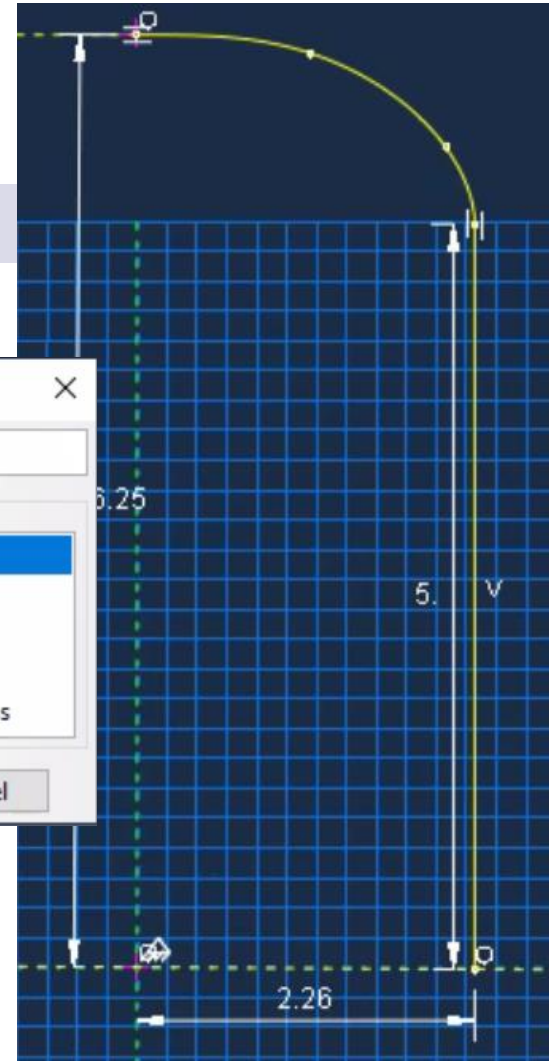
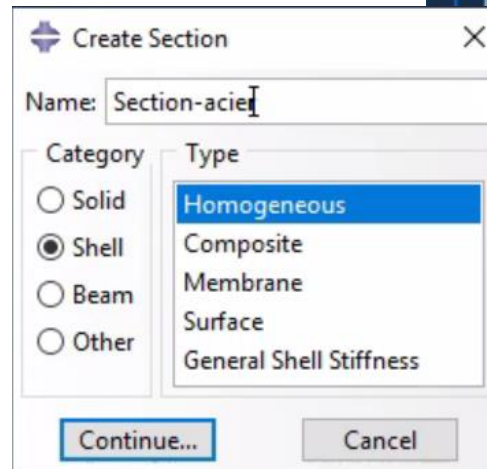


Création du modèle

- ✓ dessiner la **ligne moyenne** (qui deviendra le plan moyen par symétrie de révolution)

Matériaux / sections

- ✓ Créer le matériau « acier » :
propriétés élastiques
+ densité
- ✓ section « shell » (coque)
homogène
- ✓ épaisseur = 232mm
- ✓ assigner la section
(« shell offset » = middle surface)



Création du modèle

Assemblage

- ✓ Comme TP1 : assemblage « independant »

Step

- ✓ *General, static*
- ✓ *NLgeom = off* (hypothèse HPP)
- ✓ Paramètres de calcul par défaut

Loads (conditions aux limites)

- ✓ pression de 155 bars à l'intérieur (attention aux unités!)
- ✓ symétrie selon Y en bas (YSYMM)

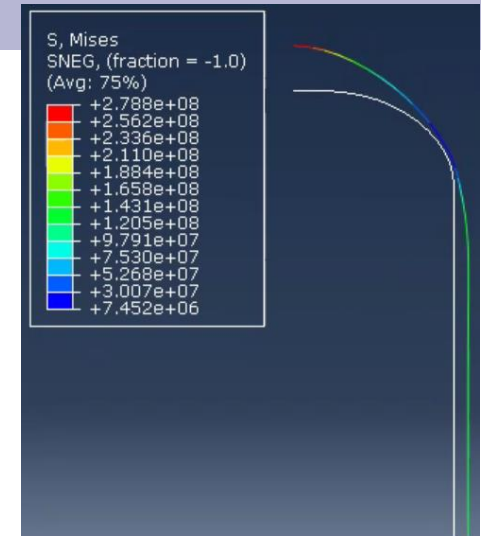
Maillage

- ✓ ligne à découper en éléments : à vous de jouer avec la taille

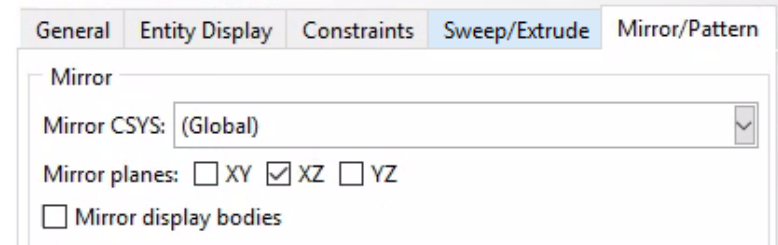


Visualisation des résultats

- ✓ 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



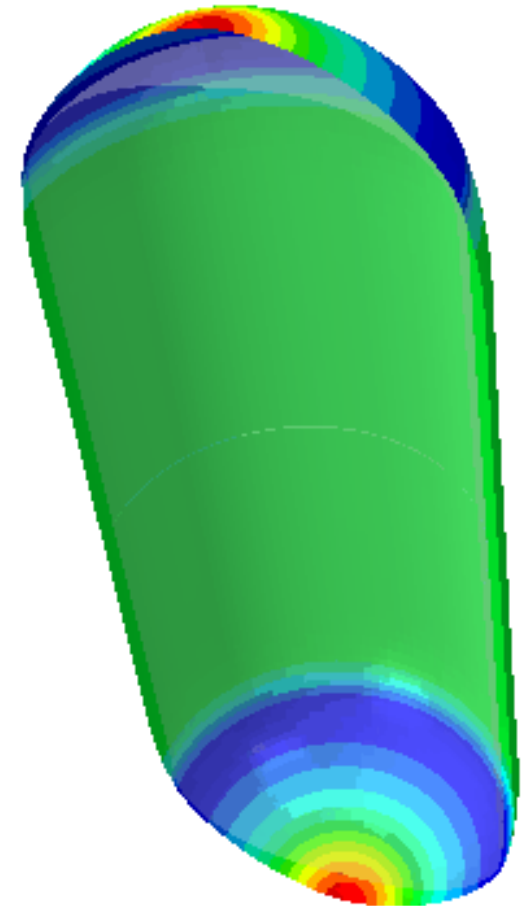
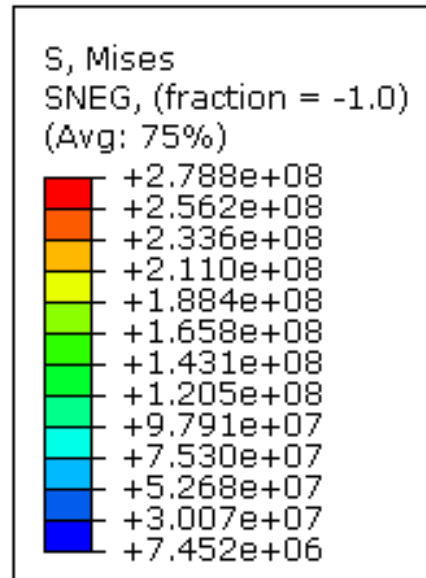
Visualisation des résultats

- ✓ On retrouve la visualisation « 3D »
- ✓ Temps de calcul complètement dérisoire!

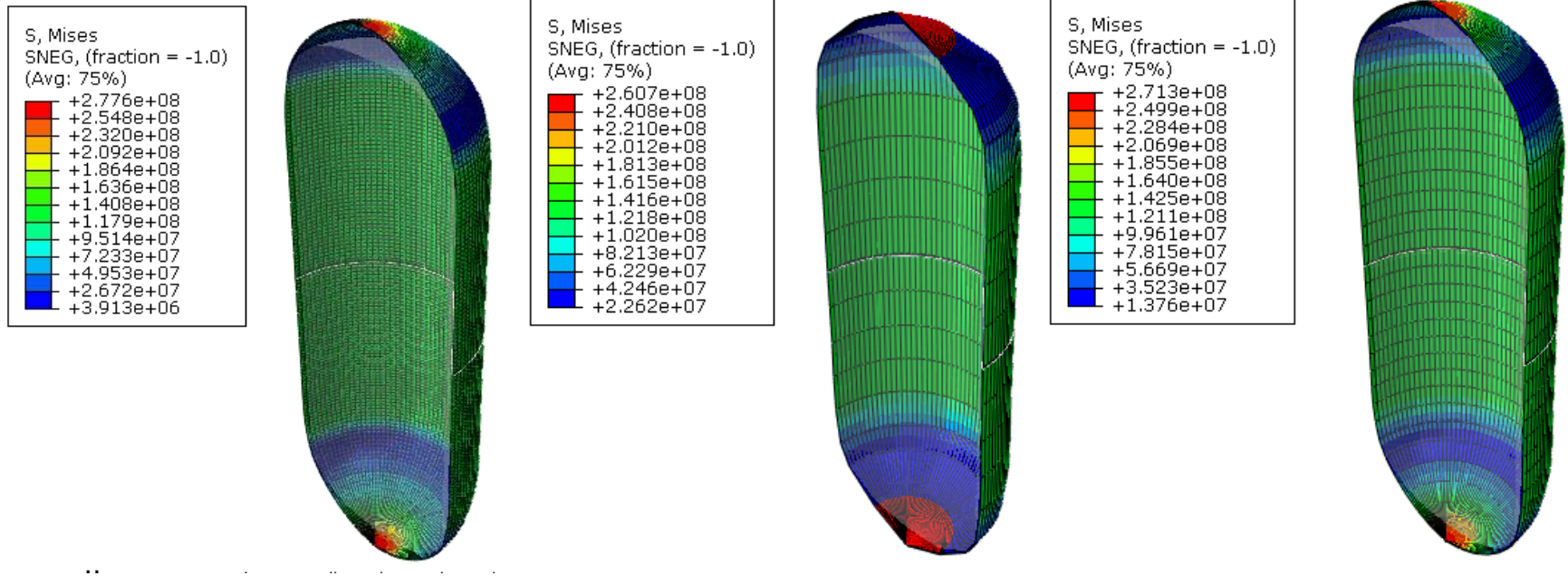
- ✓ Contraintes : quelques centaines de MPa

→ en-deca des valeurs limites pour cet acier : **OUF !!!**

- ✓ **A tester** : effet du maillage ?



Visualisation des résultats



- ✓ Différences notables dans les concentrations de contraintes
- ✓ Dans la partie centrale : pas de différence majeure

(attention : répétitions angulaires = visualisation seulement, rien à voir avec le maillage!)



Modèle axisymétrique avec revêtement

Modélisation coque composite

- ✓ Dans un premier temps: créer un nouveau matériau « acier inox » pour le revêtement
- ✓ Ensuite: remplacer la section « *shell homogeneous* » par une section « *shell composite* »
- ✓ créer l'empilement de couches
- ✓ « *orientation angle* » : peu importe, les matériaux sont isotropes !!!

Create Section ✕

Name:

Category	Type
☐ Solid	Homogeneous
☒ Shell	Composite
☐ Beam	Membrane
☐ Other	Surface
	General Shell Stiffness

Name:

Type:

Section integration: ☒ During analysis ☐ Before analysis

Layup name:

Basic **Advanced**

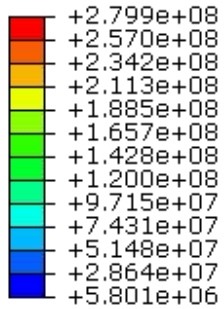
Thickness integration rule: ☒ Simpson ☐ Gauss

☐ Symmetric layers

Material	Thickness	Orientation Angle	Integration Points	Ply Name
acier	0.224	0	3	
acier-inox	0.008	0	3	

Modélisation coque composite

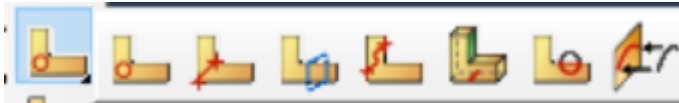
S, Mises
SNEG, (fraction = -1.0), Layer = 1
(Avg: 75%)



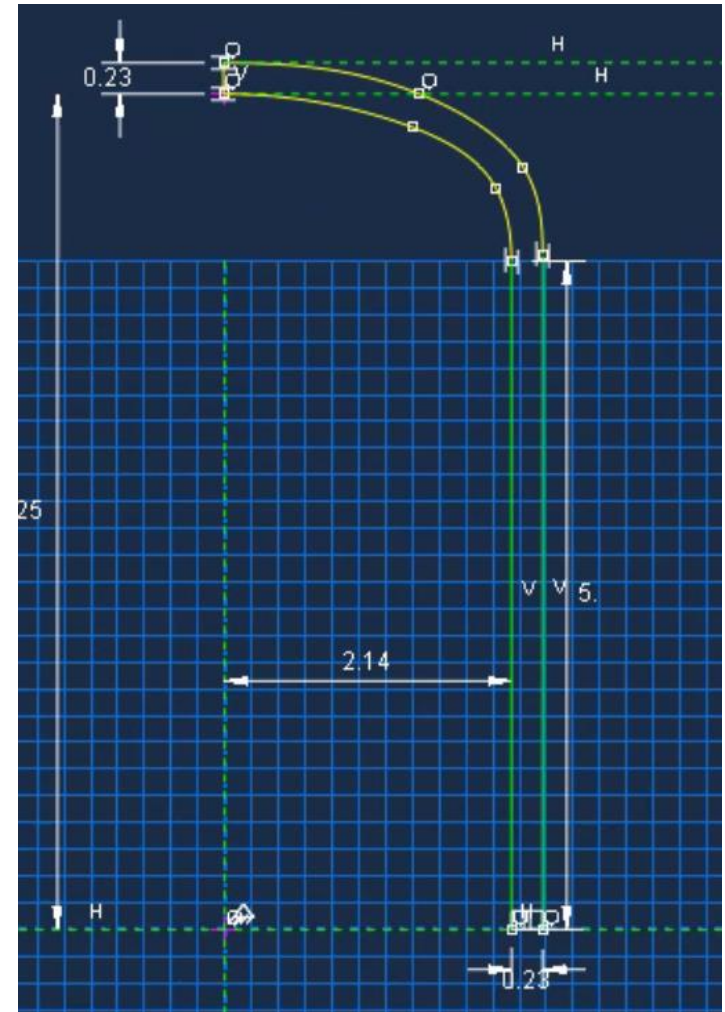
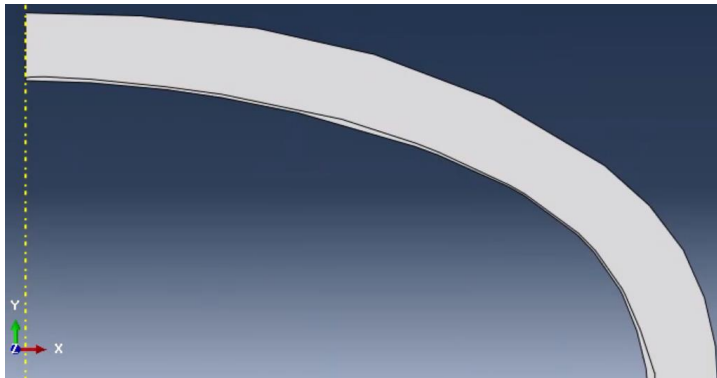
- ✓ Pas de différence notable sur la répartition des contraintes
 - ✓ En revanche : limite d'élasticité proche d'être atteinte pour le matériau de revêtement !!!!
 - ✓ Résultat non étonnant : épaisseur faible + modules d'Young très proches donc pas d'effet mécanique
 - ✓ En revanche : gros intérêt sur la durée de vie (corrosion + résistance thermique)
- ✓ Inconvénient de cette approche : on ne visualise pas explicitement les différences des contraintes dans les deux matériaux
→ impossible avec une modélisation « coque » !

Modélisation bimatériaux

- ✓ Nécessité de refaire une nouvelle pièce!
- ✓ axisymétrique, « base feature » = « shell » désormais
- ✓ Partitionner la nouvelle pièce pour faire apparaître le revêtement en acier inox

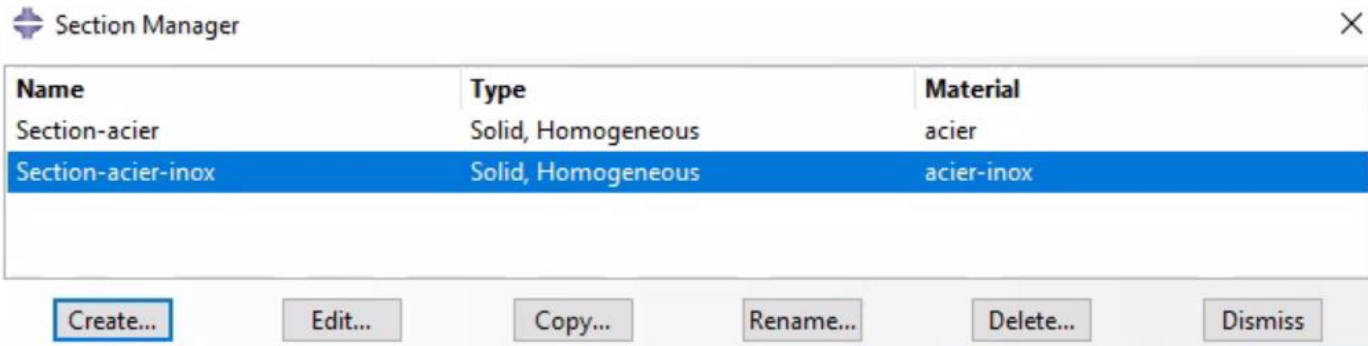


- ✓ Créer une nouvelle esquisse (approximative...) à 8mm de la surface intérieure de la cuve

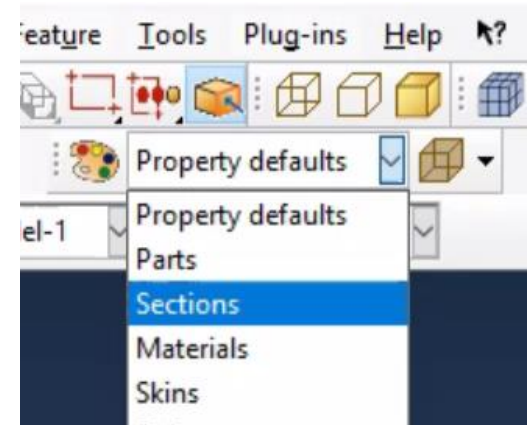
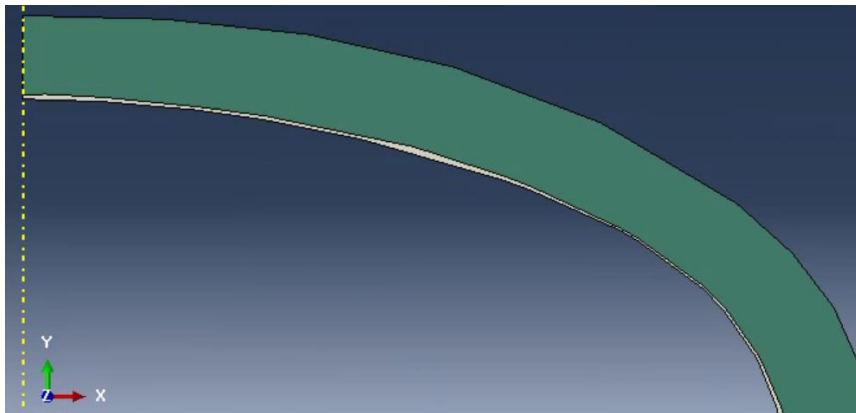


Modélisation bimatériaux

- ✓ Créer deux sections solides homogènes pour les deux matériaux



- ✓ Assigner les deux sections
- ✓ La cuve est bien composée de 2 matériaux

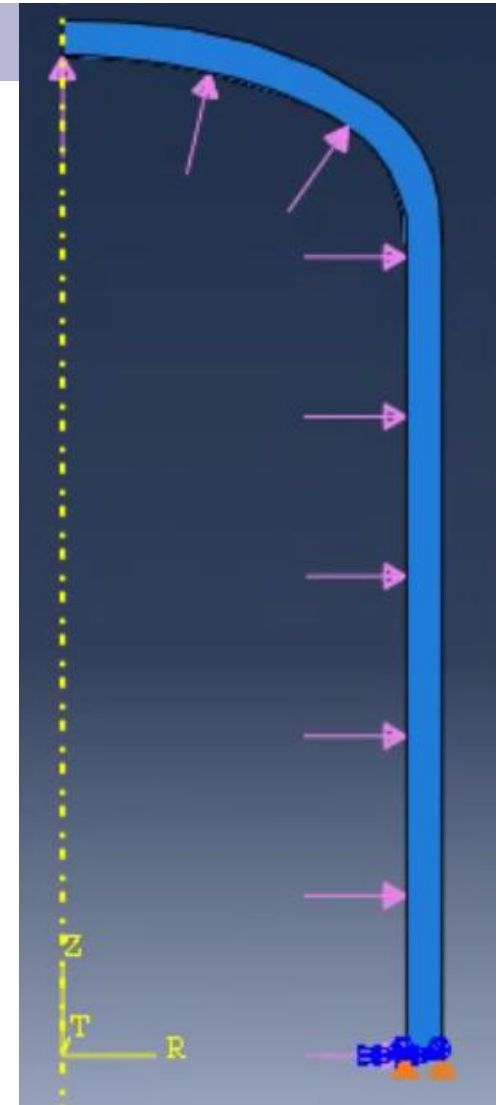
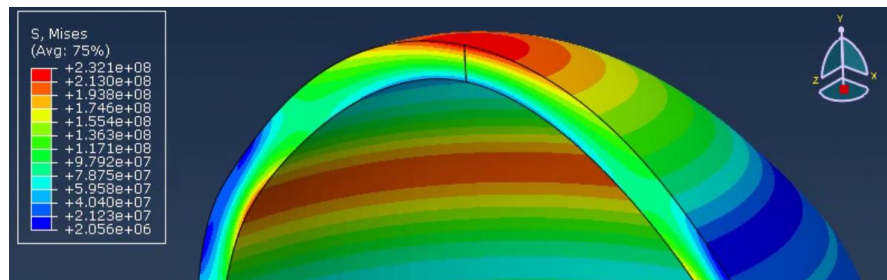


Modélisation bimatériaux

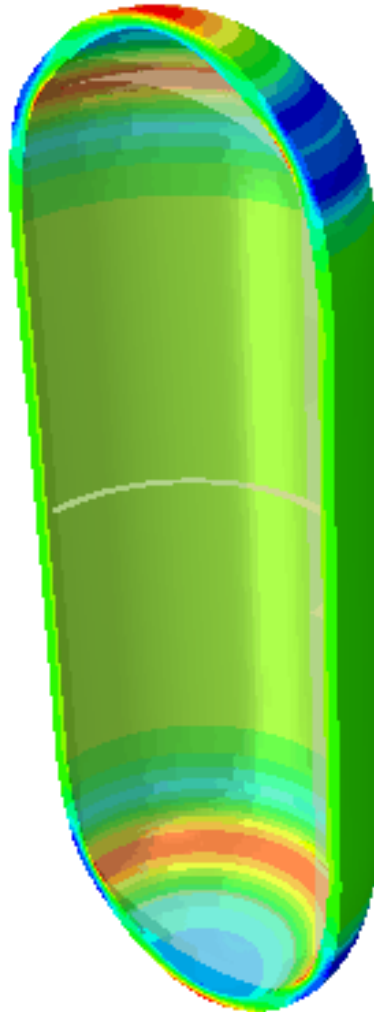
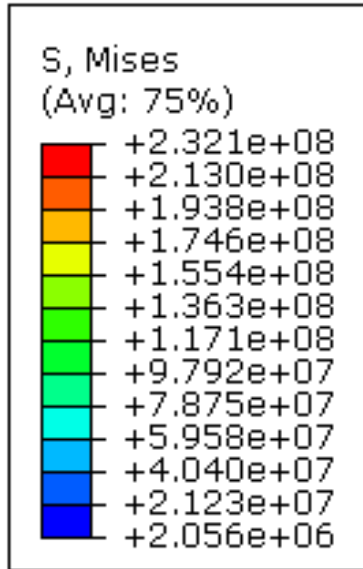
- ✓ Assemblage, conditions aux limites, step, etc...
→ idem que le cas précédent (à adapter)
- ✓ Maillage : nécessairement très fin pour pouvoir représenter dans le détail le revêtement!

79289 elements have been generated on instance: cas3-1

- ✓ Lancer le calcul : temps de calculs nécessaires également assez longs!
- ✓ Possibilité de faire un rendu 3D par révolution aussi



Modélisation bimatériaux



- ✓ Peu de différences avec les précédents résultats à première vue
- ✓ Peu d'intérêt de la modélisation dans l'épaisseur
- ✓ Pas de rôle mécanique pour le revêtement : **négligé dans toute la suite**
- ✓ **Pour aller plus loin** : il faudrait analyser localement les contraintes → inutile ici car les hypothèses sont trop grossières (pas de tubulures notamment)
→ passage à la vraie géométrie !

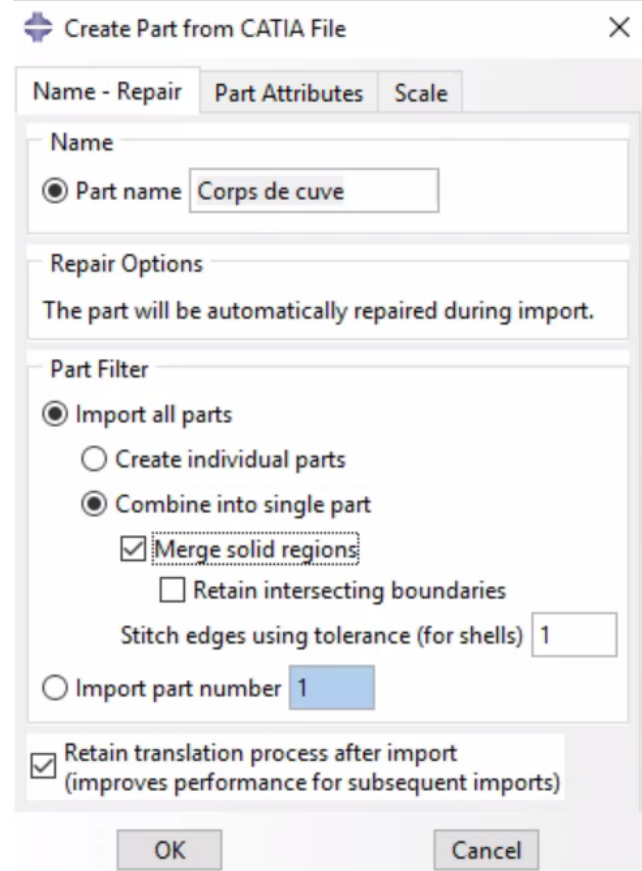
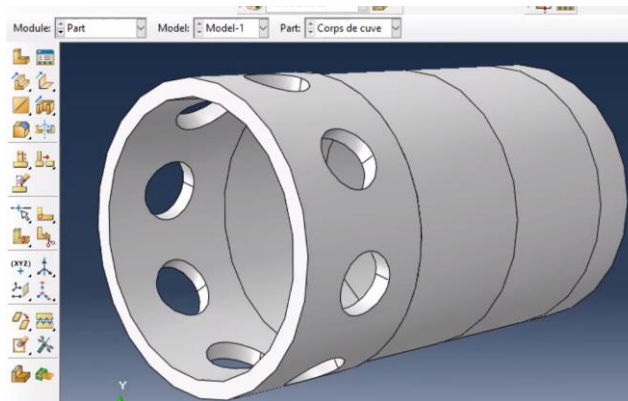


Modèle 3D à partir de la CAO

Import d'une pièce depuis Catia

- ✓ Comme dans le TP précédent : *File* → *import* → *part* → *format Catia*
- ✓ Ici on ne veut qu'une seule pièce « cuve » sans se soucier des détails de l'assemblage : « *combine into single part* » et « *merge solid regions* »
- ✓ Options d'import : ATTENTION pièce dessinée en mm sous Catia!
scale → *multiply all lengths*

- ✓ Après un certain temps de conversion :



Création du modèle

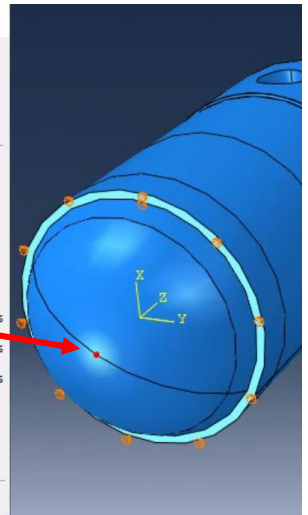
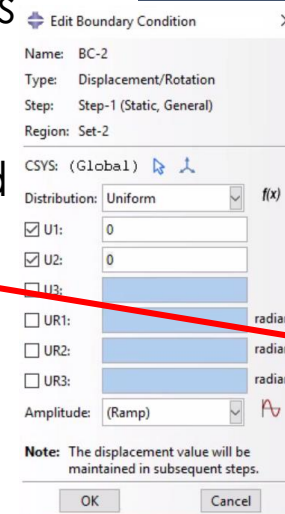
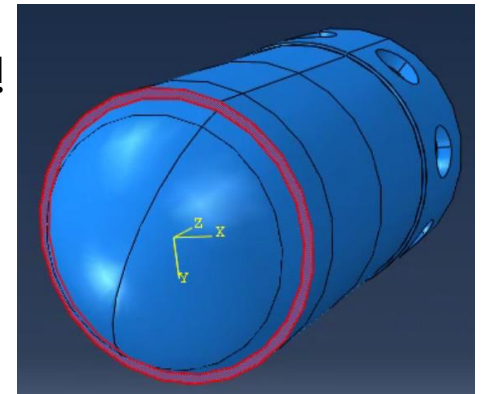
- ✓ Créer un seul matériau « acier », une section « solide », un assemblage, un « step »
- ✓ Conditions aux limites : plus de symétrie désormais !
- ✓ Hypothèse : cuve posée sur la surface plane au-dessus de la calotte de fond de cuve

= déplacement vertical nul sur cette face

- ✓ Il faut encore bloquer le mouvement de corps rigide dans les autres directions !

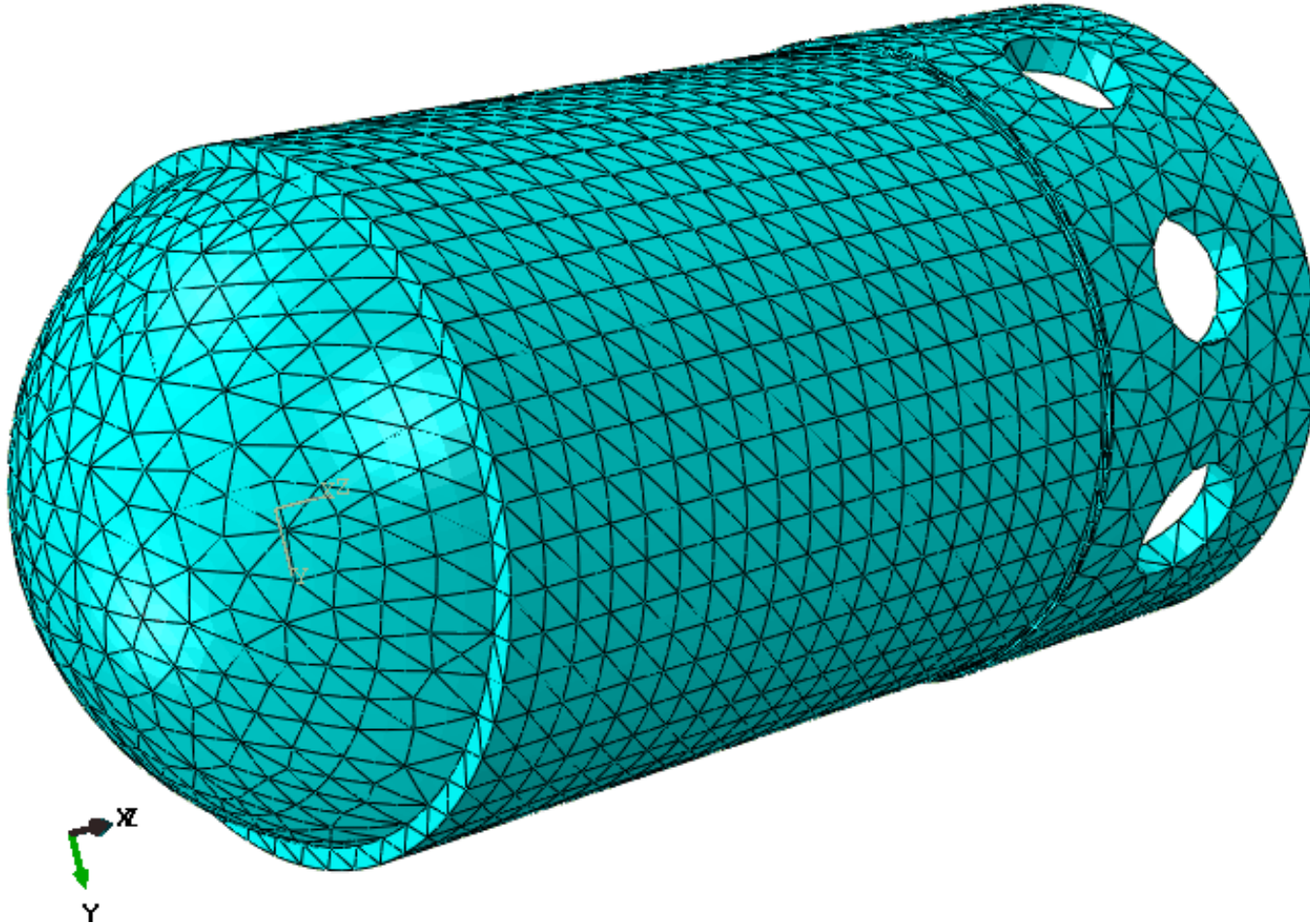
Exemple de solution : bloquer le point en fond de cuve dans les directions X et Y

- ✓ Appliquer la même pression de 155bars sur toute la surface interne



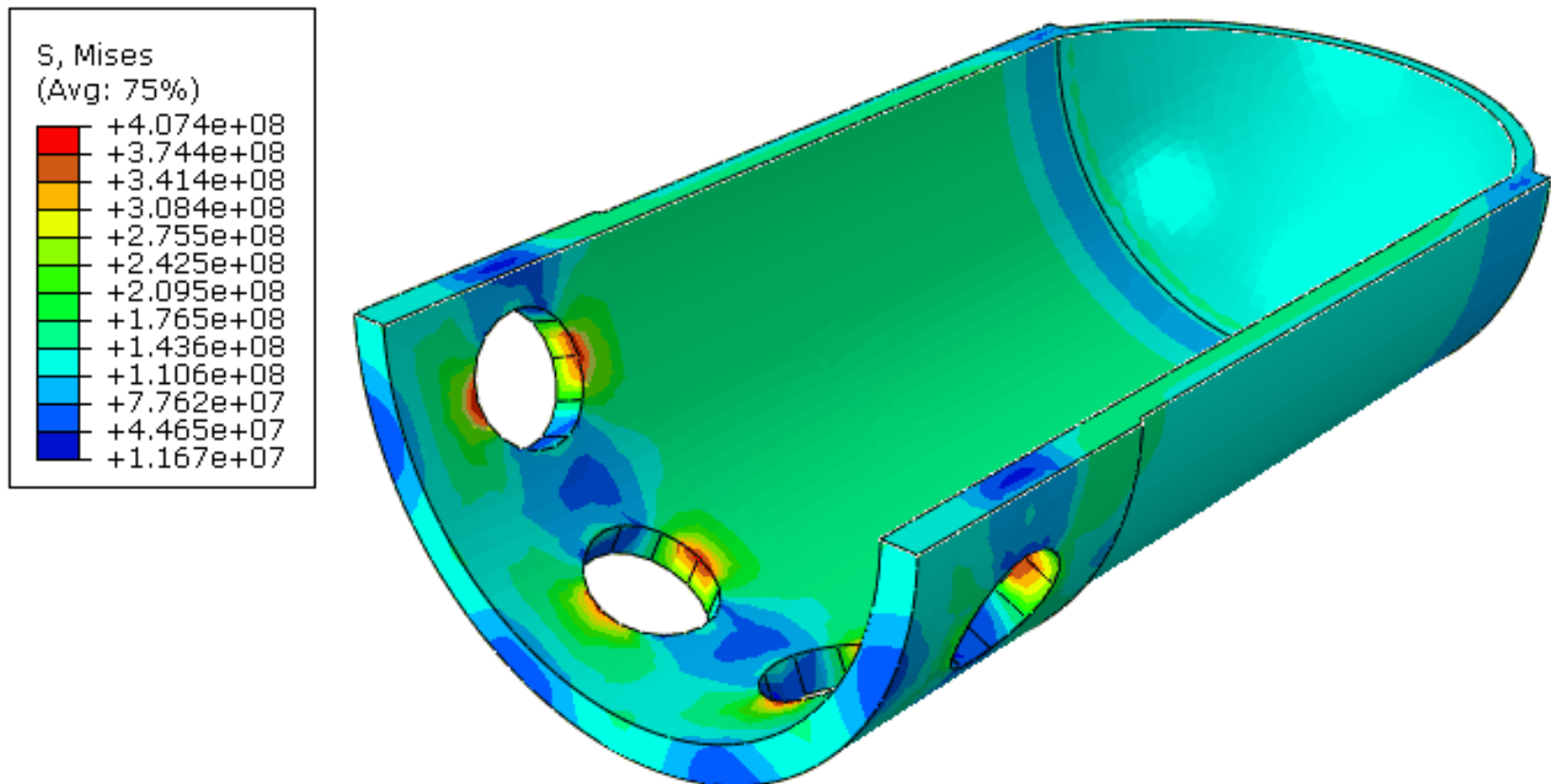
Maillage et visualisation des résultats

- ✓ Exemple de maillage adapté



Maillage et visualisation des résultats

- ✓ Visualisation des contraintes (pour la vue en coupe : )



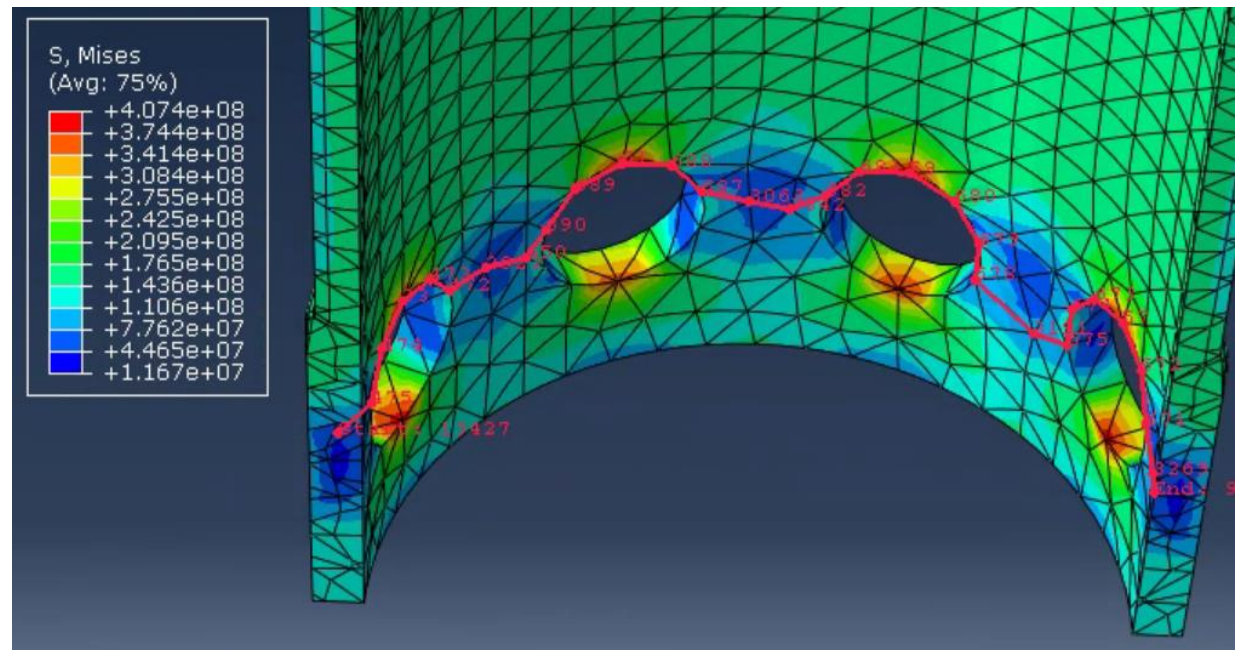
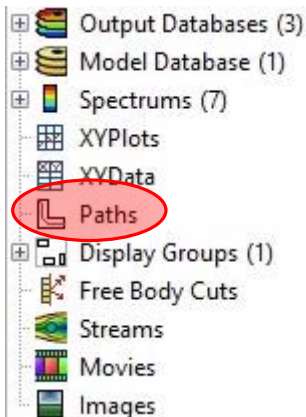


Facteur de sécurité

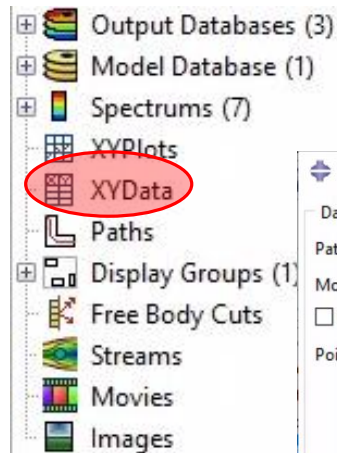
Analyse des contraintes

Tracé de courbes

- ✓ Jusqu'ici : visualisation « qualitative » des contraintes de Von Mises dans toute la structure
- ✓ Répartition précise ? Concentrations de contraintes ?
- ✓ *Paths* → *Node list* → *Add after* → Choisir des nœuds le long de la cuve

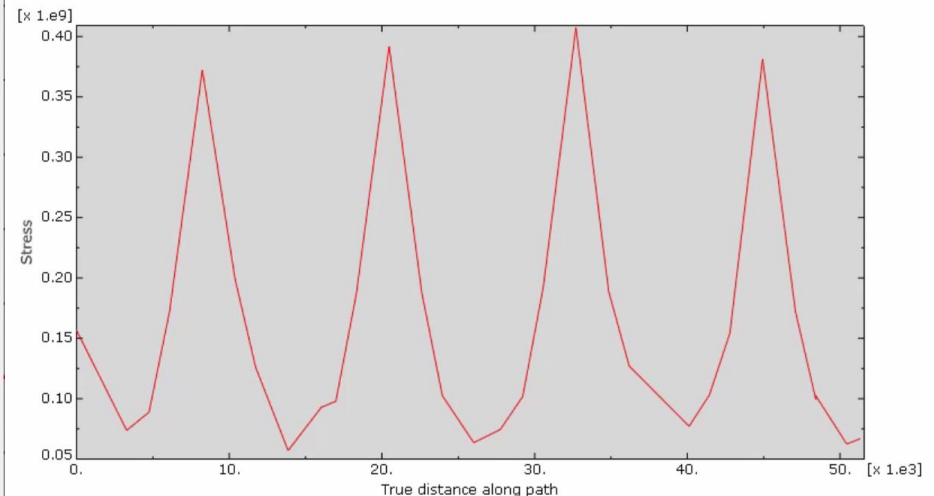
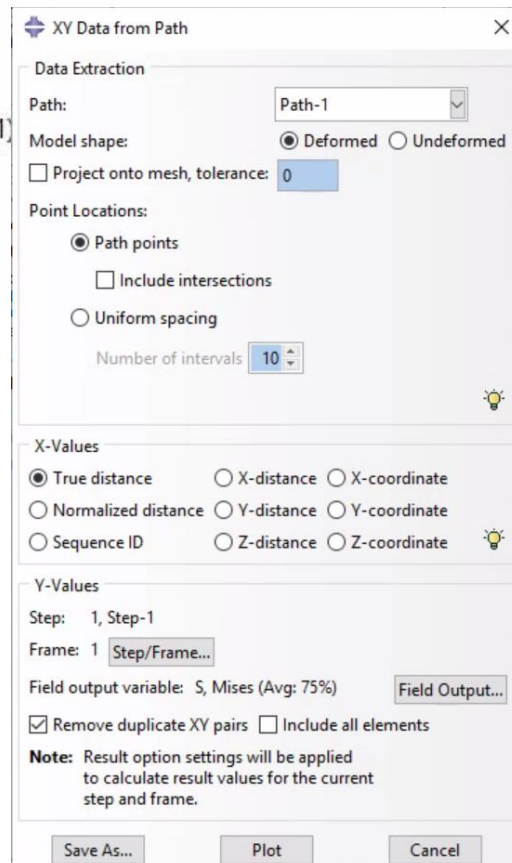


Tracé de courbes



✓ *XYData* → *Path* → *plot*

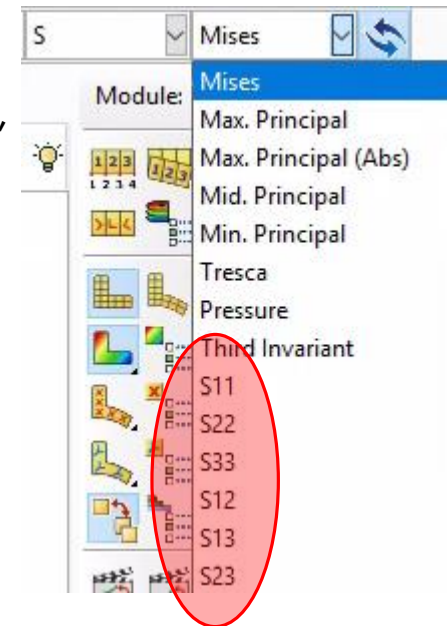
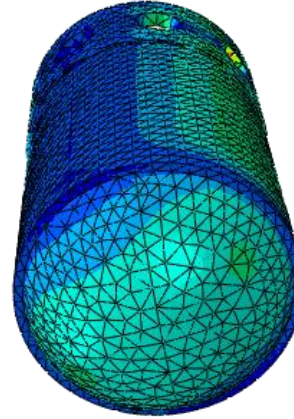
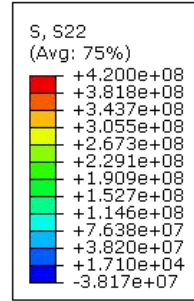
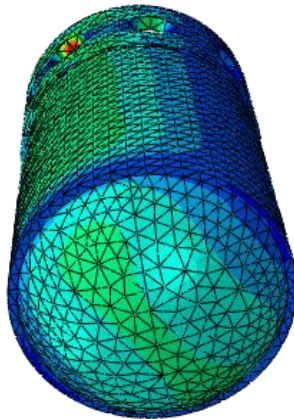
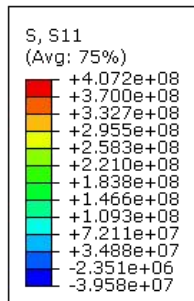
= visualiser un champ (ici la contrainte de Von Mises)
le long du « *path* » chemin



évolution de la contrainte au
bord des tubulures

Analyse des contraintes en coordonnées cylindriques

- ✓ Par défaut : le système de coordonnées est le système global cartésien → les contraintes S_{11} , S_{22} , S_{33} n'ont pas de sens ici pour un problème axisymétrique !

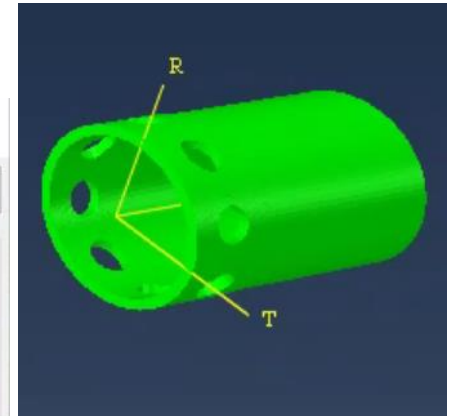
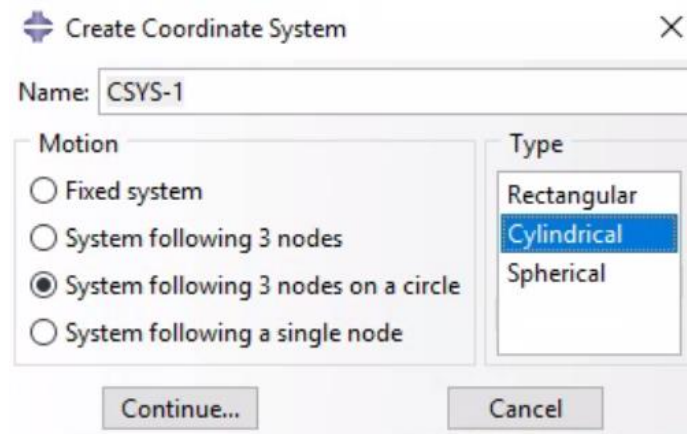


- ✓ Rupture de la symétrie de révolution
- ✓ Pas d'interprétation possible des contraintes prises séparément
- ✓ Changement de système de coordonnées ?

Analyse des contraintes en coordonnées cylindriques

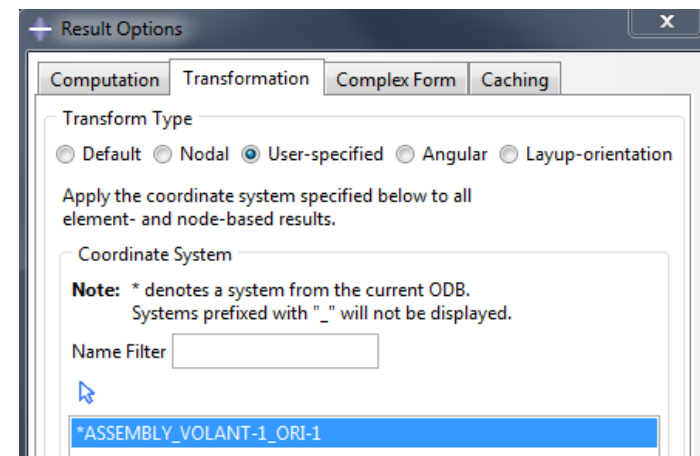
✓ Tools → coordinate system → create

✓ Sélectionner 3 nœuds sur une arête circulaire

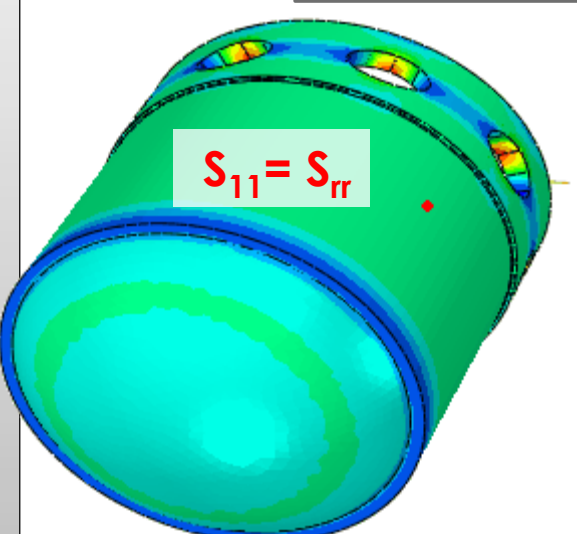


✓ Transformer les résultats dans ce repère

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

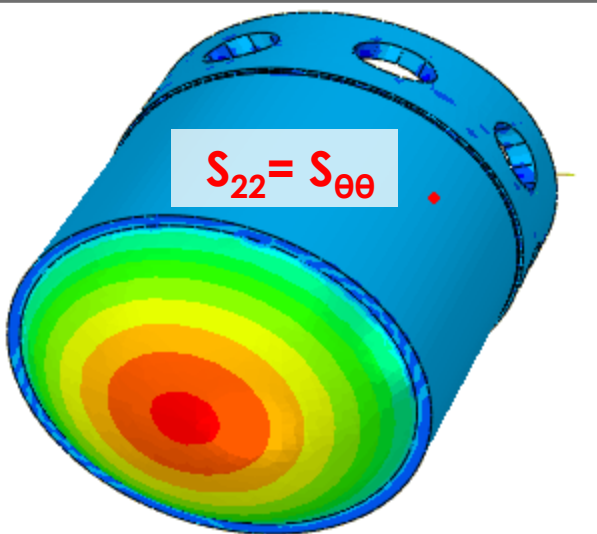


Analyse des contraintes



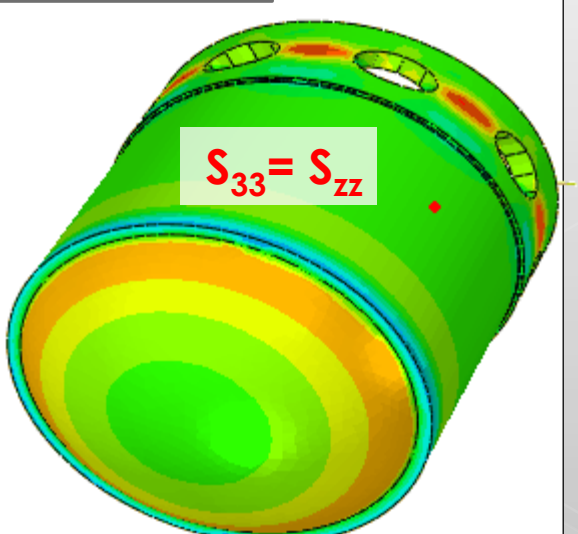
$S_{11} = S_{rr}$

A 3D visualization of the radial stress component $S_{11} = S_{rr}$ on a cylindrical shell. The plot shows concentric rings of color, with blue at the inner radius and transitioning through green and yellow to red at the outer radius, indicating a maximum stress at the outer boundary.



$S_{22} = S_{\theta\theta}$

A 3D visualization of the circumferential stress component $S_{22} = S_{\theta\theta}$ on a cylindrical shell. The plot shows concentric rings of color, with a red center indicating a maximum stress at the inner radius, transitioning through yellow and green to blue at the outer radius.

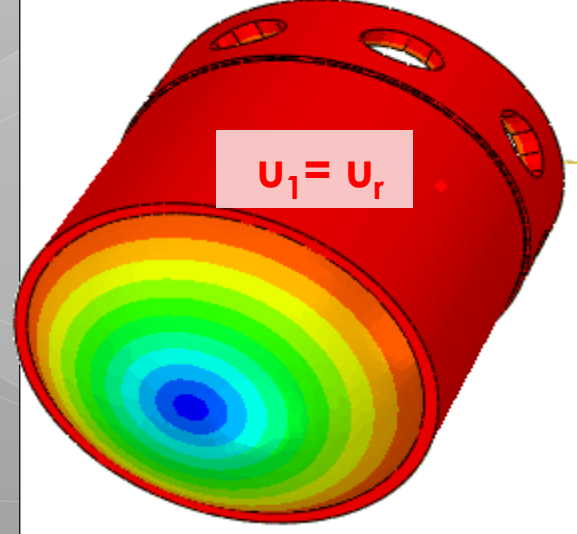


$S_{33} = S_{zz}$

A 3D visualization of the axial stress component $S_{33} = S_{zz}$ on a cylindrical shell. The plot shows concentric rings of color, with a red center indicating a maximum stress at the inner radius, transitioning through yellow and green to blue at the outer radius.

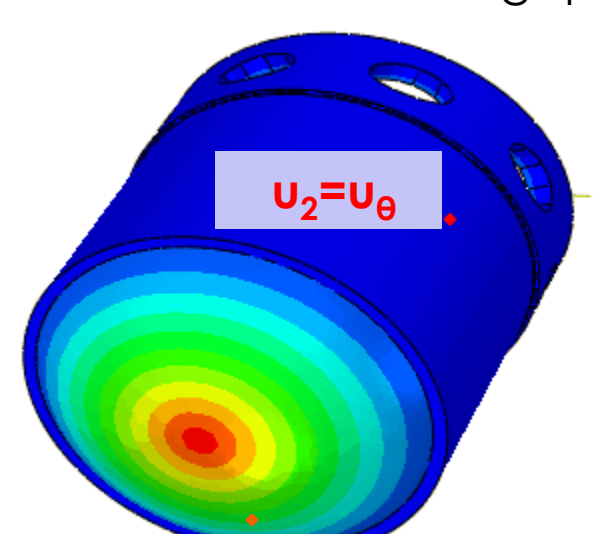
IMPORTANT : analyser chacune de ces composantes

→ Sont-elles cohérentes et logiques ???



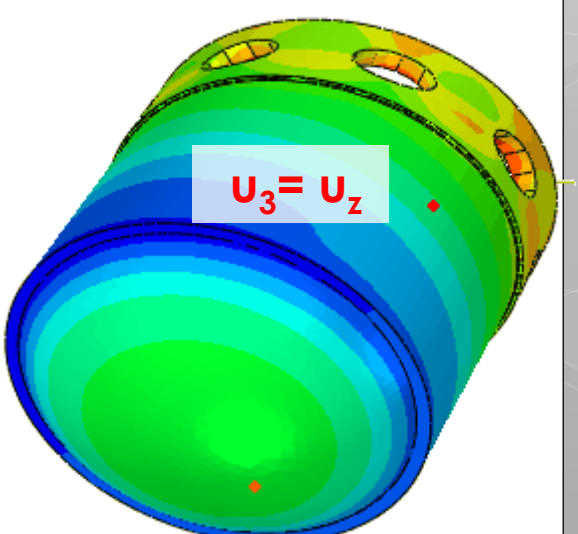
$U_1 = U_r$

A 3D visualization of the radial displacement component $U_1 = U_r$ on a cylindrical shell. The plot shows concentric rings of color, with a red center indicating a maximum displacement at the inner radius, transitioning through yellow and green to blue at the outer radius.



$U_2 = U_{\theta}$

A 3D visualization of the circumferential displacement component $U_2 = U_{\theta}$ on a cylindrical shell. The plot shows concentric rings of color, with a red center indicating a maximum displacement at the inner radius, transitioning through yellow and green to blue at the outer radius.

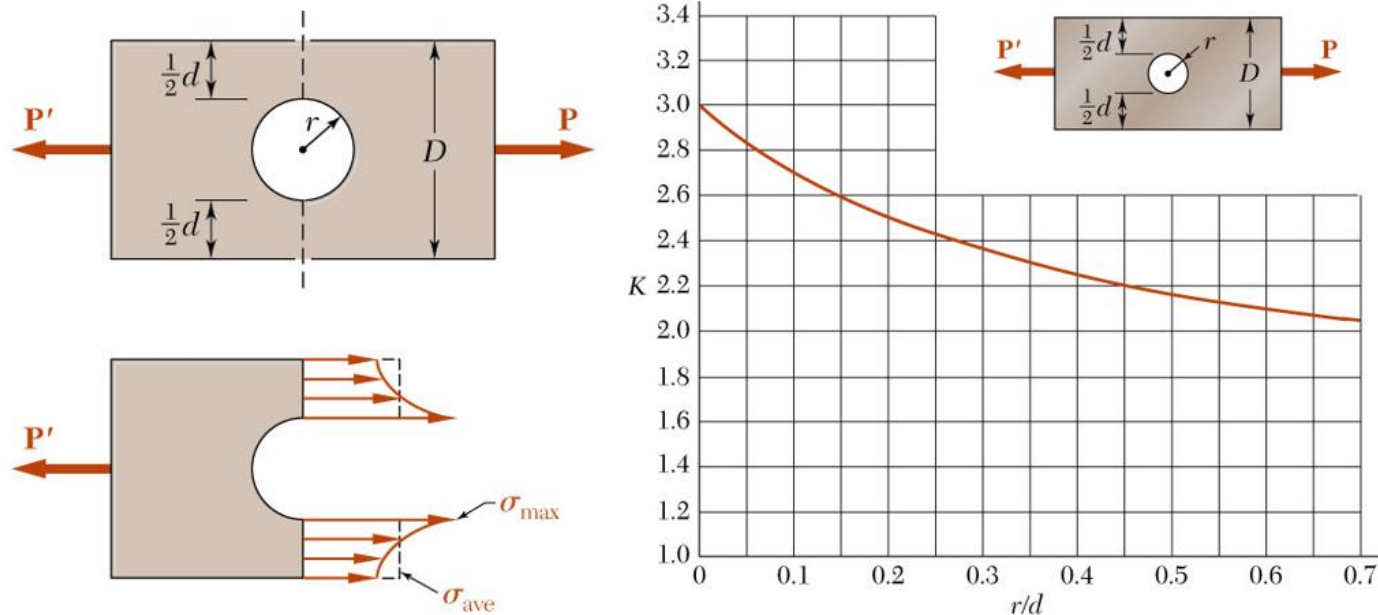


$U_3 = U_z$

A 3D visualization of the axial displacement component $U_3 = U_z$ on a cylindrical shell. The plot shows concentric rings of color, with a red center indicating a maximum displacement at the inner radius, transitioning through yellow and green to blue at the outer radius.

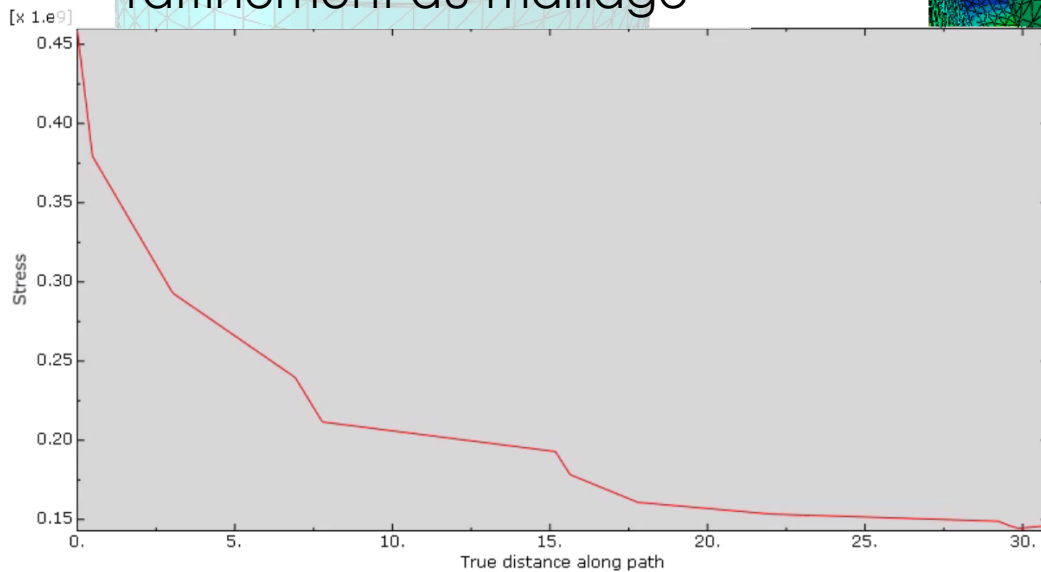
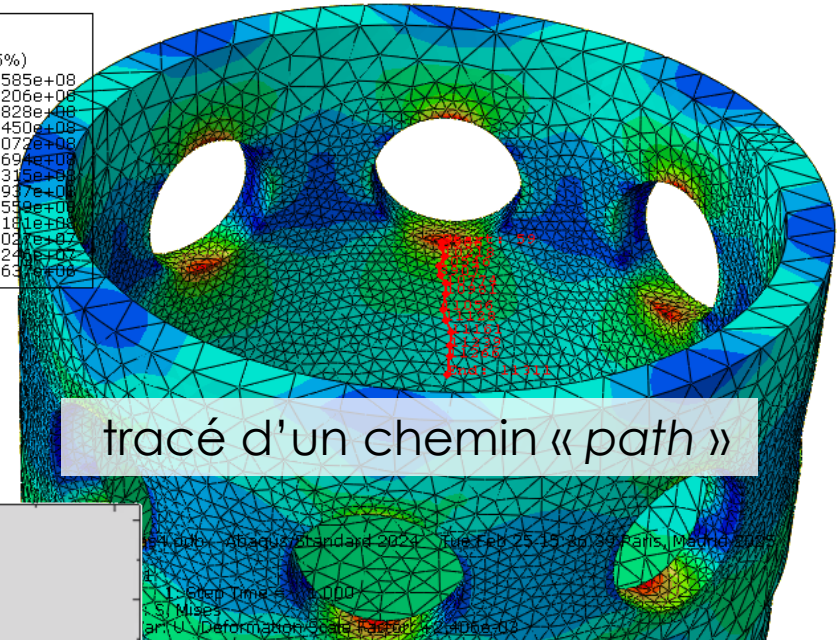
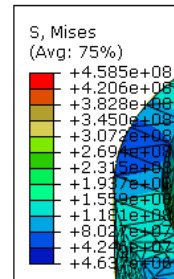
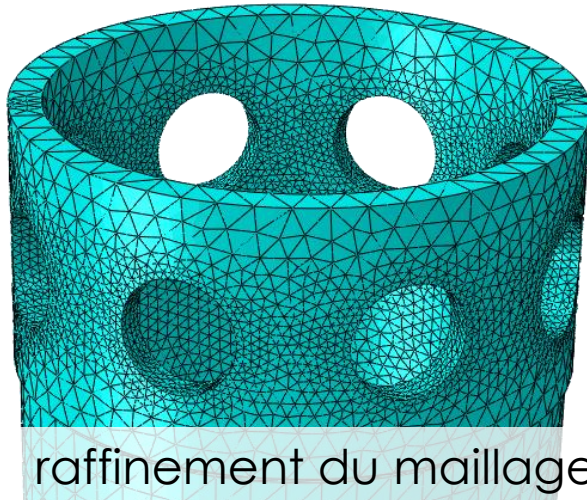
Facteur de concentration de contraintes

- ✓ Valeur connue analytiquement (voir cours de 3A!) : facteur de concentration de contraintes $K=3$ aux abords d'un trou
= contrainte max au bord du trou / contrainte mini loin du trou



- ✓ Trouve-t-on des valeurs similaires au sein de la cuve ?

Facteur de concentration de contraintes



$$S_{\max} / S_{\min} = K = 3$$

A retenir aujourd'hui

- ✓ Importance des hypothèses de modélisation
- ✓ Axisymétrique versus 3D
- ✓ Choix des éléments coques / 3D
- ✓ Composite sandwich
- ✓ Import d'assemblages depuis Catia
- ✓ Analyse des contraintes

