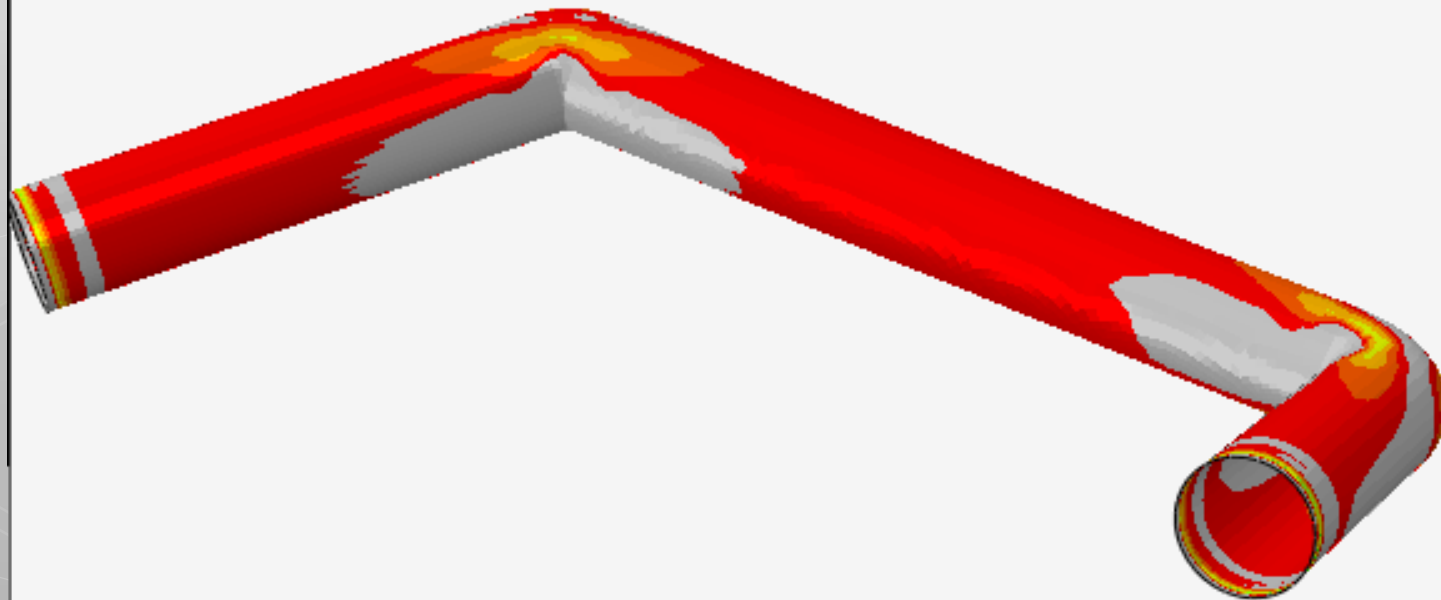


TP3 : Comportement mécanique de la tuyauterie sous solicitations



TP3 : Tuyauterie

1

Contexte de l'étude

2

Hypothèses de modélisation

3

Modèle élastique

4

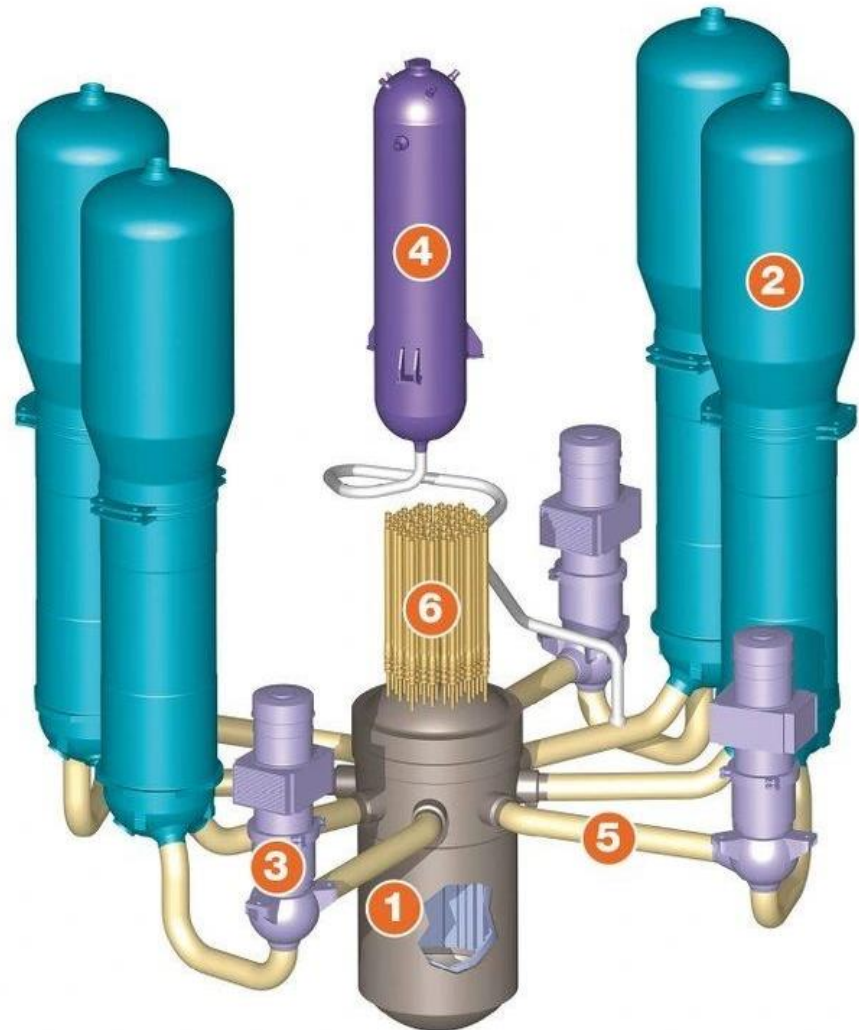
Modèle élastoplastique



Contexte de l'étude

Les tuyauteries primaires

- 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.



Les tuyauteries primaires

- ✓ élément **critique** de la sécurité d'une centrale au même titre que la cuve
- ✓ sollicitations complexes et multiphysiques : forte pression + corrosion + hautes températures + irradiation
→ choix du matériaux et dimensionnement primordiaux !!!
- ✓ fragilités aux soudures des coudes
→ apparition de microfissures
(qui peuvent être détectées par contrôle non destructif, voir cours de 3A)
→ en 2021 : arrêt complet de plusieurs tranches suite à des anomalies



Figure 14 – Faïençage thermique détecté par ressuage (coude d'une tuyauterie d'injection de sécurité)

<https://www.sfen.org/rgn/edf-face-au-phenomene-de-corrosion-sous-contrainte/>

- **Question 1** : épaisseur minimale (en ne considérant que la pression)
- **Question 2** : qu'arrive-t-il lors de chargements cycliques excessifs ?



Hypothèses de modélisation

Hypothèses de modélisation

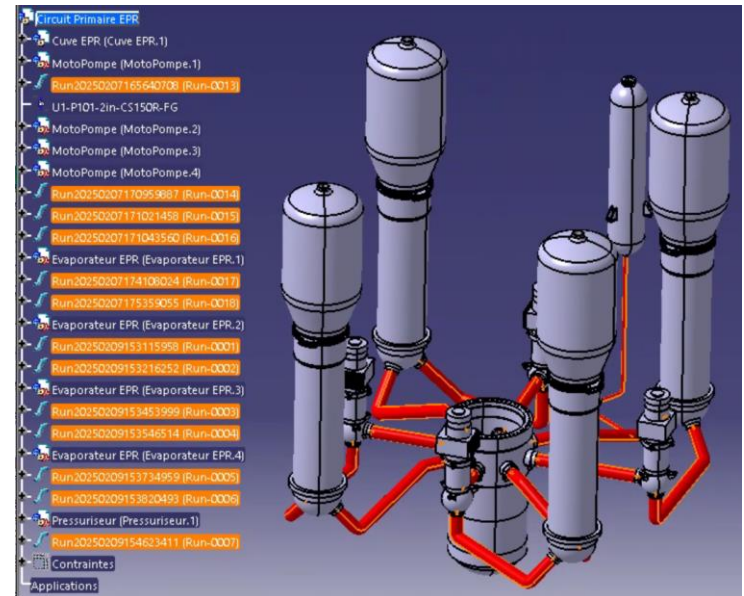
- ✓ fonctionnement normal : ensemble du circuit primaire soumis à une pression de **155 bars à ~300°C**
- ✓ tuyauterie en acier inoxydable
- ✓ **Matériau constitutif des tuyaux:**
acier austénitique 304L 18 %Cr-10 %Ni

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

$$\nu=0.3$$

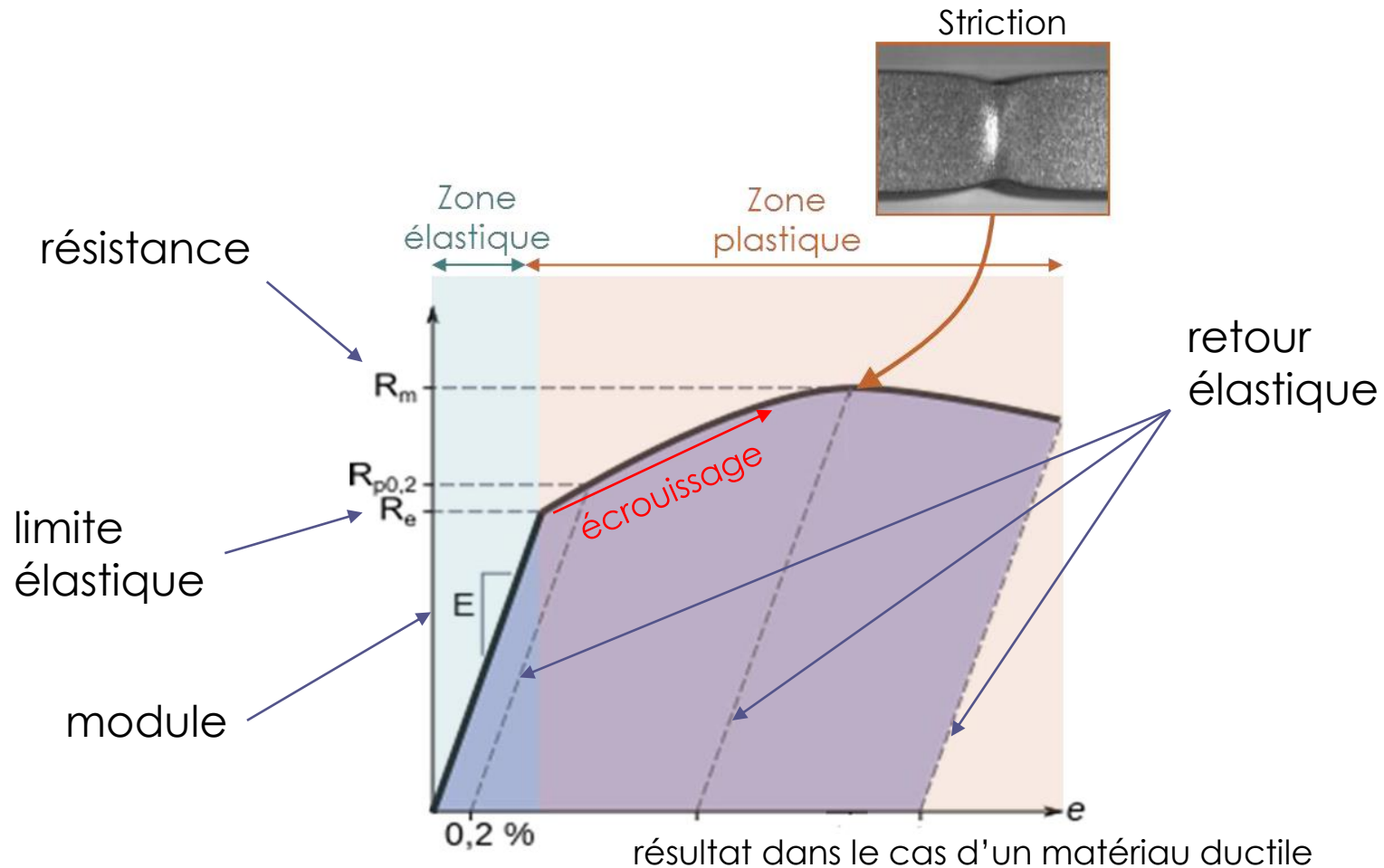
$$Re = 210 \text{ MPa}$$

- ✓ tuyau issu de la CAO du circuit primaire
- ✓ représentés par leur surface moyenne + éléments coques
- ✓ on considère un **comportement élasto-plastique** en entrant une loi d'écrouissage : **késako ?**

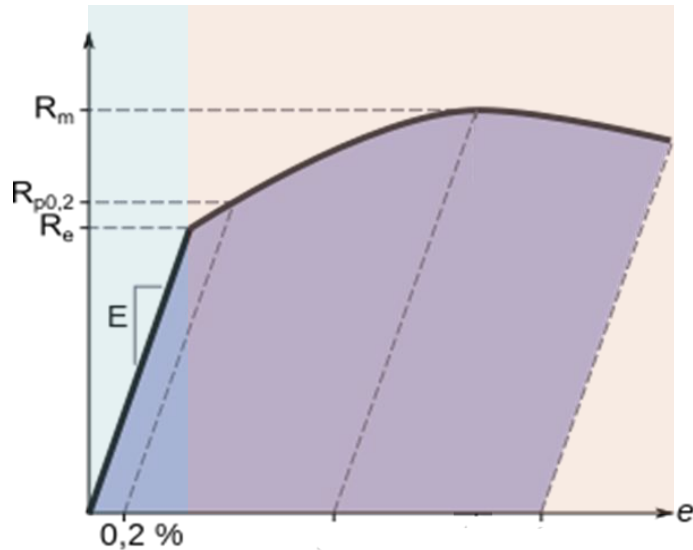


Le comportement élastoplastique

- ✓ Essai de traction sur un matériau élasto-plastique → **écrouissage**



Le comportement élastoplastique



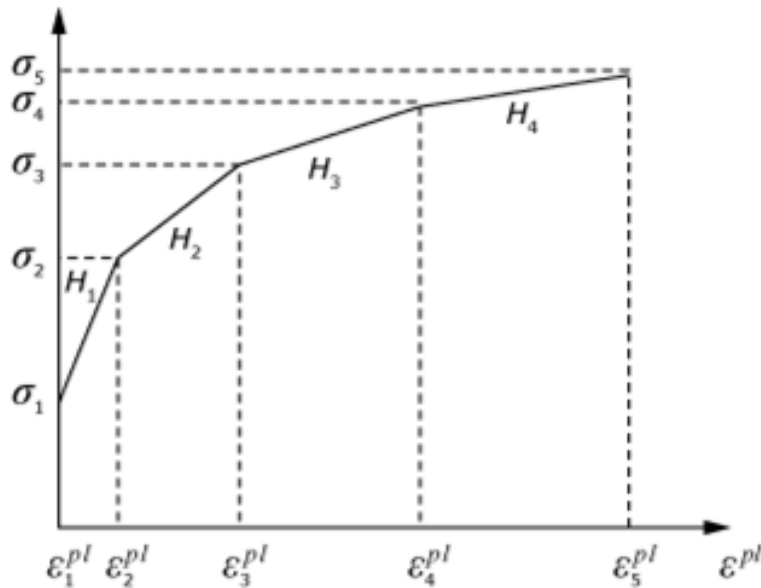
- Déformation irréversible
- Résultat de glissements intercristallins
- L'effort croît dans la zone plastique
= augmentation de la densité de dislocation
= augmentation apparente de la limite d'élasticité!

Ecrouissage « hardening »

augmentation de la limite élastique sous l'effet d'une déformation plastique

- Abaqus : il est possible de rentrer **point par point** la courbe d'écrouissage
= évolution de la déformation **plastique** en fonction de la contrainte (à partir de limite d'élasticité)

Le comportement élastoplastique



Contrainte au sens du critère de Von Mises

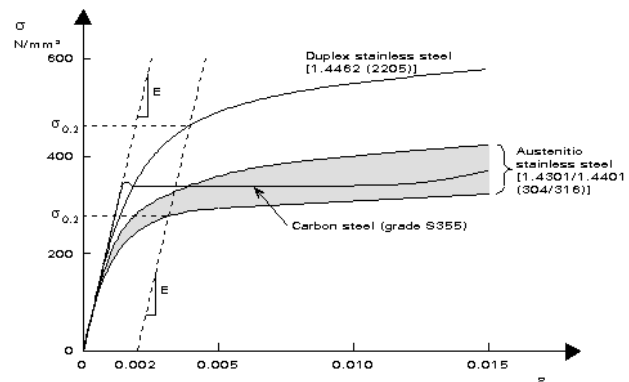


Yield Stress	Plastic Strain
200.	0.
300.	.0085

→ On peut reprendre des courbes issues de la littérature scientifique point par point pour identifier les valeurs

→ Exemple d'appli en ligne ici :

<https://web.eecs.utk.edu/~dcostine/personal/PowerDeviceLib/DigiTest/index.html>

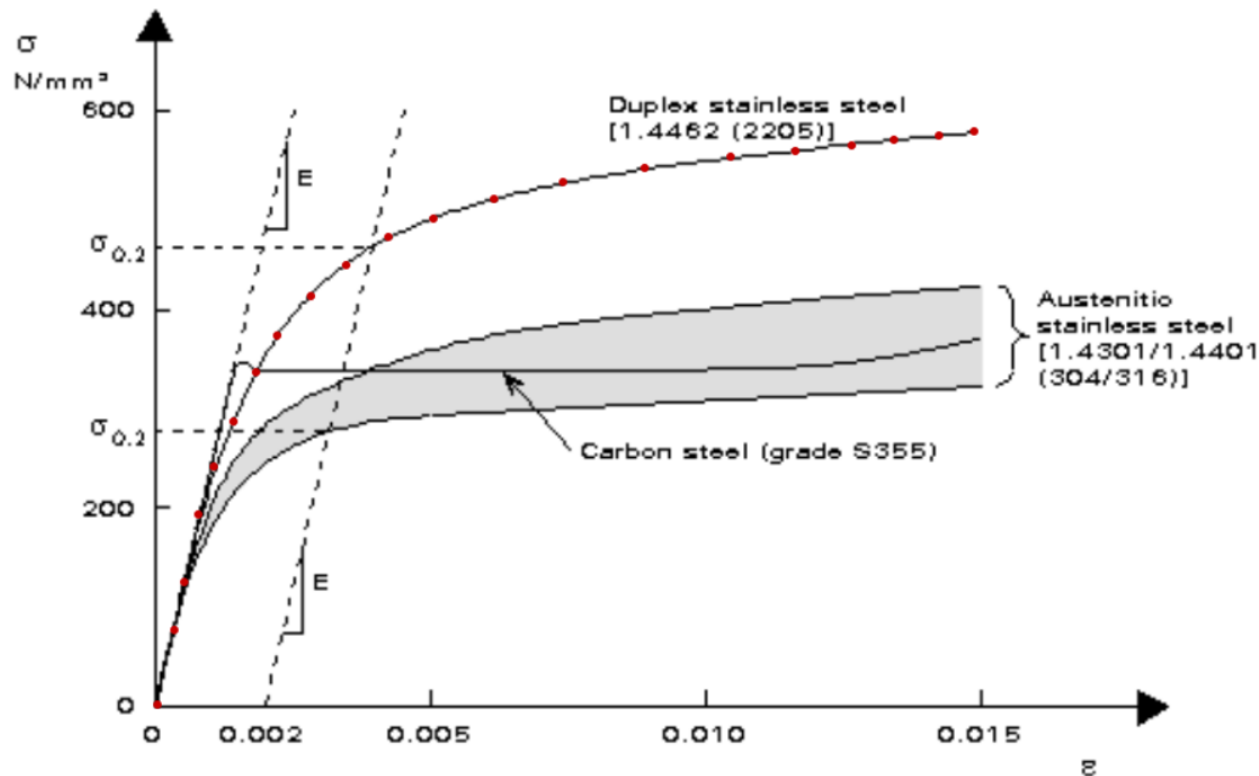


Typical stress-strain curves for stainless steel and carbon steel

($\sigma_{0.2}$ is the 0.2% proof strength, E is Young's modulus)

Note: These values are typical experimental values and should not be used in design. For grades 1.4301 (304) and 1.4401 (316) steels, the two curves shown indicate the extreme values from a series of tests and thus they represent a scatter band.

Le comportement élastoplastique



contrainte (MPa)	Déformation plastique
200	0
242	0,0003
287	0,0007
337	0,0011
374	0,0015
413	0,0021
445	0,0027
473	0,0035
491	0,0043
511	0,0054
528	0,0067
542	0,0081
553	0,0097
559	0,0109
564	0,0127
570	0,0135
574	0,01353
578	0,0142

→ Données disponibles dans le fichier *hardening_stainless_steel.xlsx*



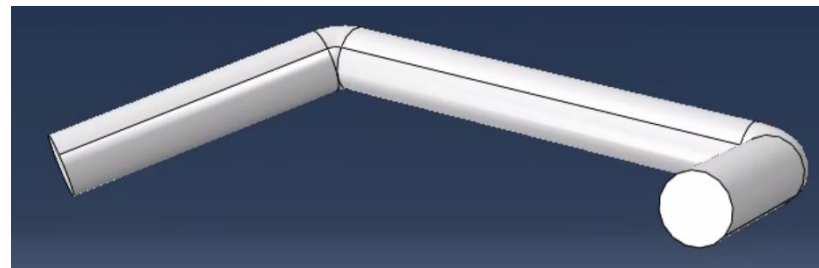
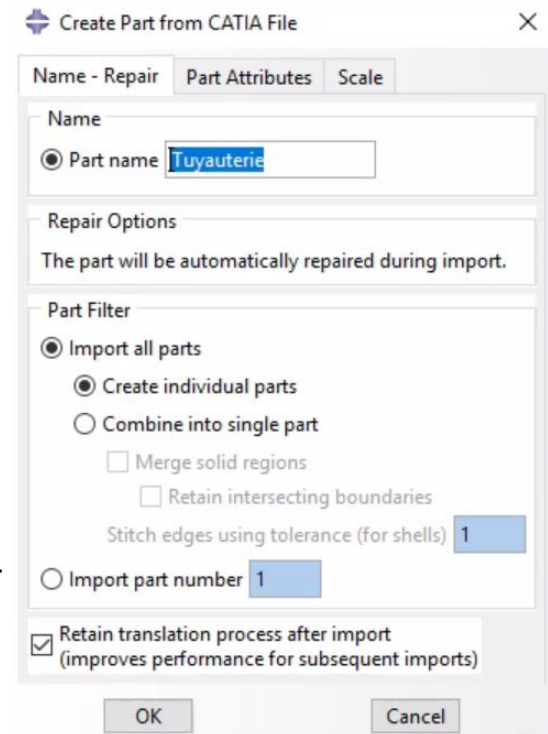
Modèle élastique

Création du modèle

- ✓ File → import part → *Tuyauterie.CatProduct*
- ✓ Contient toute la tuyauterie de l'assemblage Catia
- ✓ On veut importer les pièces séparément pour pouvoir ensuite n'en garder qu'une
- ✓ Ne pas oublier la conversion mm → m !

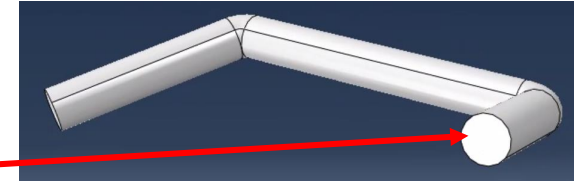


- ✓ 9 pièces sont importées en tout
- ✓ N'en gardez qu'une seule (clic droit → delete)
→ la première par exemple



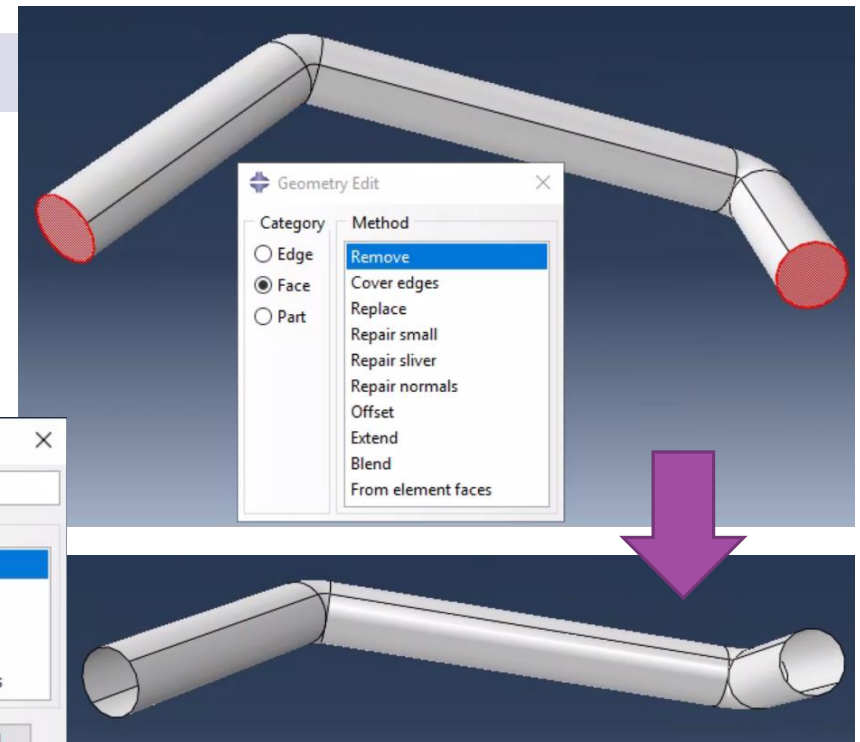
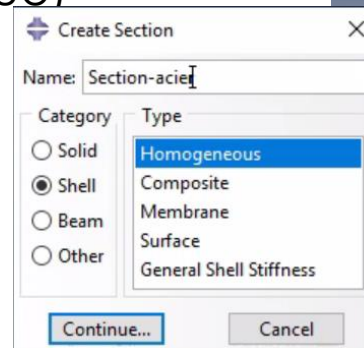
Création du modèle

- ✓ Les tuyaux sont « fermés »
→ on ne veut regarder que la paroi latérale
→ supprimer les deux surfaces aux extrémités
- ✓ Tool → geometry edit → Face → Remove



Matériaux / sections

- ✓ Créer le matériau « inox » : propriétés élastiques
- ✓ section « shell » (coque) homogène
- ✓ épaisseur = ???
hypothèse : **5mm**
- ✓ assigner la section



Création du modèle

Assemblage

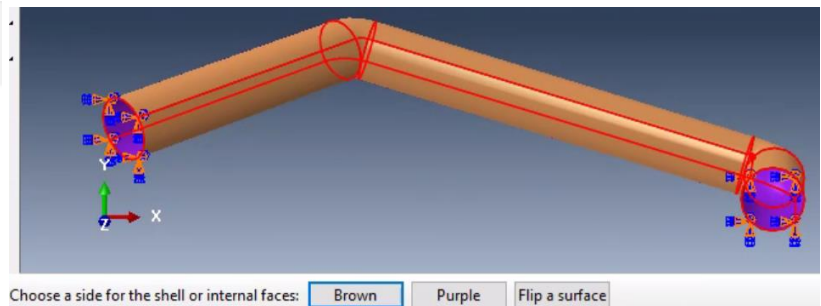
- ✓ Comme d'habitude

Step

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

Loads (conditions aux limites)

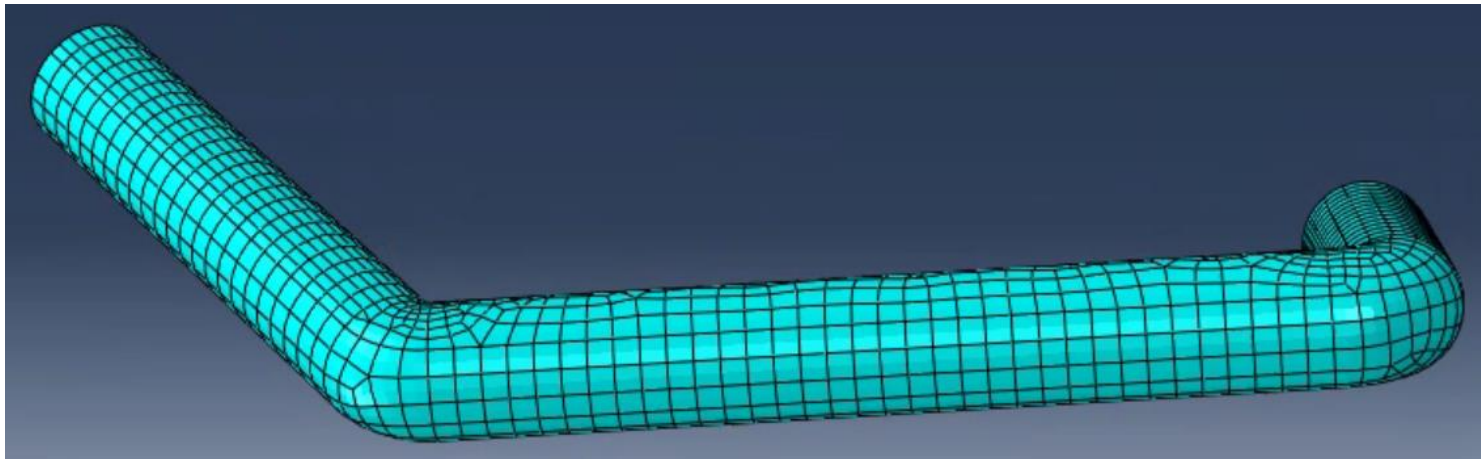
- ✓ pression de 155 bars à l'intérieur (attention aux unités!)
- ✓ Aide : faire des coupes pour affecter la pression à l'intérieur
- ✓ Bien choisir la surface intérieure (exemple : violet ici)
- ✓ hypothèses : deux extrémités encastrees



Création du modèle

Maillage

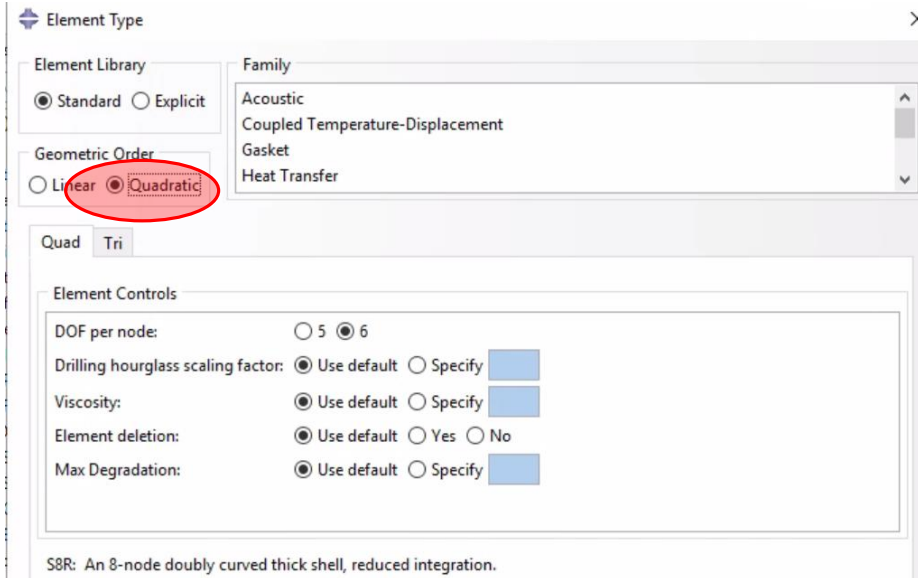
- ✓ On peut s'attendre à des concentrations de contraintes au niveau des « coudes »
→ possibilité de densifier aux endroits d'intérêt
- ✓ Exemple de maillage par défaut



- ✓ Pour éviter les problèmes par la suite : éléments « quadratiques »
→ changer le type d'éléments :



Création du modèle

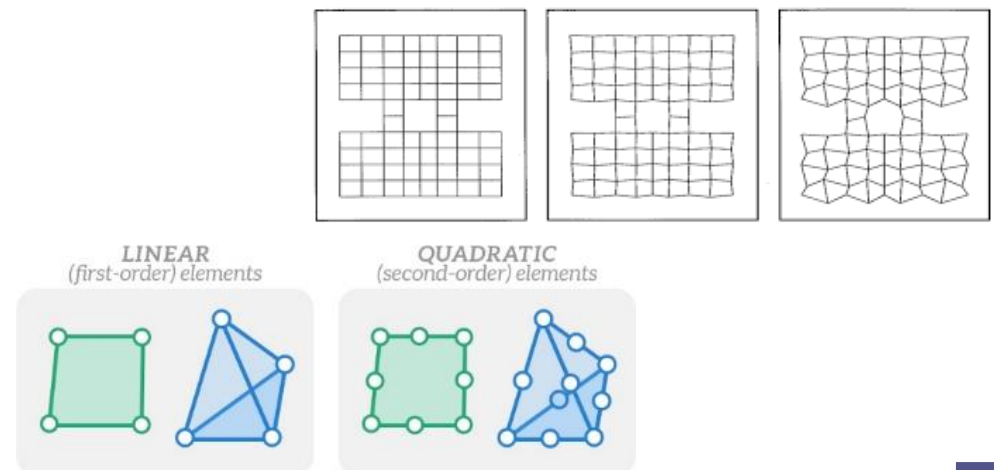


✓ Éléments quadratiques : le mode « hourglass » est évité

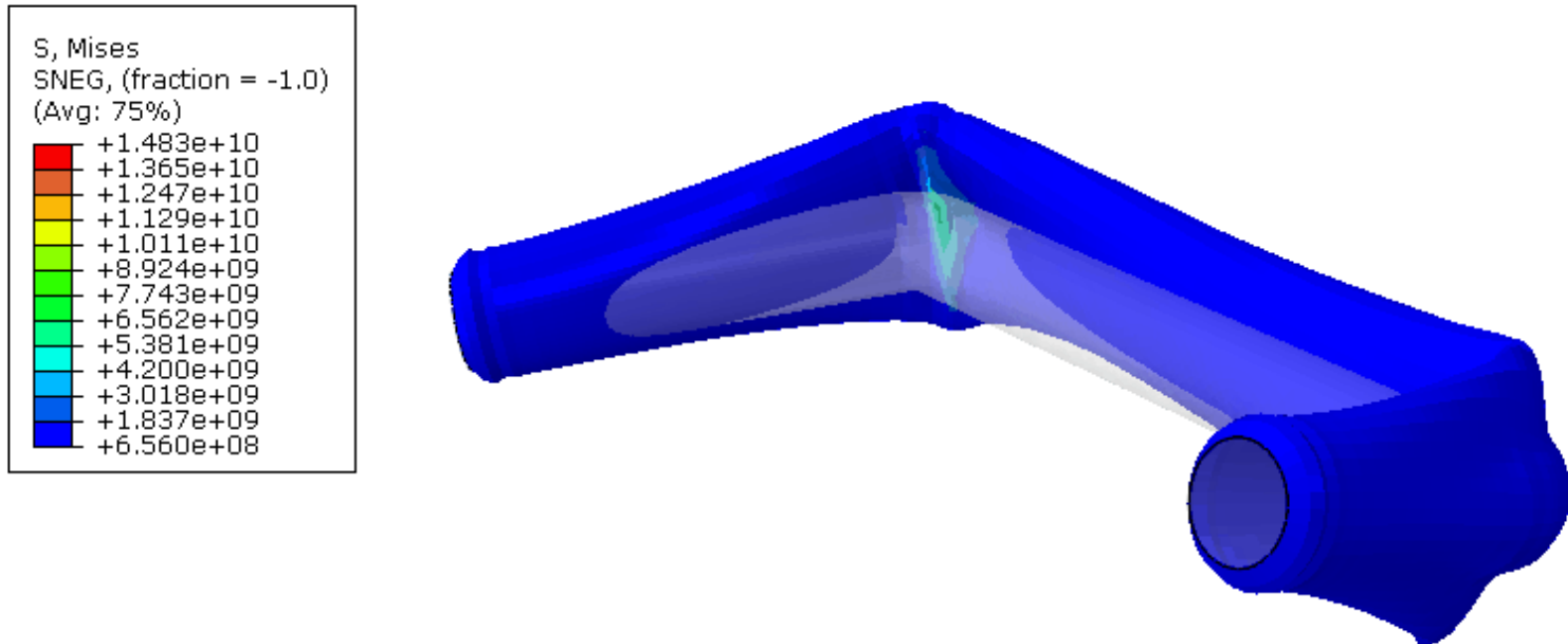
✓ Qu'est-ce que c'est ?
un mode « indésirable » d'énergie nulle dû à une simplification excessive de l'intégration des équations de la mécanique au sein d'un élément

✓ Qu'est-ce que l'élément quadratique ?

l'interpolation au sein de l'élément se fait de façon quadratique en ajoutant des points pour définir la fonction d'interpolation



Résultat



✓ Exemple de résultat pour une épaisseur de **5mm**



ODB: Job-tuyau1.odb Abaqus/Standard 2024 Wed Feb 26 12:06:01 Paris, Madrid 2025

Step: Step-1

Increment 1: Step Time = 1.000

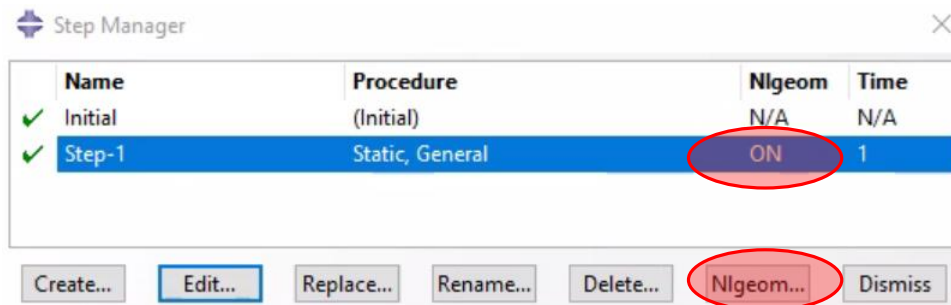
Primary Var: S, Mises

Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +5.935e+01

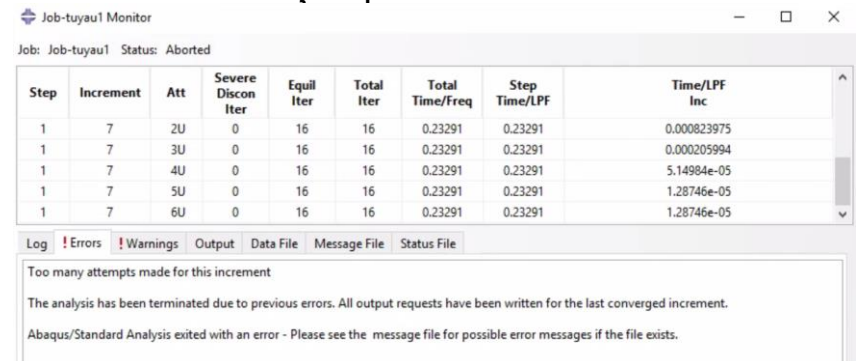
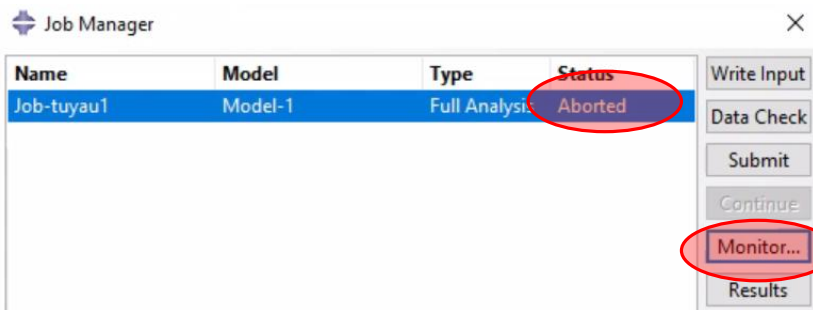
Résultat

- ✓ La limite d'élasticité est largement dépassée !
- ✓ Les déformations sont très importantes pour une épaisseur 5mm !
- ✓ L'hypothèse des petites perturbations n'était pas pertinente !

→ retour à la définition du step : NLgeom = ON



- ✓ On relance le calcul et si tout se passe bien... ça plante !!



Résultat

Job-tuyau1 Monitor

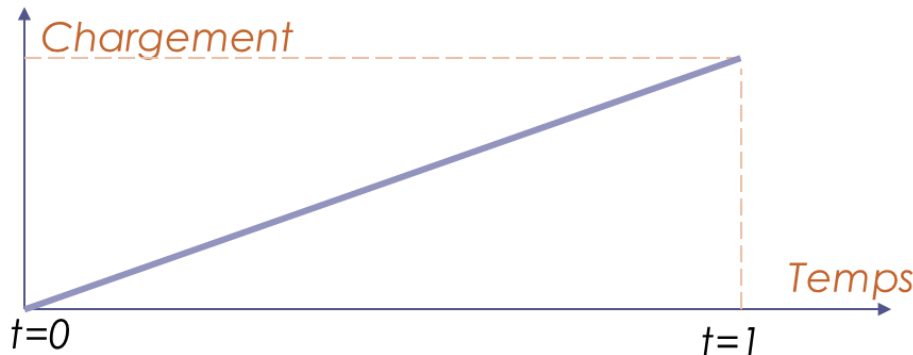
Job: Job-tuyau1 Status: Aborted

Step	Increment	Att	Severe Discon Iter	Equil Iter	Total Iter	Total Time/Freq	Step Time/LPF	Time/LPF Inc
1	7	2U	0	16	16	0.23291	0.23291	0.000823975
1	7	3U	0	16	16	0.23291	0.23291	0.000205994
1	7	4U	0	16	16	0.23291	0.23291	5.14984e-05
1	7	5U	0	16	16	0.23291	0.23291	1.28746e-05
1	7	6U	0	16	16	0.23291	0.23291	1.28746e-05

Log !Errors !Warnings Output Data File Message File Status File

Too many attempts made for this increment

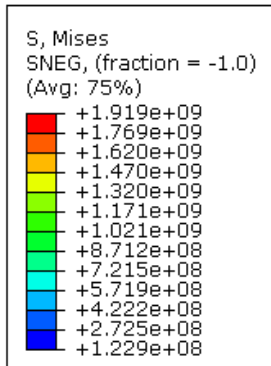
- ✓ Le « step time » s'est arrêté ici par exemple à 0.23
→ qu'est-ce que c'est ?



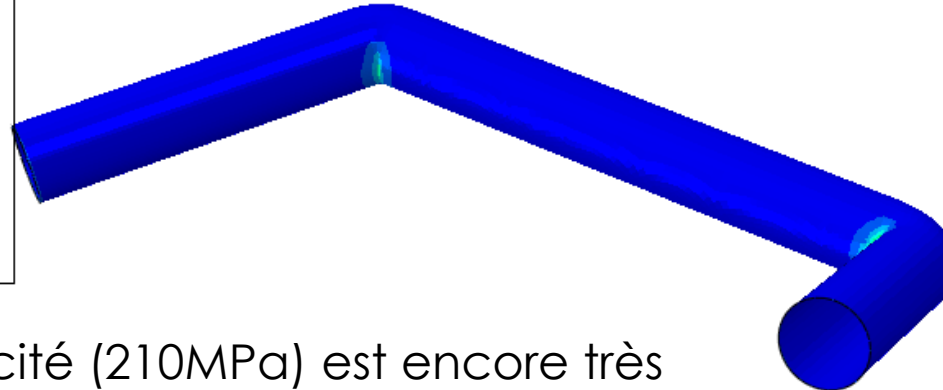
- ✓ Dans le cas non-linéaire, le chargement (ici la pression) est appliqué progressivement
→ $t=1 \rightarrow 100\%$ du chargement
→ $t=0,23 \rightarrow 23\%$ du chargement
→ 35,5 bars seulement !

- ✓ Comme le matériau est linéaire, on peut faire l'hypothèse au premier ordre d'une certaine linéarité (fausse en grandes déformations...)
- ✓ HYPOTHESE : on multiplie l'épaisseur par **5 = 25mm** → changer la section

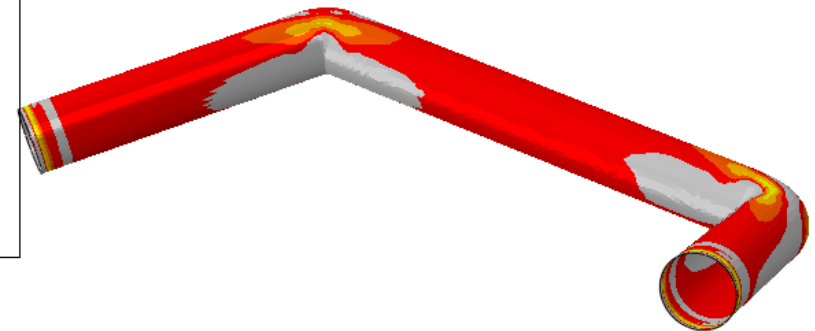
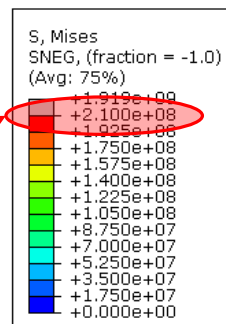
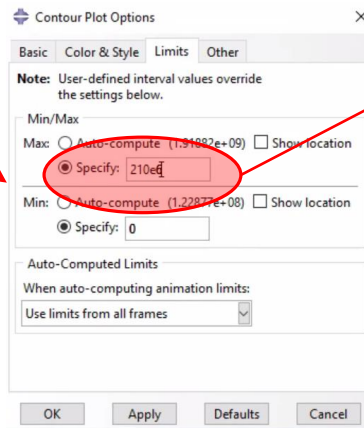
Résultat



✓ Exemple de résultat pour une épaisseur de **25mm**

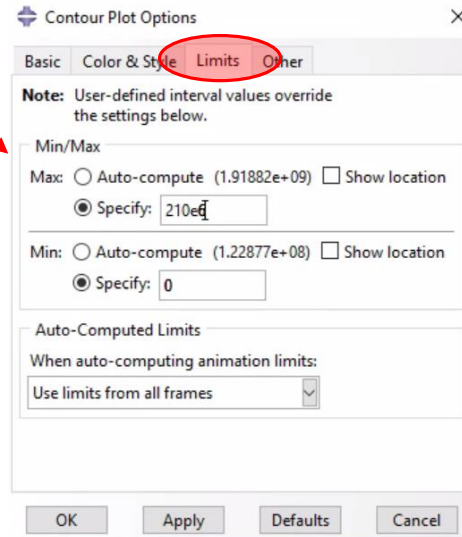


- ✓ La limite d'élasticité (210MPa) est encore très largement dépassée dans beaucoup de régions!
→ comment les visualiser ?

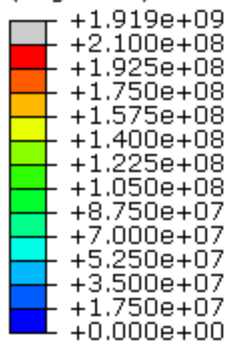


- ✓ Changer l'échelle des contraintes!

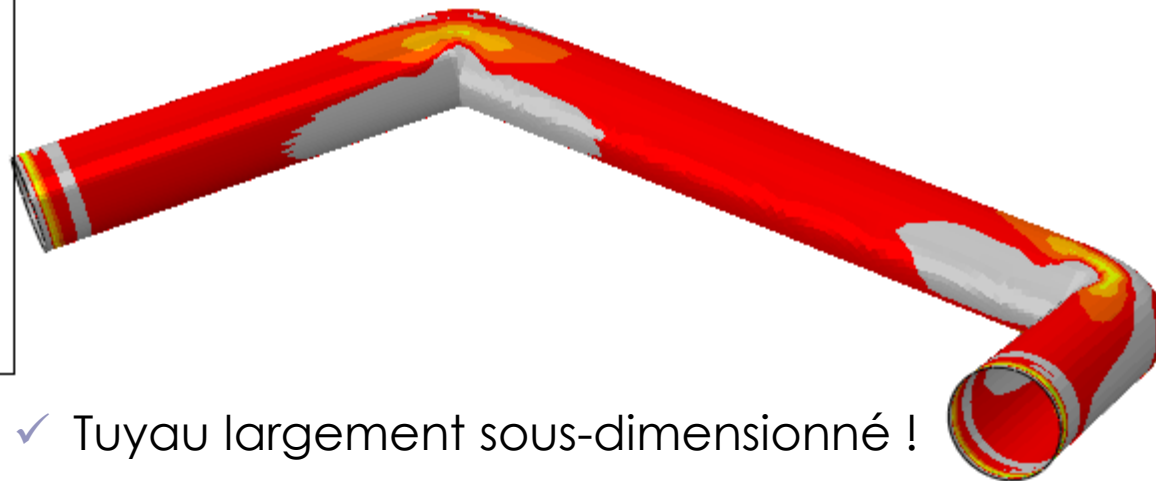
Résultat



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



- ✓ La limite d'élasticité (210MPa) est entrée en limite max de la légende
- ✓ Toutes les contraintes au-delà de cette limite seront grisées



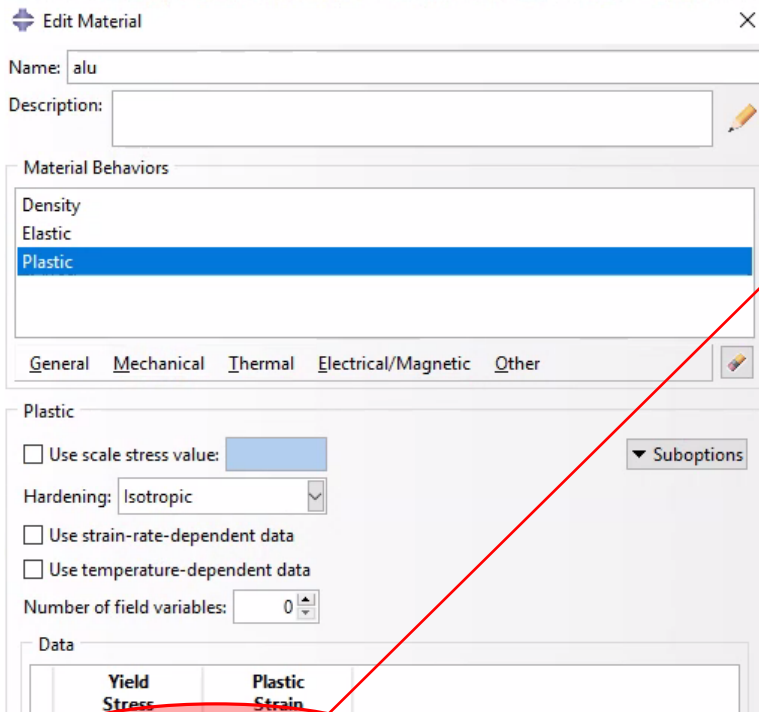
- ✓ Tuyau largement sous-dimensionné !



Modèle élastoplastique

Courbe de charge - décharge

- ✓ On garde l'épaisseur précédente de **25 mm**
- ✓ On ajoute un comportement **plastique** au comportement **élastique** précédent



→ Données disponibles dans le fichier
hardening_stainless_steel.xlsx

→ Attention aux unités!

Courbe de charge - décharge

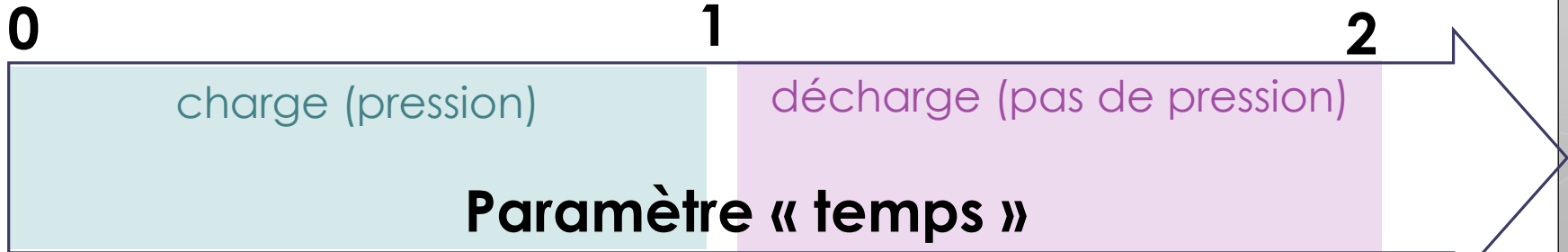
- ✓ Grandeur d'intérêt ici : déformation permanente **après décharge**

→ **deux calculs nécessaires** :
charge **puis** décharge !!

Step Manager

Name	Procedure	Nlgeom	Time
✓ Initial	(Initial)	N/A	N/A
✓ Charge	Static, General	ON	1
✓ Decharge	Static, General	ON	1

Create... Edit... Replace... Rename... Delete... Nlgeom... Dismiss



- ✓ Calcul non-linéaire = processus incrémental

→ Diminuer la taille des itérations
pour une convergence du calcul

Type: Static, General

Basic Incrementation Other

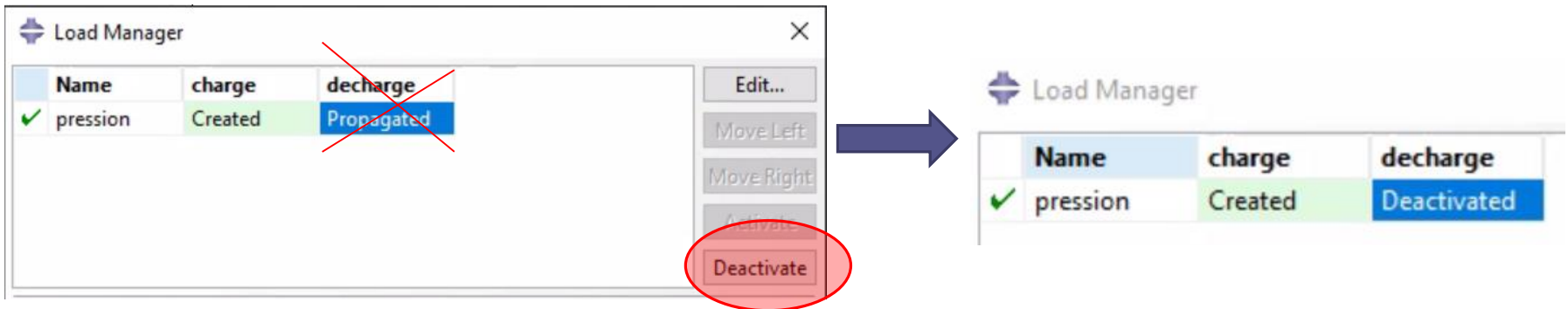
Type: ☒ Automatic ☐ Fixed

Maximum number of increments: 100

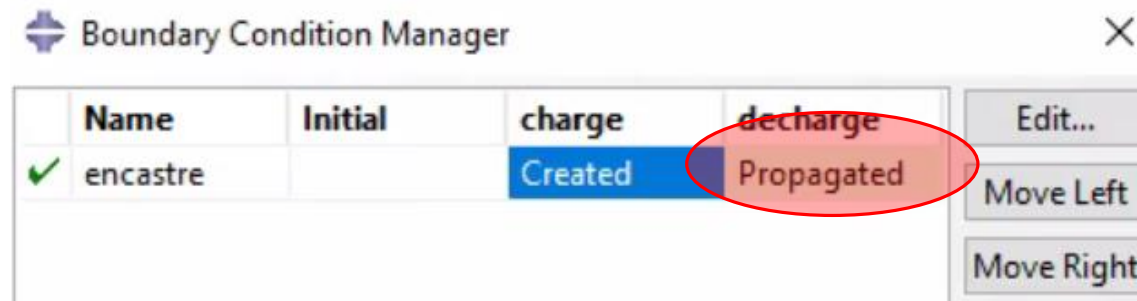
Increment size:	Initial	Minimum	Maximum
	0.1	1E-07	0.1

Courbe de charge - décharge

- ✓ Pour le deuxième *step* : la pression ne doit plus être appliquée



- ✓ En revanche les conditions aux limites encastrees sont maintenues



Courbe de charge - décharge

- ✓ On peut observer le processus itératif

Job-uyau1_plast Monitor

Job: Job-uyau1_plast 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	2	2	0.1	0.1	0.1
1	2	1	0	1	1	0.2	0.2	0.1
1	3	1	0	2	2	0.3	0.3	0.1
1	4	1	0	2	2	0.4	0.4	0.1
1	5	1	0	2	2	0.5	0.5	0.1
1	6	1	0	2	2	0.6	0.6	0.1
1	7	1	0	2	2	0.7	0.7	0.1
1	8	1	0	2	2	0.8	0.8	0.1
1	9	1	0	2	2	0.9	0.9	0.1
1	10	1	0	3	3	1	1	0.1
2	1	1	0	2	2	1.1	0.1	0.1
2	2	1	0	1	1	1.2	0.2	0.1
2	3	1	0	1	1	1.3	0.3	0.1
2	4	1	0	1	1	1.4	0.4	0.1
2	5	1	0	1	1	1.5	0.5	0.1
2	6	1	0	1	1	1.6	0.6	0.1
2	7	1	0	1	1	1.7	0.7	0.1
2	8	1	0	1	1	1.8	0.8	0.1
2	9	1	0	1	1	1.9	0.9	0.1
2	10	1	0	1	1	2	1	0.1

Log Errors ! Warnings Output Data File Message File Status File

Name	Model	Type	Status	Write Input
Job-tuyau1	Model-1	Full Analysis	Completed	Data Check
Job-uyau1_plast	Model-1	Full Analysis	Running	Submit
				Continue
				Monitor...

- ✓ Incréments de temps imposés à 0,1 max
- ✓ Si tout va bien (...): convergence

0

charge (pression)

1

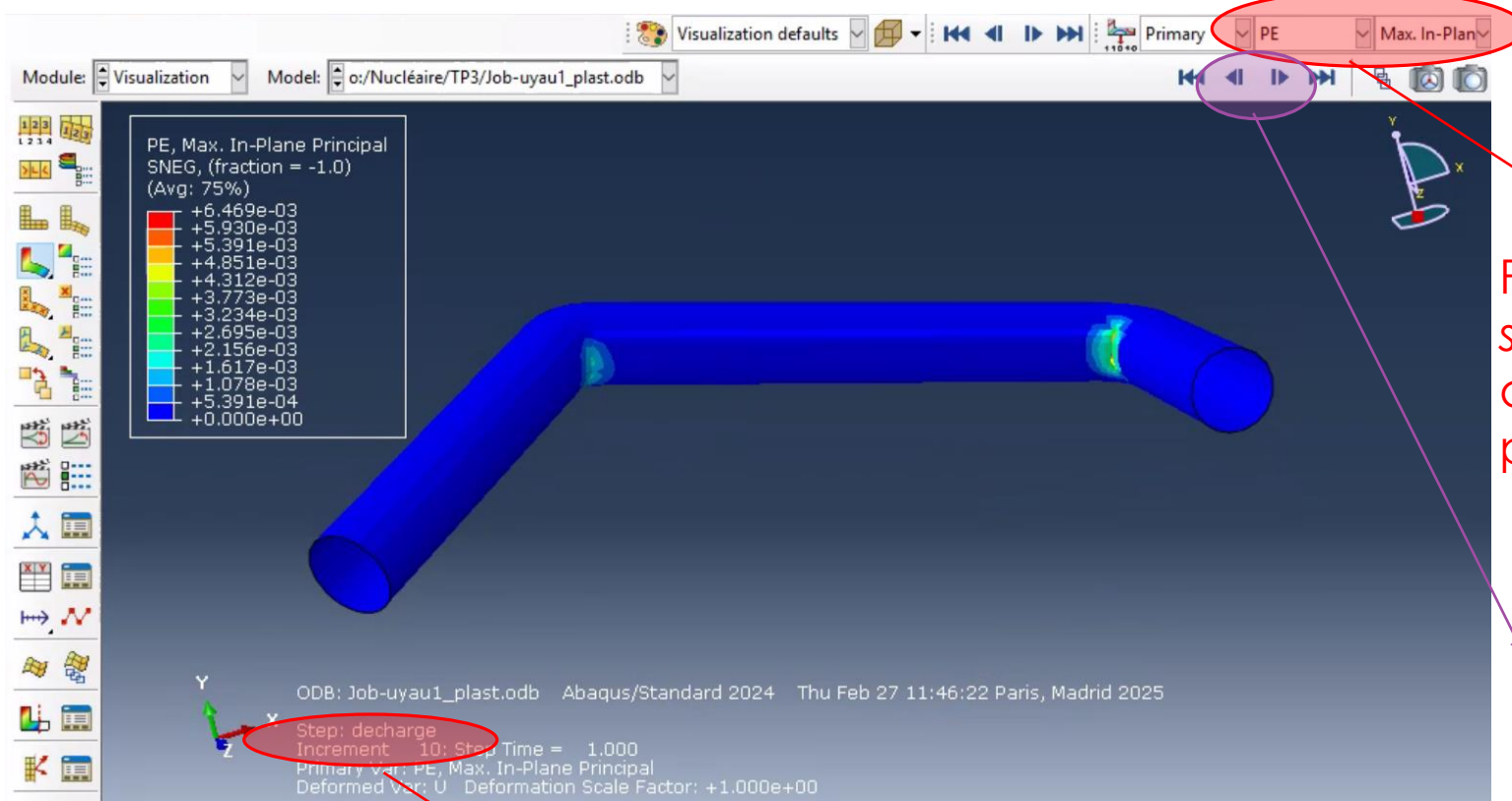
décharge (pas de pression)

2

Paramètre « temps »

Modèle élastoplastique

Courbe de charge - décharge



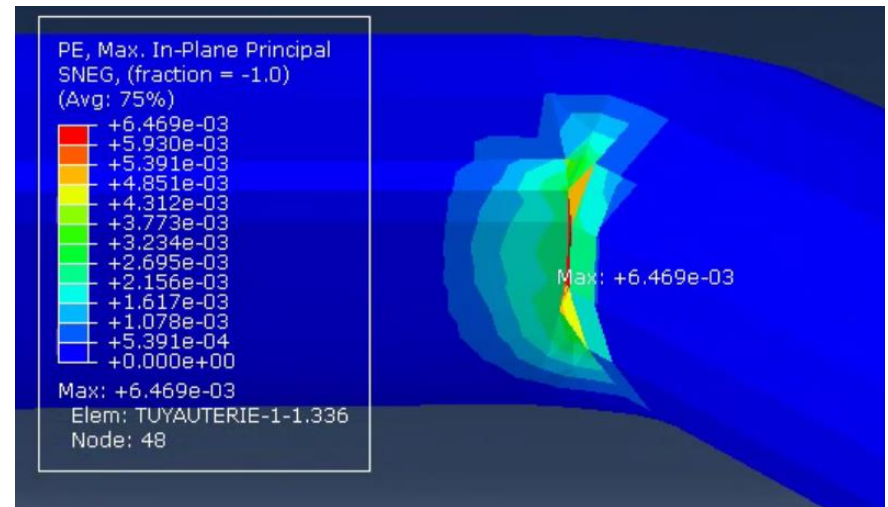
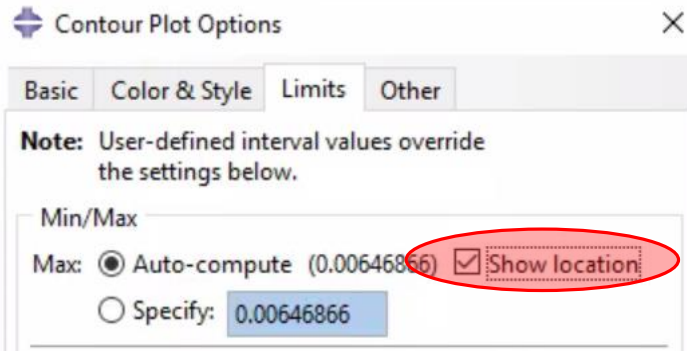
PE : plastic strain :
déformation permanente

pour visiter l'évolution du calcul

ici : fin du « step » décharge

Courbe de charge - décharge

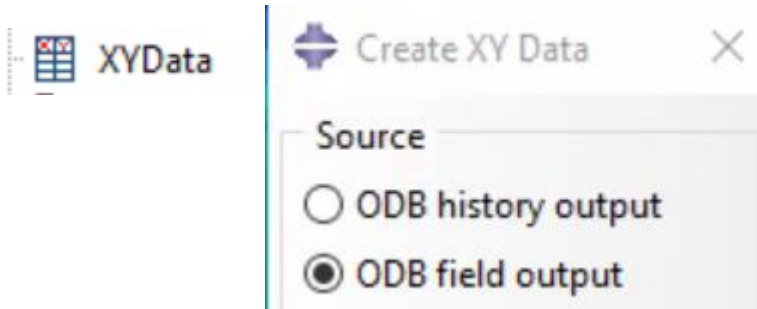
- ✓ Visualisation du point où la déformation plastique est maxi



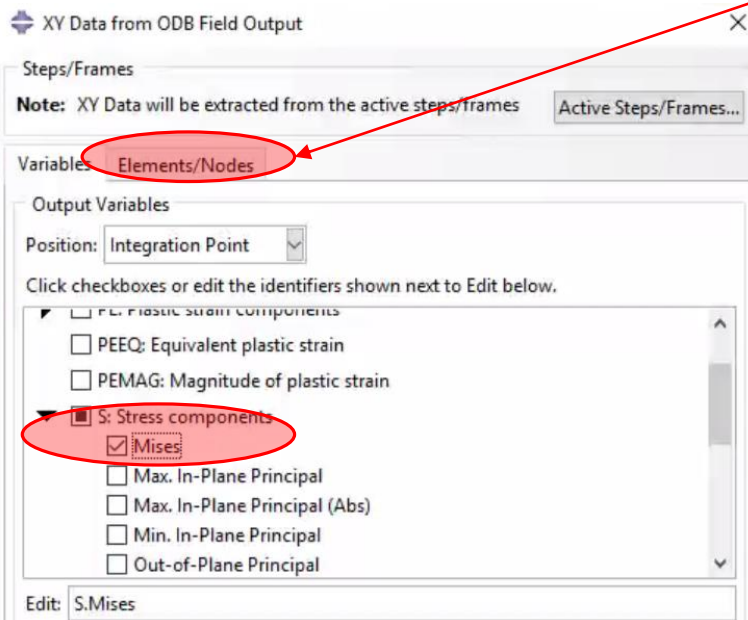
- ✓ Question : peut-on retracer l'évolution de la courbe contrainte-déformation en ce point ?

1. construire une table avec les contraintes en fonction du « temps »
2. construire une table avec les déformation en fonction du « temps »
3. Tracer la première table en fonction de la seconde

Courbe de charge - décharge



- ✓ Tracer l'évolution de la contrainte
- ✓ Sélectionner ensuite les noeuds où la déformation permanente est maxi



Courbe de charge - décharge

- ✓ Réitérer pour la déformation (*LE : Max principal (abs)* par exemple)
- ✓ Ensuite : nouvelle table « XYdata »

Operate on XY Data

Enter an expression by typing and selecting XY Data and Operators below.
Example: maxEnvelope("XYData-2", "XYData-4") * 2.5 + "XYData-5"

combine("LE:Max Principal (Abs) SP:1 PI: TUYAUTERIE-1-1 E: 99 IP: 1" ; "S:Mises SP:1 PI: TUYAUTERIE-1-1 E: 99 IP: 1")

XY Data

Name filter:

Name	Description
LE:Max Principal (/ From Field Data: LE:Max Principal (Abs) SP:1 at part instance TUYAUTERIE-1-1	
LE:Max Principal (/ From Field Data: LE:Max Principal (Abs) SP:5 at part instance TUYAUTERIE-1-1	
S:Mises SP:1 PI: TL From Field Data: S:Mises SP:1 at part instance TUYAUTERIE-1-1	
S:Mises SP:5 PI: TL From Field Data: S:Mises SP:5 at part instance TUYAUTERIE-1-1	
_LE:Max Principal (/ From Field Data: LE:Max Principal (Abs) SP:1 at part instance TUYAUTERIE-1-1	
_LE:Max Principal (/ From Field Data: LE:Max Principal (Abs) SP:5 at part instance TUYAUTERIE-1-1	
_S:Mises SP:1 PI: T From Field Data: S:Mises SP:1 at part instance TUYAUTERIE-1-1	
_S:Mises SP:5 PI: T From Field Data: S:Mises SP:5 at part instance TUYAUTERIE-1-1	

Operators

A - XYData, float, or integer
X - XYData
I - integer
F - float

append((X,X,...))
asin(A)
atan(A)
avg((A,A,...))
butterworthFilter(X,F)
chebyshev1Filter(X,F,F)
chebyshev2Filter(X,F,F)
combine(X,X)
cos(A)
cosh(A)
currentMax(X)
currentMin(X)
currentRng(X)

Source

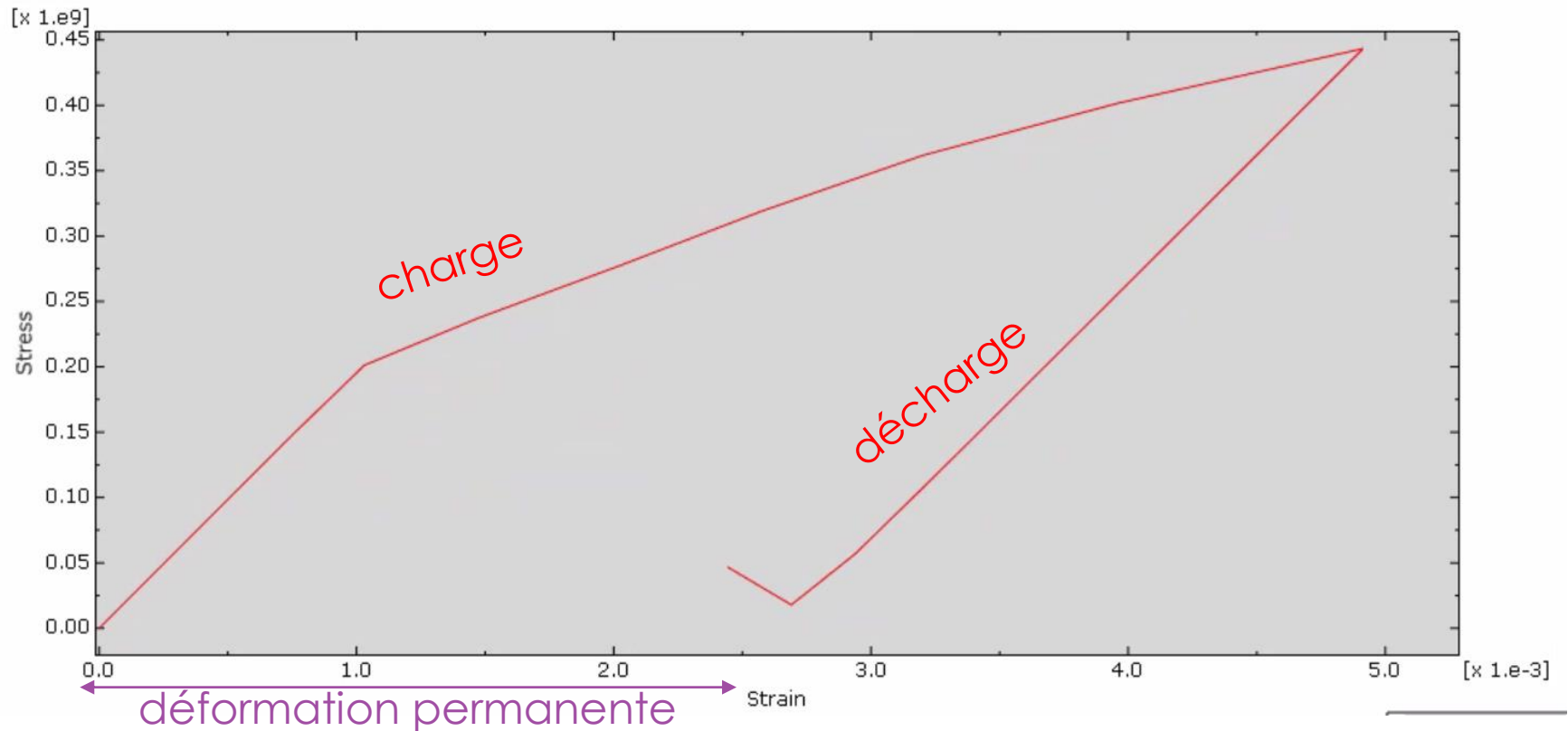
☐ ODB history output
☐ ODB field output
☐ Thickness
☐ Free body
☒ Operate on XY data

Add to Expression ☐ Skip checks

Create XY Data... Save As... Plot Expression Clear Expression Cancel

pour tracer une valeur en fonction d'une autre

Courbe de charge - décharge



- ✓ on retrouve bien localement la loi de comportement du matériau
- ✓ le tuyau s'est déformé de façon irréversible
- ✓ si l'on cumule ces déformations... danger !

A retenir aujourd'hui

- ✓ Calcul en grandes déformations
- ✓ Séquences de chargement
- ✓ Comportement élastoplastique
- ✓ Tracé de courbes, exploitation des résultats

Attention : beaucoup d'hypothèses, le vrai cas est beaucoup plus complexe !!!



« Piping engineer » : un métier d'avenir



LORRAINE
INP Ensem