

## Simulations numériques du soudage multipasse de plaques en inconel zone soudée

----

**Lionel Depradeux (EC2MS\*)**

**Claire Naudin, Claude Amzallag (EDF DPI SEPTEN\*\*)**

**\* EC2-MS**

66, bd Niels BOHR, BP 2132, 69603 VILLEURBANNE Cedex

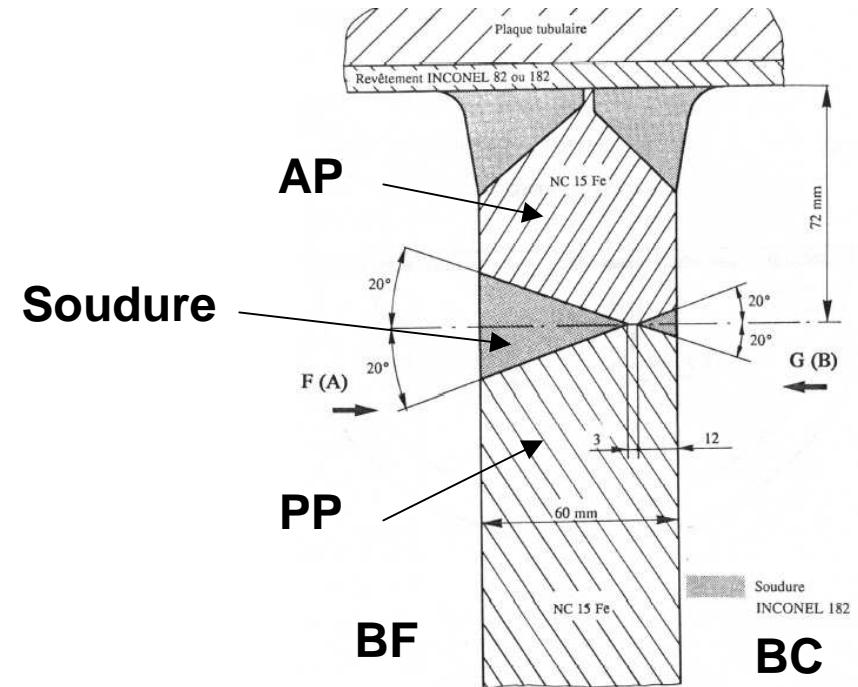
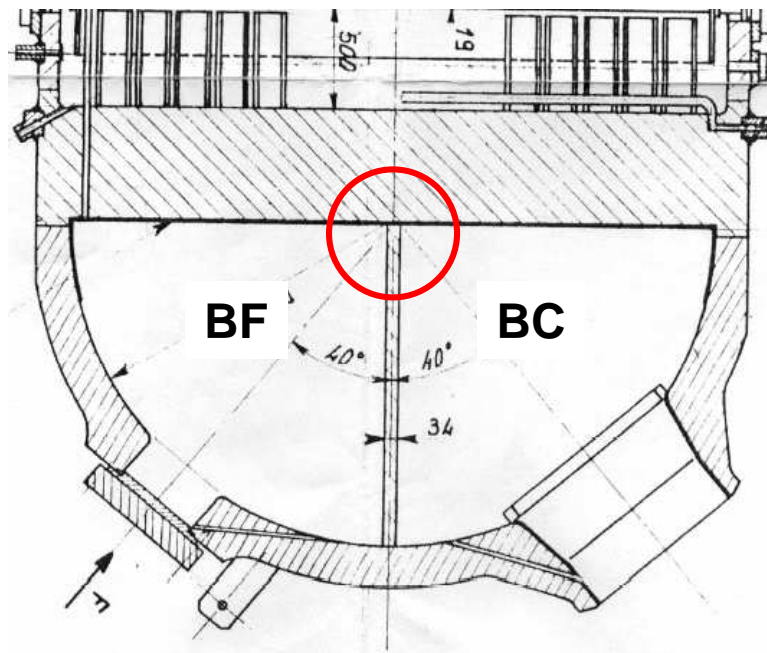
Télécopie : (33) 04 37 48 84 05 - Ligne directe : (33) 04 37 48 84 08

E-mail [christophe.baillis@ec2-ms.fr](mailto:christophe.baillis@ec2-ms.fr), [lionel.depradeux@edf.fr](mailto:lionel.depradeux@edf.fr) - Site : [www.ec2-ms.fr](http://www.ec2-ms.fr)

**\*\* EDF BRANCHE PRODUCTION INGENIERIE**

SERVICE ETUDES ET PROJETS THERMIQUES ET NUCLEAIRES

## Contexte : BAE de GV – Soudure AP/PP



- BAE de GV – soudure Attente de Plaque / Plaque de Partition
- AP, PP : inconel 600 ; soudure : inconel 182
- Soudure AP-PP non détensionnée →  $\sigma$  résiduelles

# Calcul des contraintes de soudage dans la zone soudée AP-PP

---

## Étude menée en 2 phases :

**1. Simulation numérique bidimensionnelle** de l'opération de soudage (modélisation d'une section perpendiculaire à l'avancée de la soudure) :

- Simulation passe par passe du dépôt de chaque cordon
- Apport de chaleur réaliste
- obtention d'un état de contraintes de référence

**2. Simulation numérique tridimensionnelle :**

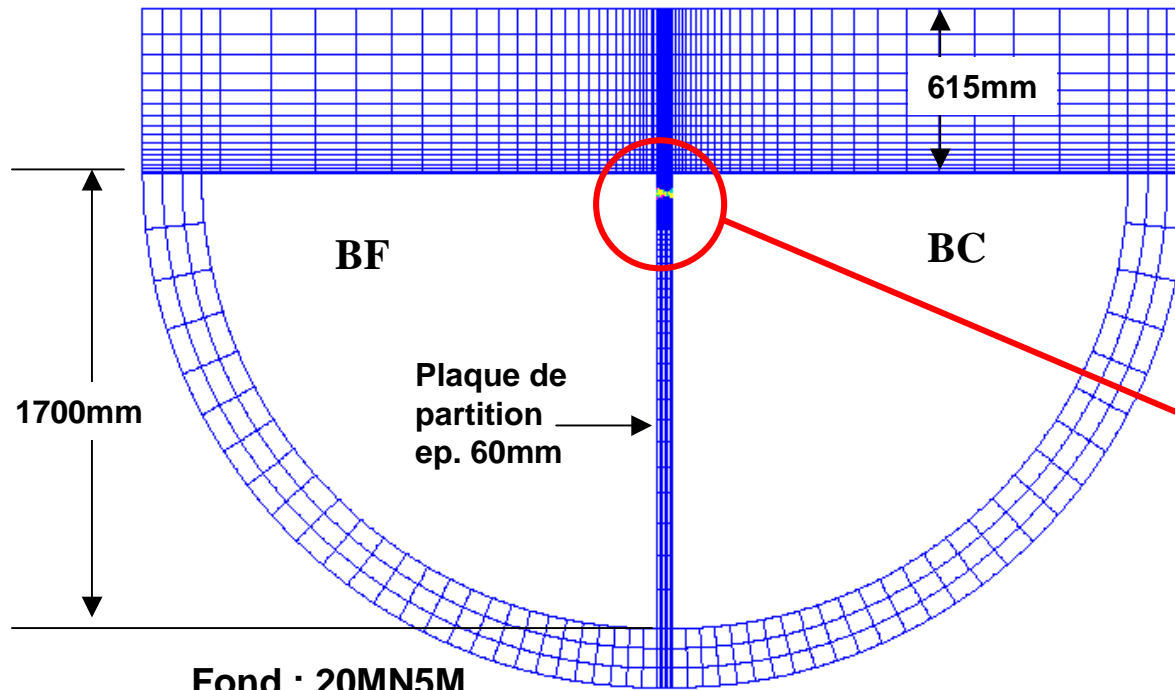
- Simulations prenant en compte des « macro-dépôts » (groupage de passe)
- obtention d'un état de contraintes similaire au 2D à l'issue du soudage
- Pour application ultérieure des chargements correspondant à l'épreuve hydraulique primaire et à l'état permanent

# GV 1300MWe – Simulations Bidimensionnelles

## Maillage complet

Plaque à Tube PT : 16MND5

Re = 450 MPa à 20°C

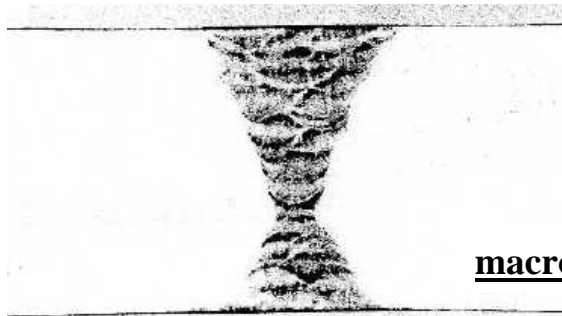


Fond : 20MN5M

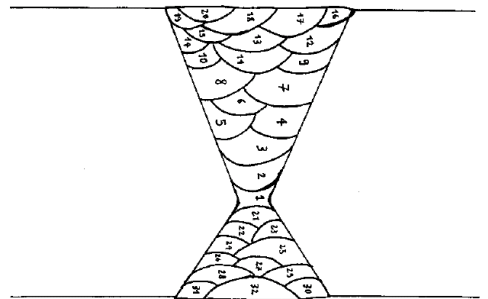
Re = 450 MPa à 20°C

- Maillage 2D axi « tore » avec rayon de courbure ~ 1km ( $X = R$  ;  $Y = \theta$  ;  $Z = Z$ )
- Maillage quadratique
- Environ 8000 nœuds

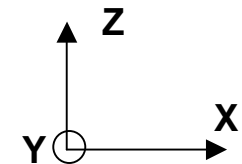
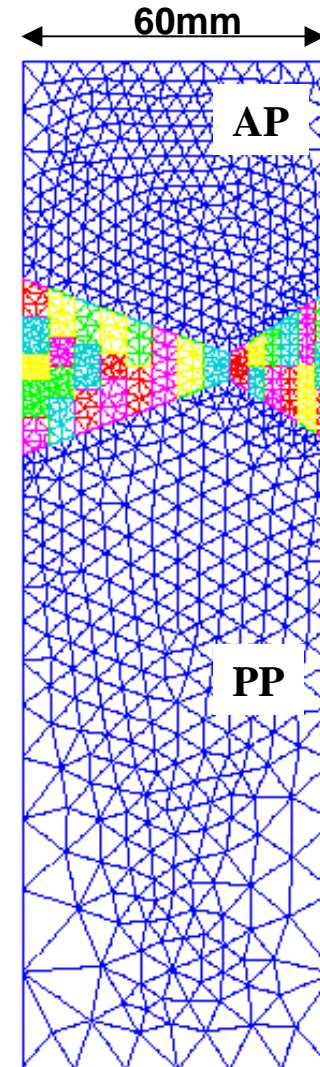
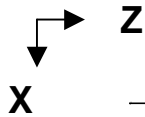
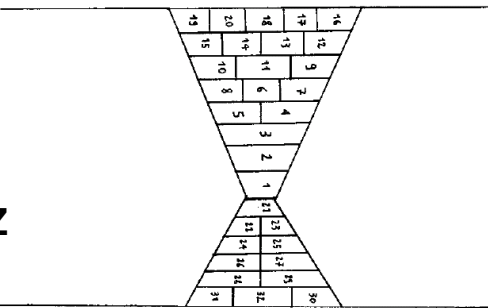
# GV 1300MWe – Maillage zone soudée



macrographie



(32 passes de soudage)



# Déroulement du calcul thermomécanique

## 1. Calcul thermique non linéaire transitoire (THER\_NON\_LINE) :

équation de la chaleur :

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T) = G$$

données thermiques dépendant de T  
( $\lambda(T)$ ,  $\rho(T)$ ,  $C_p(T)$ )

CL thermiques sur les frontières:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{air}) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_{air}^4) + d(r, t)$$

Échanges radiatifs et convectif + flux  
éventuel

→ T(r,t) lors des 32 passes de soudage

## 2. Calcul mécanique non linéaire transitoire (découplé de la thermique) (STAT\_NON\_LINE) :

équations d'équilibre :  $\text{div}(\underline{\sigma}) + f_{volume} = 0$

CL mécaniques sur les frontières:

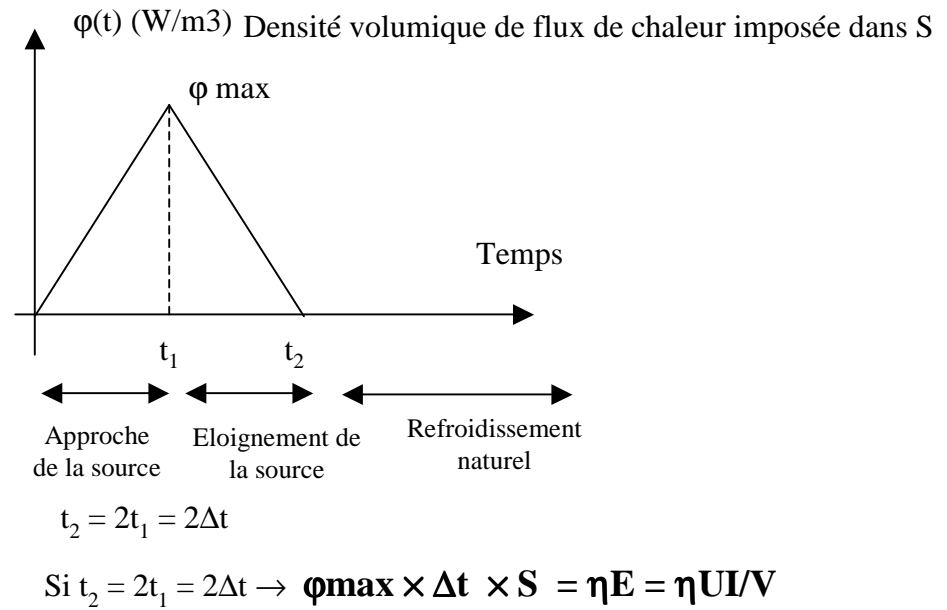
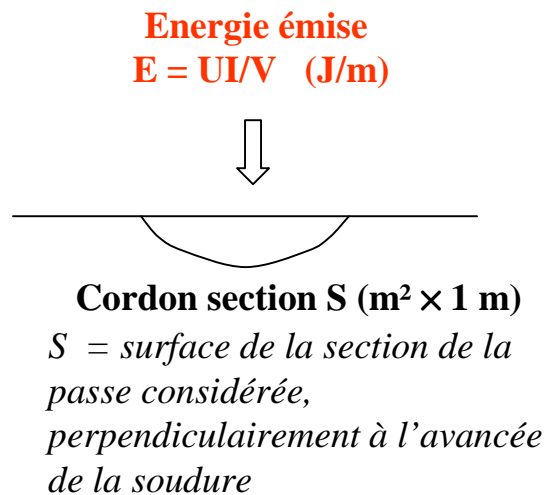
Partition des déformations (en HPP) :  $\underline{\varepsilon}^{totale} = \underline{\varepsilon}^e + \underline{\varepsilon}^{ther} + \underline{\varepsilon}^p$

données mécaniques dépendant de T  
(E(T),  $\sigma_y(T)$ , h(T),  $\alpha(T)$ ,  $\nu=0,3$ )

→ U(r,t) -  $\varepsilon(r,t)$  -  $\sigma(r,t)$  lors des 32 passes de soudage

# Simulation du soudage - GV DP 203 1300MWe – Modélisation de l'apport de chaleur

Equation de la chaleur :  $\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T) = G$  **Mot clé : SOURCE**

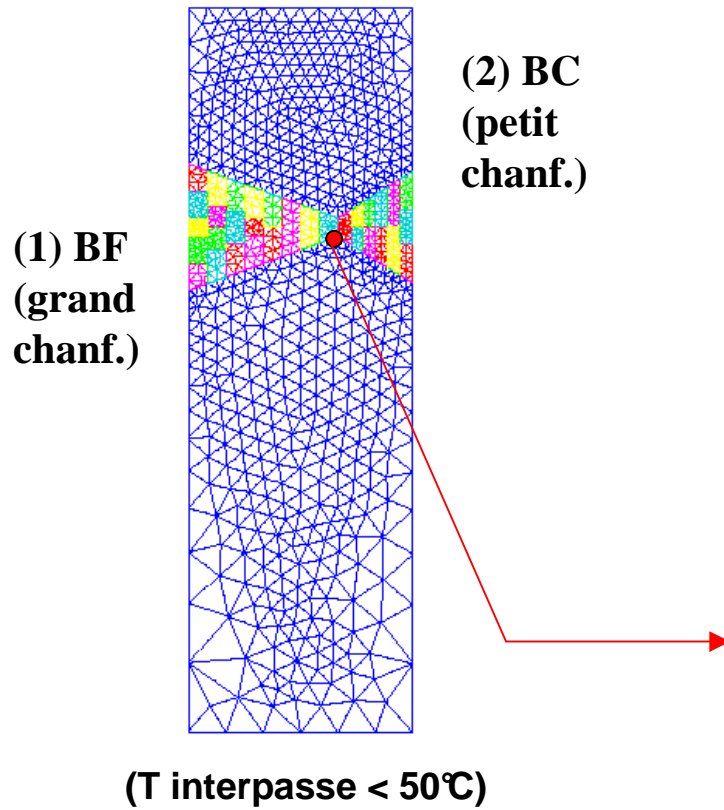


**Soudure à l'arc manuel avec électrode enrobée :**  
 **$E = \eta UI/V$  estimé à 10kJ/cm**

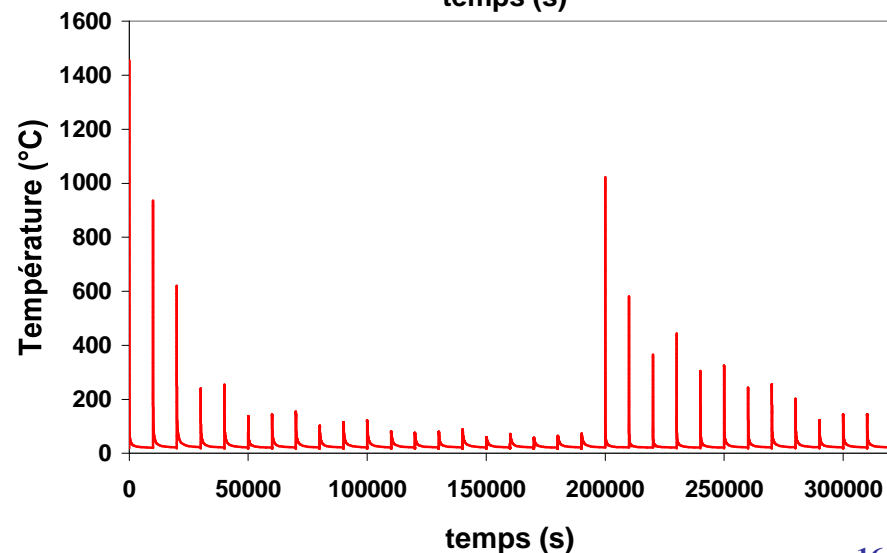
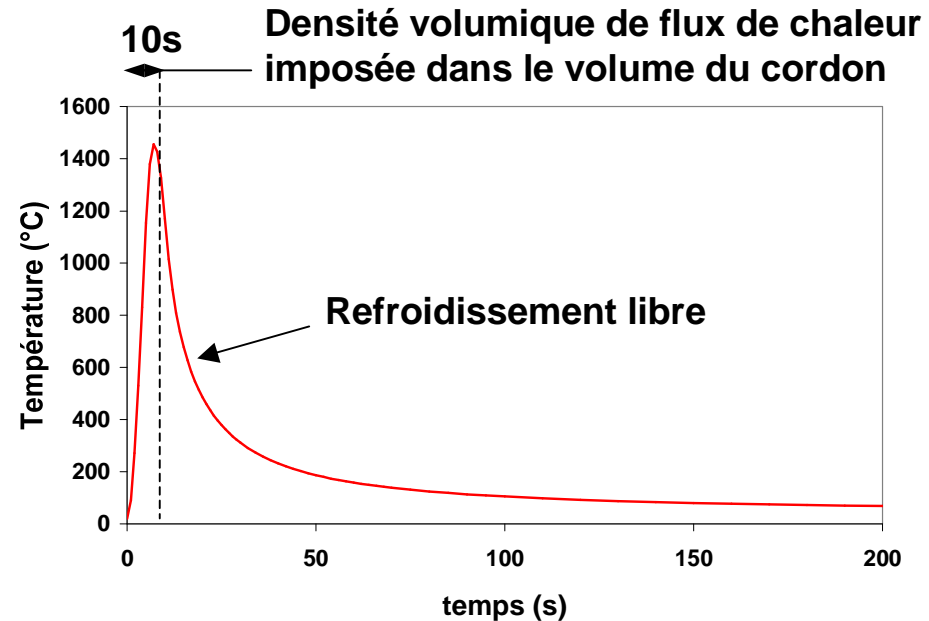
*I = intensité 80 à 180A ; U = tension 15 à 25V en manuel ; V = vitesse de soudage 1 à 2 mm/s*

*$\eta$  = fraction de l'énergie émise effectivement absorbée  
 $\eta = 0,7$  à  $0,8$*

# Simulation du soudage - GV 1300MWe – résultats 2D : thermique



32 modèles thermiques emboîtés –  
Prolongement des champs après  
chaque passe (boucle Python)





# Simulation du soudage - GV 1300MWe – Calcul Mécanique

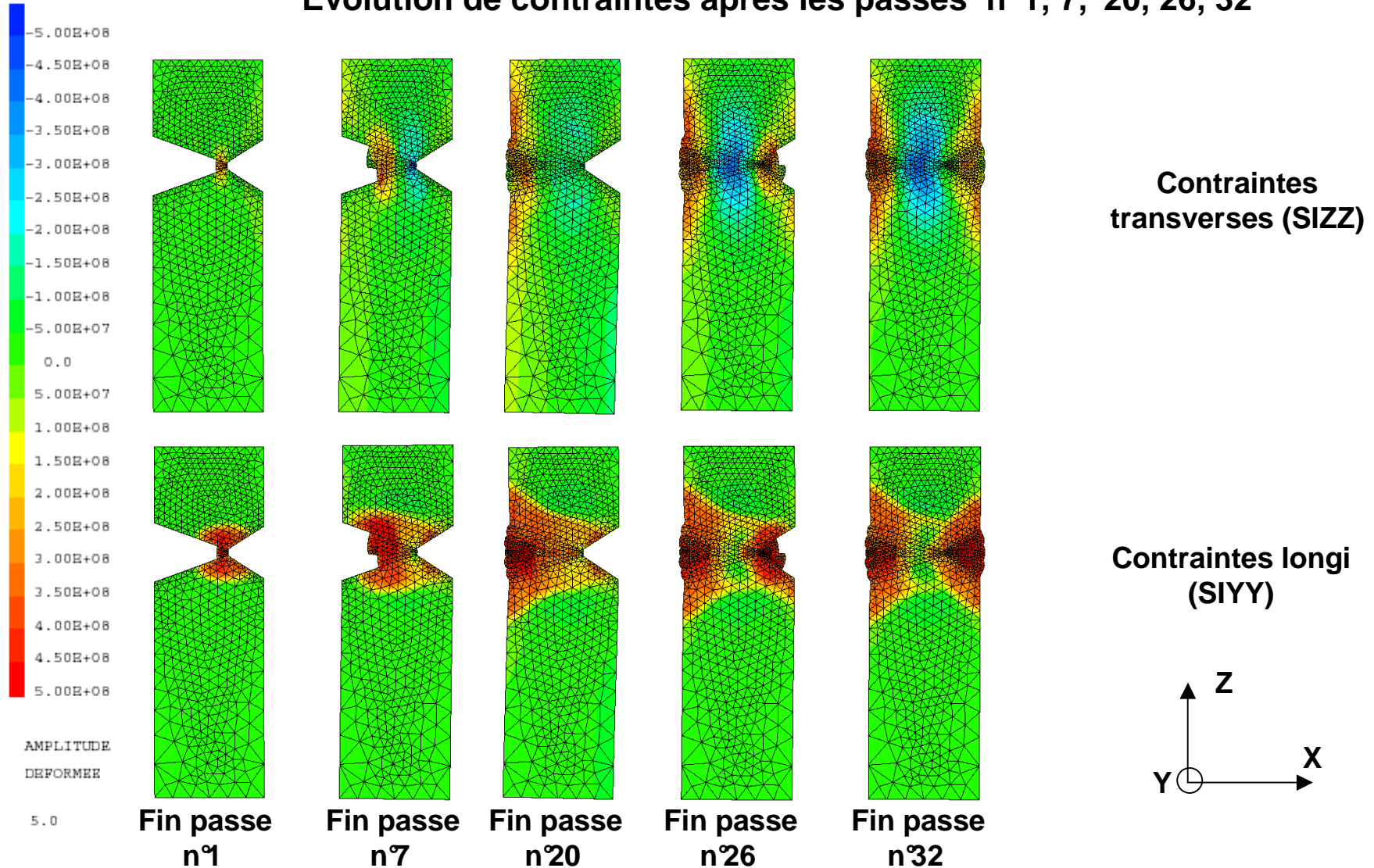
---

- Pour tous les matériaux : Loi de comportement élasto-plastique avec écrouissage cinématique linéaire
- Données matériau dépendantes de T entre 20°C et 150 0°C :  
 $E(T)$ ,  $\sigma_y(T)$ ,  $h(T)$ ,  $\alpha(T)$ ,  $\nu=0,3$
- Plaque à tube : caractéristiques homogénéisées pour tenir compte des trous ( $\nu^*$ ,  $E^*$ )
- Un seul modèle mécanique : cordons non déposés désactivés par affectation d'un module d'Young « quasi-nul »
- Calcul en HPP sur géométrie réactualisée à chaque pas de temps (PETIT\_REAC)
- Recherche linéaire avec 8 itérations

# GV 1300MWe – résultats 2D : mécanique

## Évolution des contraintes en cours de soudage

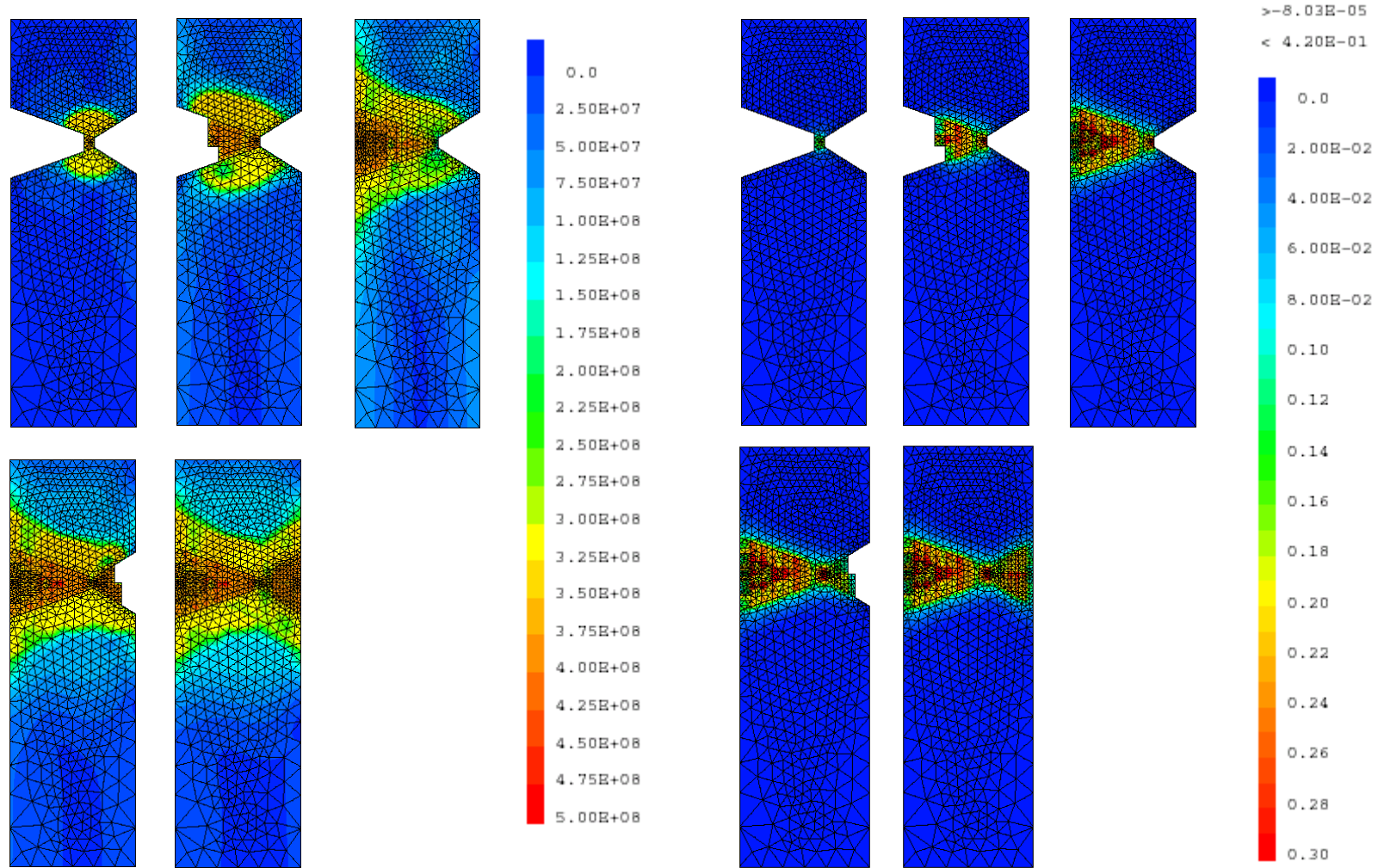
Évolution de contraintes après les passes n°1, 7, 20, 26, 32



# GV 1300MWe – résultats 2D : mécanique

## Évolution des contraintes en cours de soudage

Evolution SI vonMises et def plast cumul après les passes 1, 7, 20, 26, 32

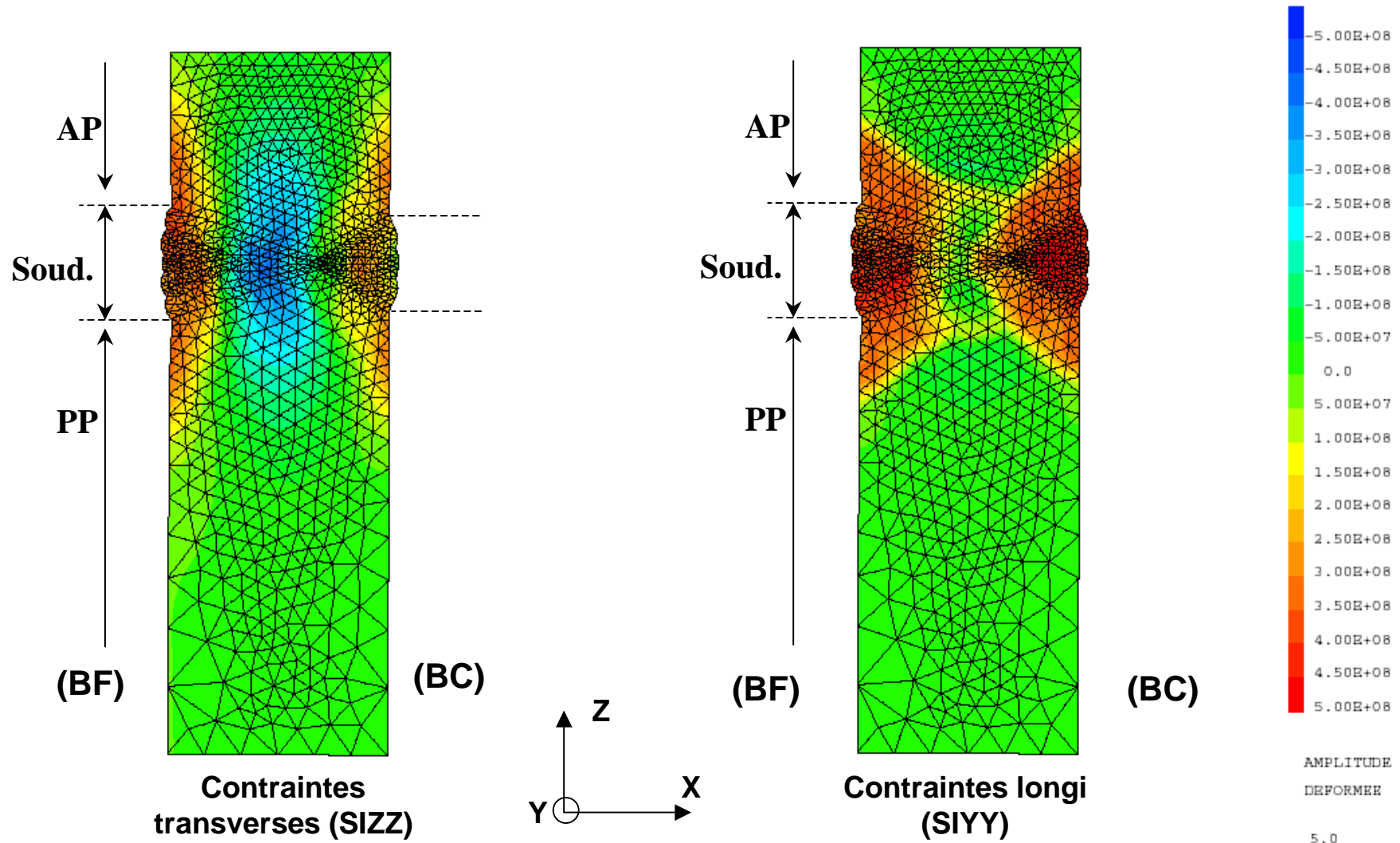


Contraintes de vonMises

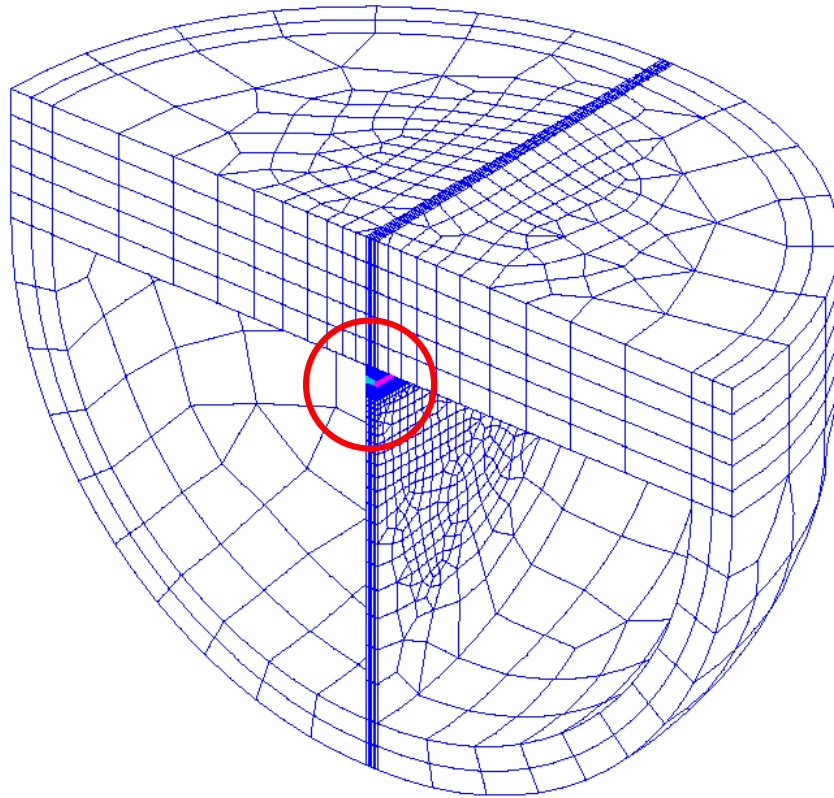
déformations plastiques cumulées

# GV 1300MWe – résultats 2D : mécanique

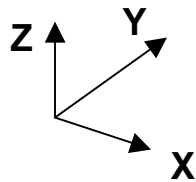
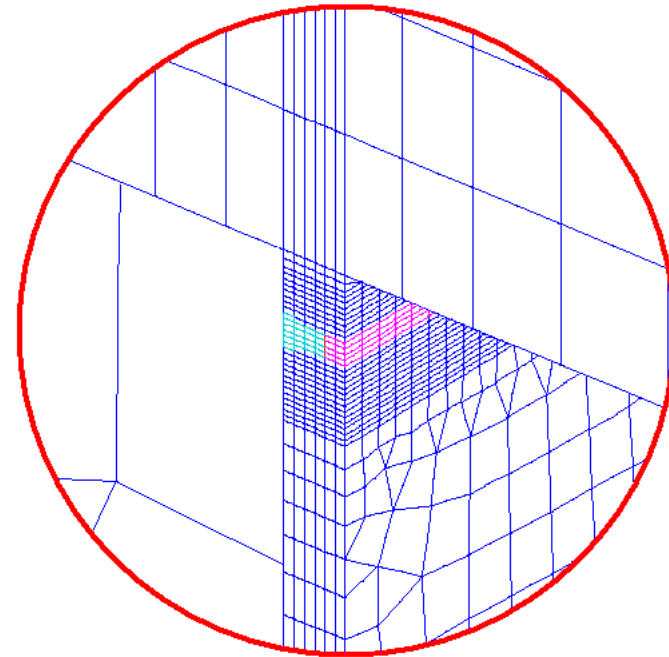
## Contraintes résiduelles en fin de soudage



# GV DP 203 1300MWe – Simulations 3D - Maillage complet (1)

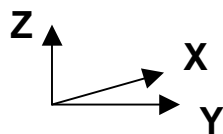
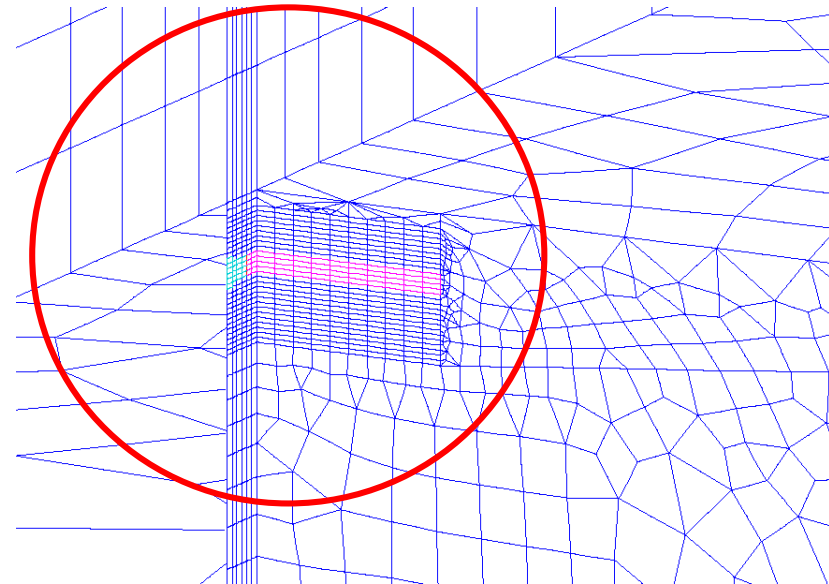
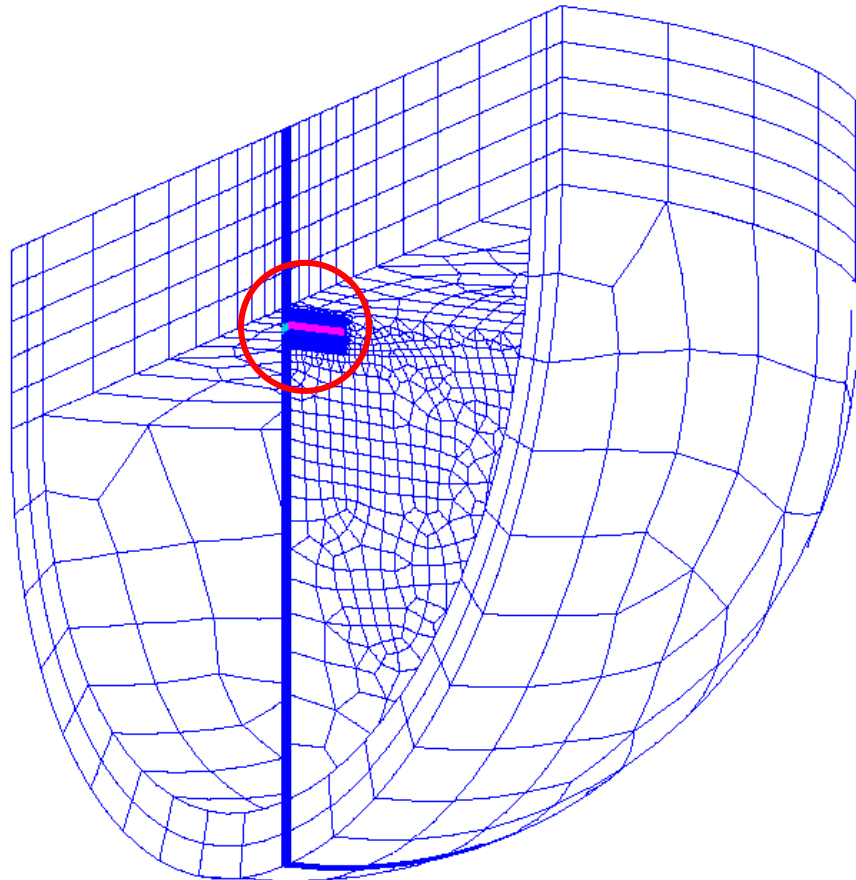


- Maillage quadratique
- Environ 32500 nœuds



**Simulation de l'opération de soudage :  
Transposition sur modèle 3D**

# GV DP 203 1300MWe – Simulations 3D - Maillage complet (2)

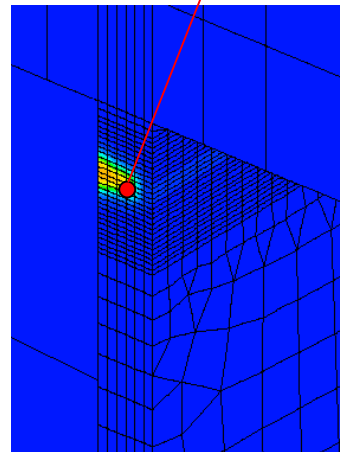
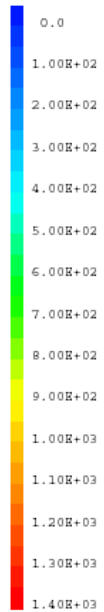
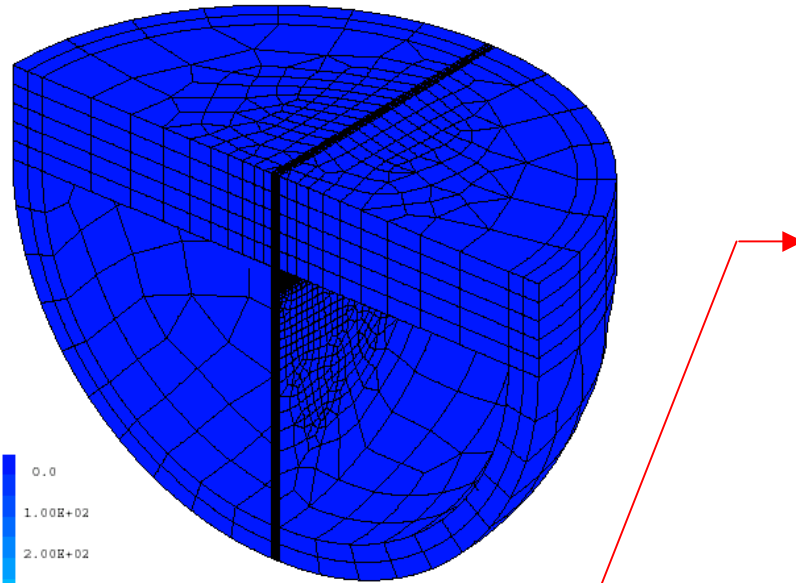


## GV DP 203 1300MWe – Simulations 3D – Mise en donnée

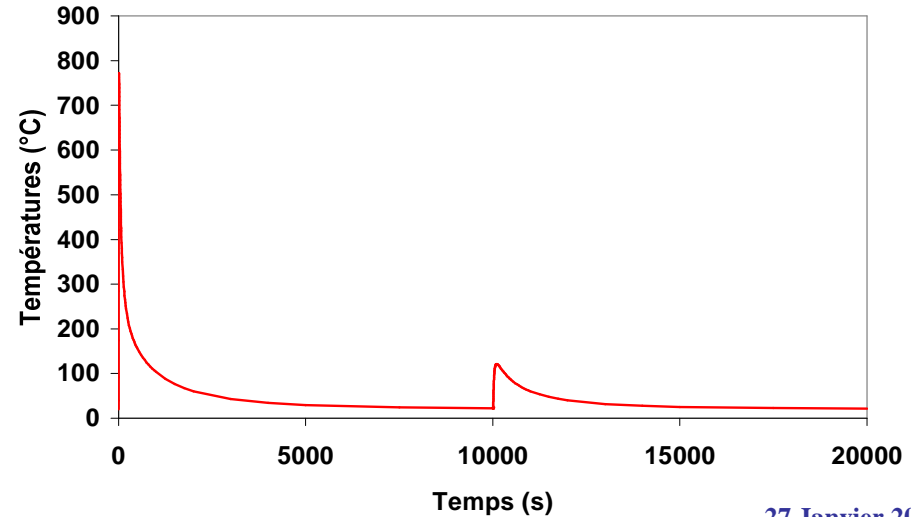
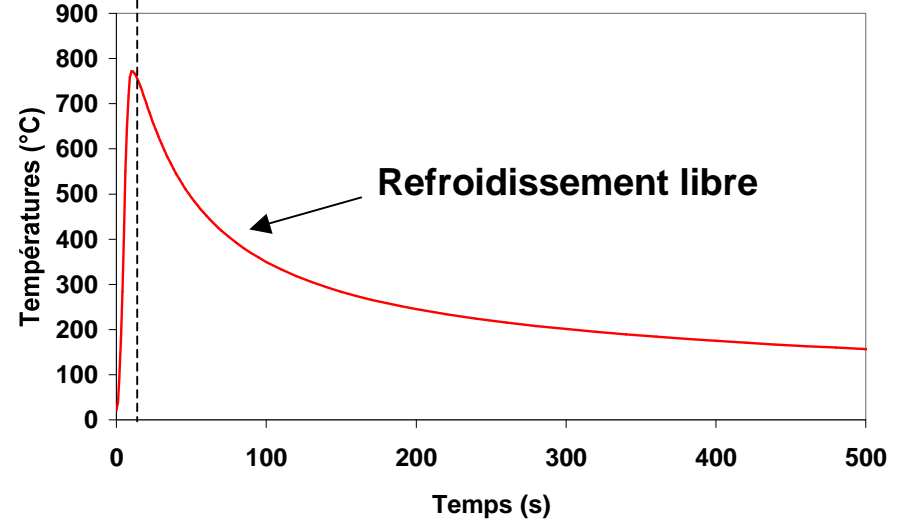
---

- **Données thermophysiques et mécaniques identiques à celles utilisées dans le calcul 2D**
- **2 « Passes » de soudage : 1 macro-dépôt coté BF, puis 1 macro-dépôt coté BC**
- **Apport de chaleur = densité volumique de flux de chaleur  $\varphi$  calée de façon à retrouver l'étendue de la « ZAT » obtenue dans le 2D et à retrouver l'état de contraintes 2D de référence**
- **CL méca : conditions de symétrie + appui simple du bol**
- **Écrouissage cinématique linéaire**

# GV DP 203 1300MWe – Simulations 3D – Résultats thermiques

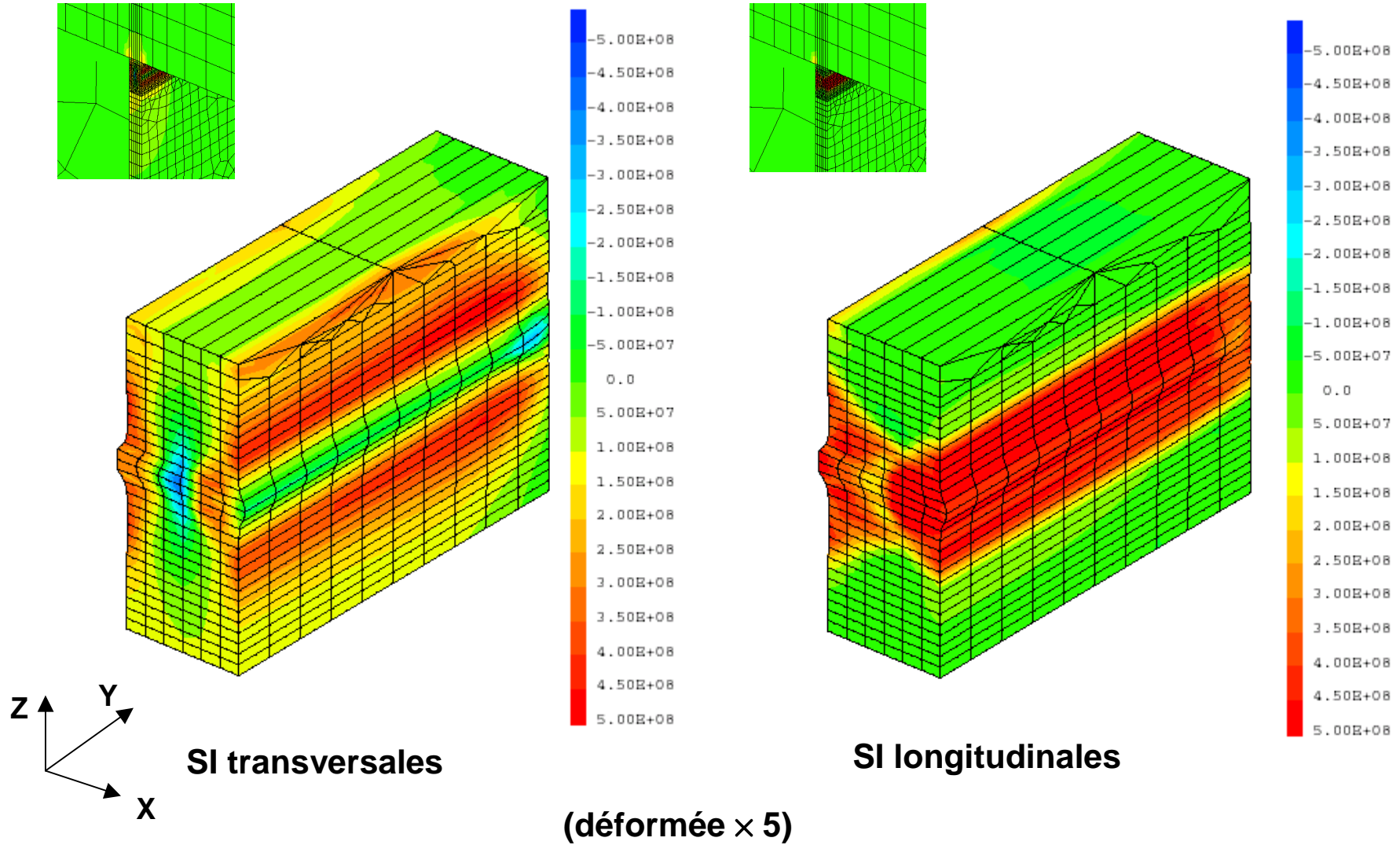


10s  
 Densité volumique de flux de chaleur imposée dans le volume du cordon

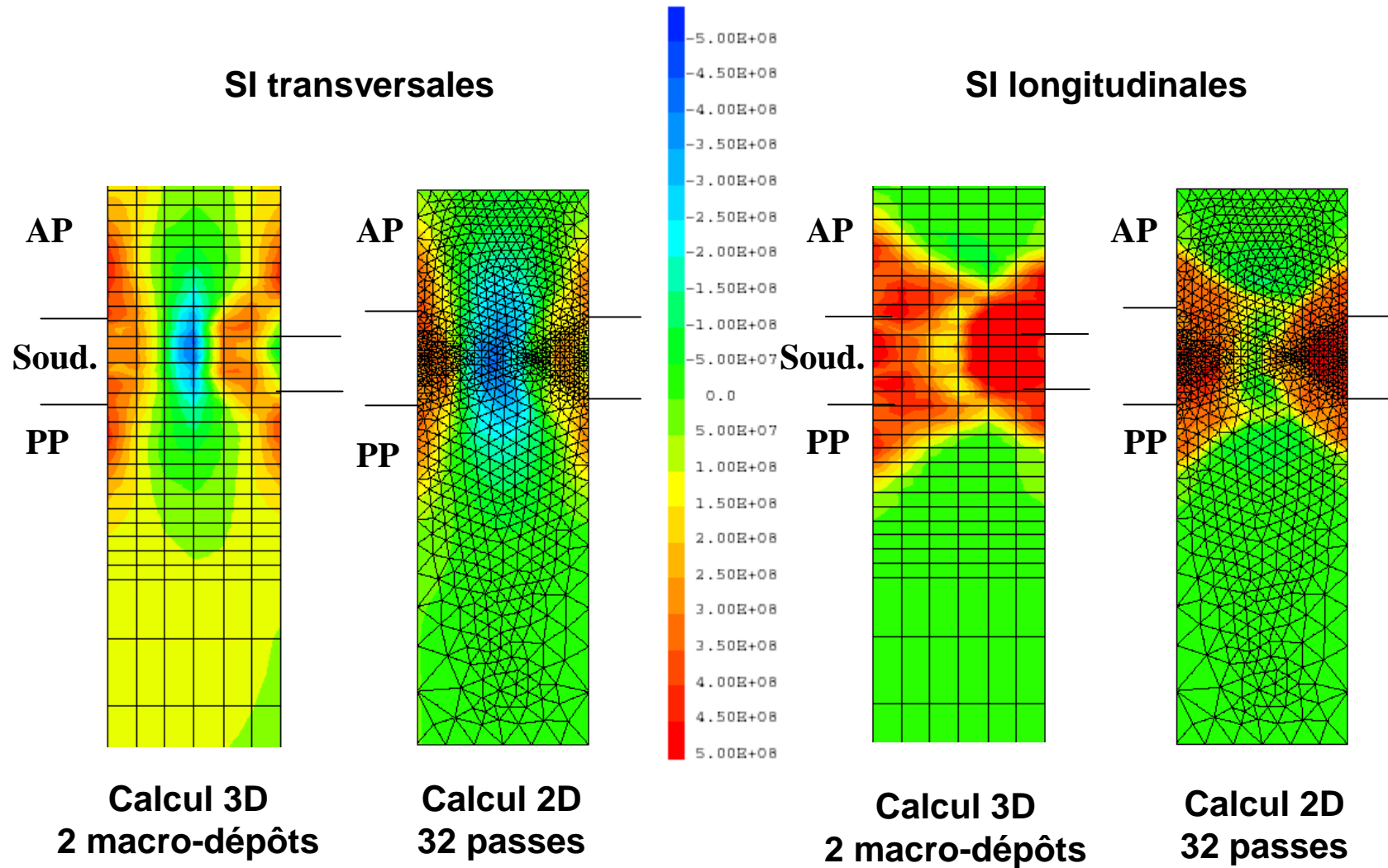




# GV DP 203 1300MWe – Simulations 3D – isovaleurs de contraintes résiduelles



# GV DP 203 1300MWe – Comparaison 3D - 2D isovaleurs de contraintes résiduelles



# Conclusions & Perspectives

---

**Simulation numérique de l'opération de soudage multipasse AP-PP dans les BAE de GV :**

- **Obtention de l'état de contrainte brut de soudage sur modèle 2D en simulant toutes les passes**
- **Transposition sur modèle 3D – groupage des passes en 2 macro-dépôts ; recalage de l'apport de chaleur d'après les résultats 2D**
- **État de contraintes brut de soudage en 3D = état initial pour l'application des chargements correspondants à :**
  - l'épreuve hydraulique
  - l'état permanent