



**MODÉLISATION ET SIMULATION
NUMÉRIQUE DU SOUDAGE**
« 10 ans de progrès en SNS »
22 mars 2012

**Apport de la SNS (méthodologie
et expertise) pour l'étude du
comportement en service de
composants nucléaires**

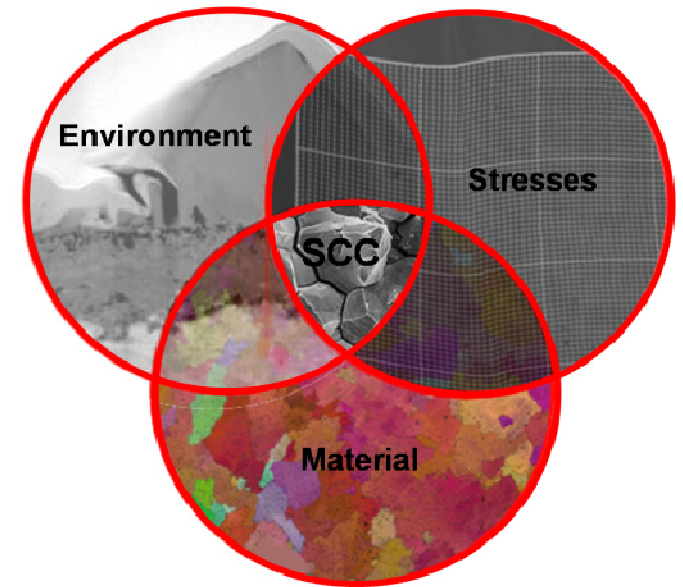
F. Rossillon, L. Depradeux, D. Deforge,
S. Miloudi, E. Lemaire, JP. Massoud



CHANGER L'ÉNERGIE ENSEMBLE

Contexte industriel

- Pour la maîtrise de la durée de vie des centrales REP, la compréhension des mécanismes potentiels de vieillissement et de dégradation des composants du circuit primaire principal (CPP) est essentielle.
- Parmi ces dégradations potentielles , il y a le phénomène de corrosion sous contrainte (CSC) . La CSC résulte de l'action conjuguée
 - d'une contrainte mécanique en tension (résiduelle ou appliquée),
 - d'un milieu agressif vis-à-vis du matériau considéré
 - et d'un matériau sensible
- En milieu REP, la CSC des composants en alliage 600 à base nickel est un problème majeur.

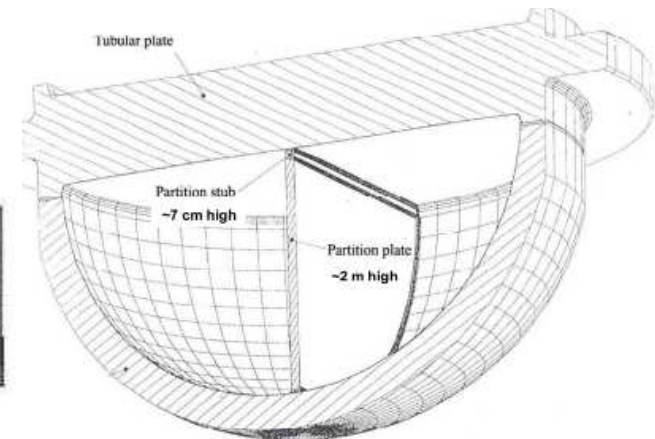
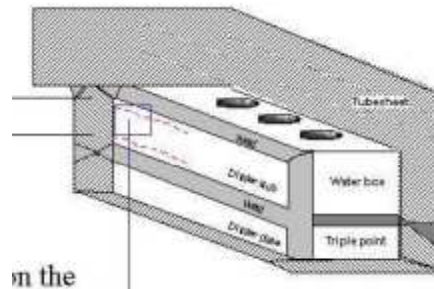


Contexte industriel

- ▶ REX 2002: de nouveau cas de fissuration ont été détectés sur les plaques de partition de certains GV 900MWe en alliage 600 à base nickel
- ▶ Des indications ont été observées à proximité des zones soudées au niveau de l'attente de plaque



Indications par ressuage



- ▶ Un important programme de travail a été engagé dans différents domaines: développement de méthodes END, essais de propagation par CSC, études mécaniques, analyses statistiques, enquêtes de fabrication, etc...
- ▶ Objectif des études mécaniques
 - Amélioration de la connaissance du **comportement en service** des zones soudées en prenant en compte la fabrication (soudage)
 - Utilisation de la SNS pour simuler l'historique thermomécanique et améliorer la connaissance des chargements (contraintes et déformations)
 - Calcul des transitoires de fonctionnement prépondérants sur composants

METHODOLOGIE

Contexte technique

► Modélisation du soudage – pratique habituelle

Maquettes - Mesures

- ✓ Mesures thermiques, thermocouple, etc...
- ✓ Macrographies

- Apport de chaleur
- ✓ source de chaleur équivalente
- ✓ Température imposée

Simulation multi-passes
2D / 3D

Calibration de l'apport de chaleur

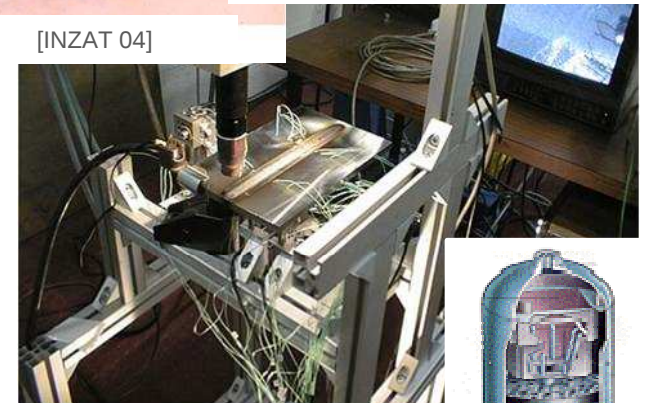
Calcul thermo-mechanique



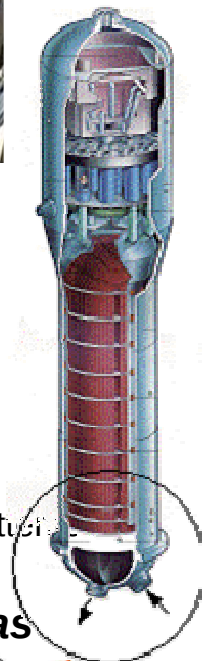
[INZAT 04]



[Ogawa&al09]



[INZAT 04]



► Défi industriel

■ Les soudures sont déjà réalisées...

- Pas d'instrumentation dédiée (pas de mesures thermiques)
- Peu de données spécifiques pour la SNS disponibles (caractéristiques disponibles jusqu'à la température de TTD)

... des données d'entrées manquent

■ Les composants sont de taille importante...

- Le soudage nécessite une description fine du phénomène
- Les transitoires doivent être modélisés sur une structure 3D

- Problème d'échelle entre un générateur de vapeur (GV - 20 m de haut, boîte à eau ~2m) et une atout plaque (AP - 70 mm de long)

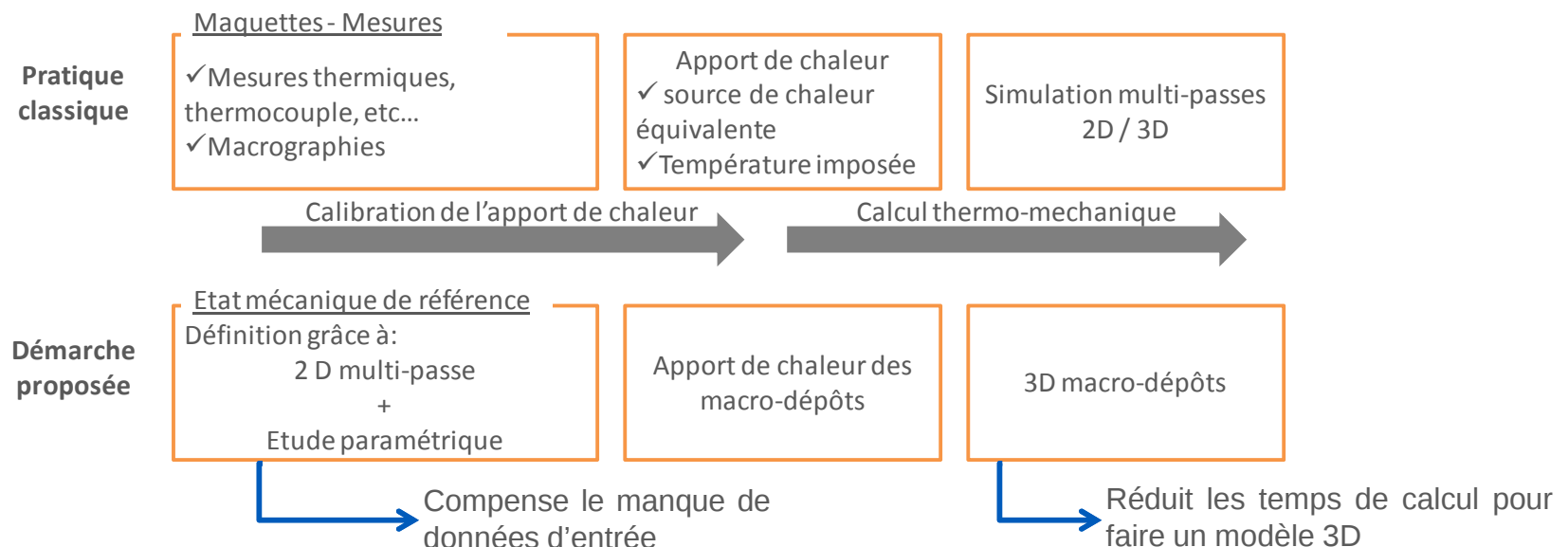
... une modélisation 3D de soudage multipasse sur composant n'est pas réalisable dans un contexte opérationnel

Méthodologie: principes

◆ Objectif: *trouver une alternative plus opérationnelle au sens de l'ingénieur et atteindre le bon compromis*

- Une description **physique du procédé de fabrication** : une définition des champs mécaniques **assez précise**
- un calcul sur un composant pour calculer des transitoires thermo-mécanique : épreuve hydraulique, état permanent etc...

◆ Principe simple - définition d'un modèle 3D simplifié par des **macro-dépôts**



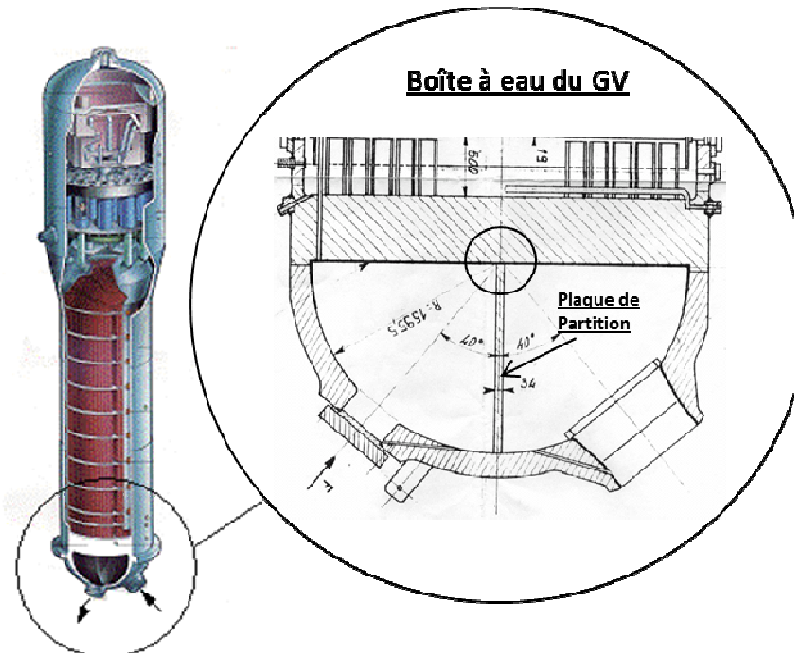
◆ Recherche d'un critère **objectif** dans la définition de l'état mécanique de référence par le choix d'un jeu d'indicateurs mécaniques représentatifs

APPLICATION AUX CAS DES CLOISONS DES GENERATEURS DE VAPEUR

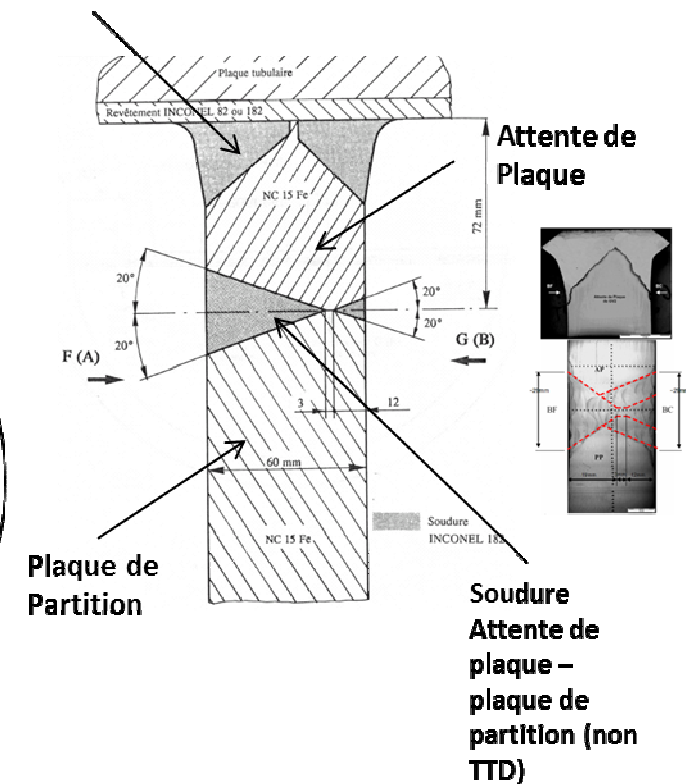
Application industrielle: cloisons de GV

Liaison soudée PP - Plaque de partition - et AP - Attente de plaque - en alliage Inconel 600

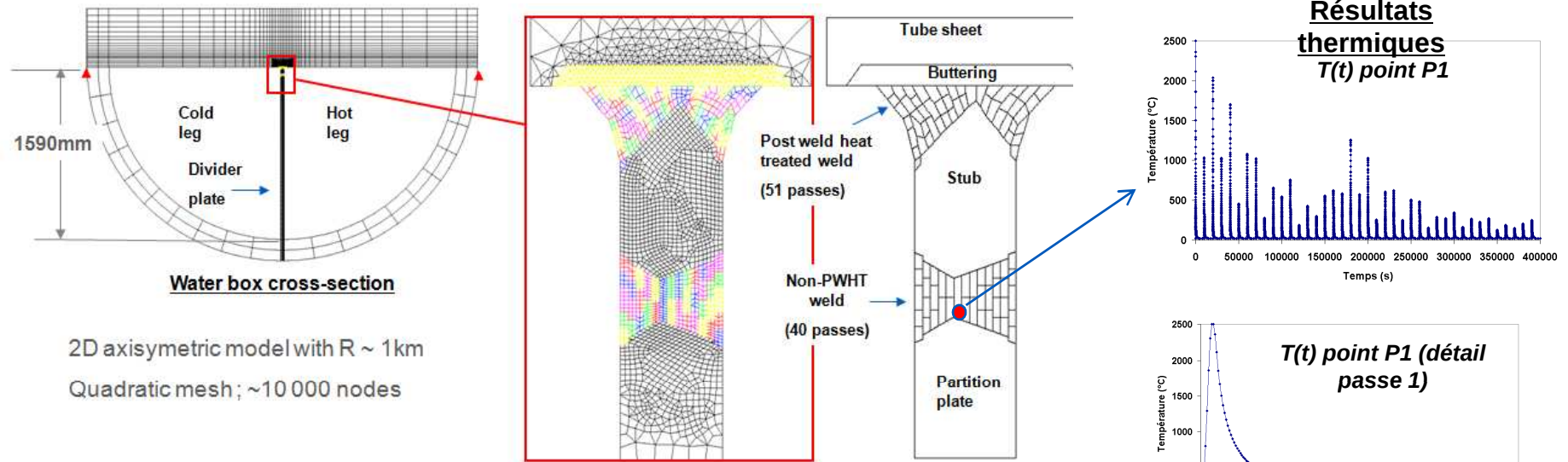
- ◆ Soudage manuel à l'électrode enrobée; $E \sim 7\text{kJ/cm}$
- ◆ Soudage : AP / PT et PP / bol
- ◆ TTD – 600°C pendant 3h00
- ◆ Soudage AP/PP (pas de détensionnement)
- ◆ Epreuve hydraulique



Soudure Attente de Plaque – Plaque à tube (détensionnée)



Définition de l'état de référence – calcul 2D multipasses



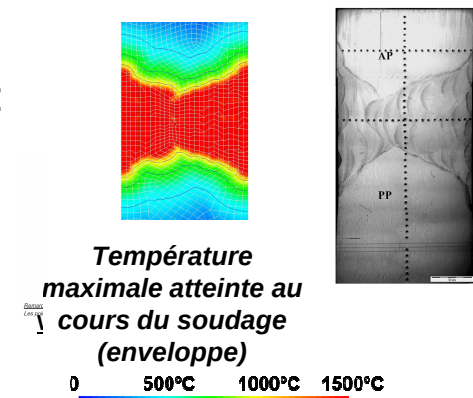
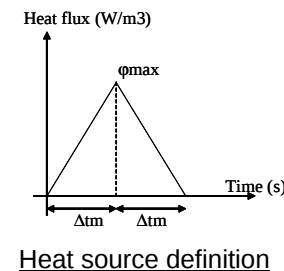
Modélisation 2D multi-passe d'une section transverse (zone courante)

- Données thermophysiques = $f(T)$
- Apport de chaleur déduit des paramètres de soudage (flux imposé):

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(\lambda \cdot \text{grad} T) = G \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{\text{air}}) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{air}}^4) + d(r, t) \end{array} \right.$$

energy
 $E = \eta UI/V \quad (\text{J/m})$

Beads section S (m² × 1 m)
S = surface d'un cordon perpendiculaire à la direction de soudage



Définition de l'état de référence – calcul 2D multipasses

Calcul mécanique des phases de soudage AP-PT et AP-PP

- ◆ Caractéristiques mécaniques = $f(T)$ différentes pour l'AP et la PP
- ◆ Activation des cordons au fur et à mesure de leur dépôt
- ◆ Ecrouissage cinématique

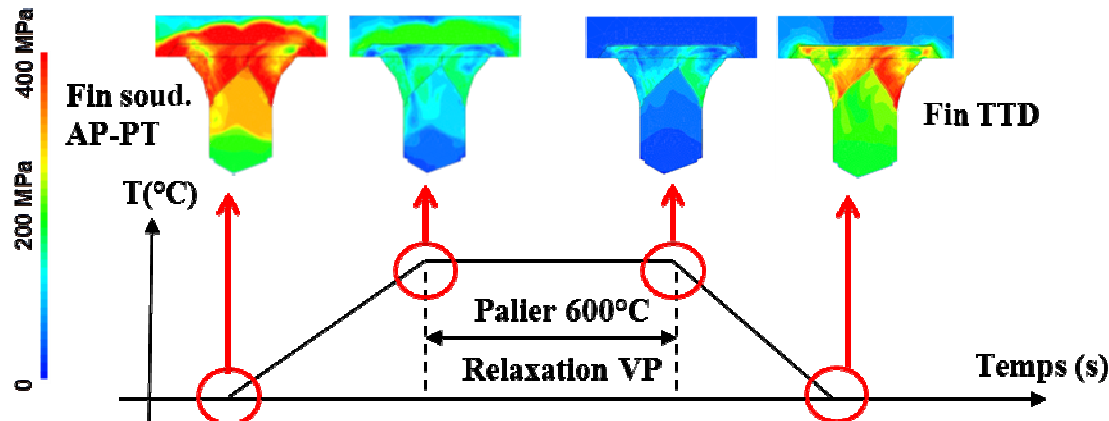
Calcul de la phase de détensionnement AP-PT

- ◆ Modèle viscoplastique de Lemaitre

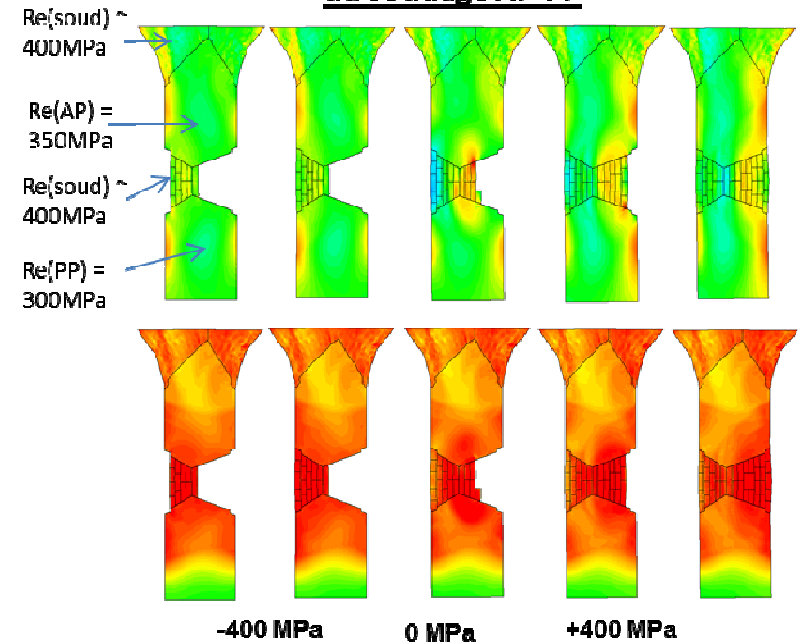
$$\dot{\epsilon}_v = \frac{3}{2} \dot{p} \frac{s}{\sigma_{eq}} \quad \dot{p} = \left(\frac{\sigma_{eq}}{Kp^{1/m}} \right)^n$$

1/K, n, m déduit des courbe de relaxation à 600° C

Evolution du Von Mises lors du TTD – soudure AP-PT

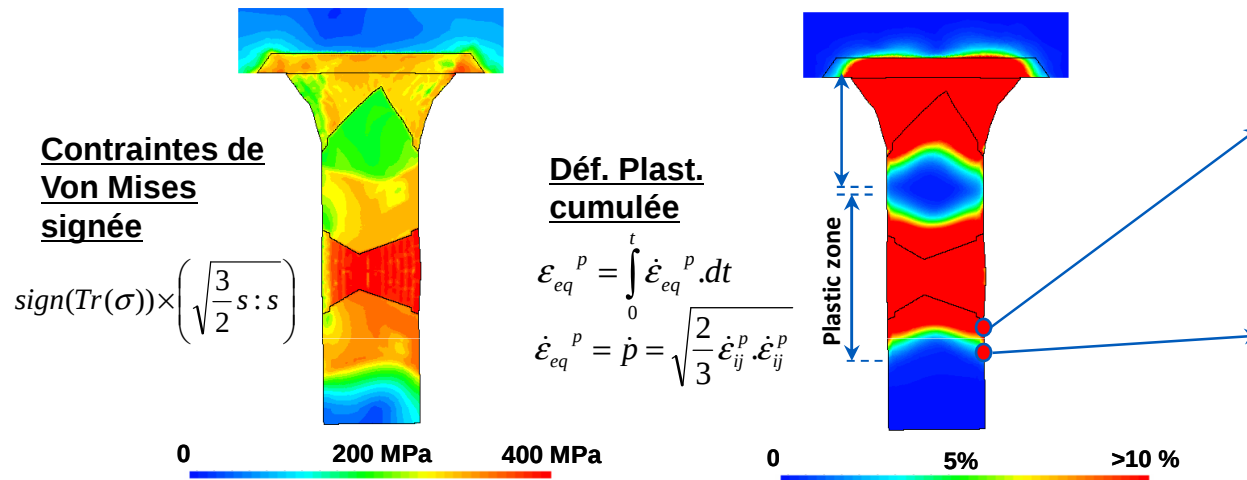


Evolution des contraintes à différente étapes du soudage AP-PP



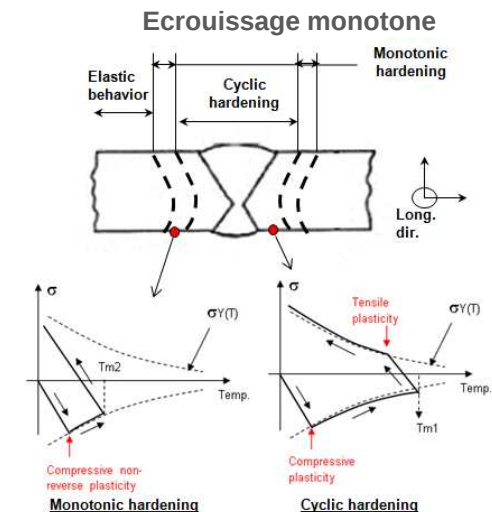
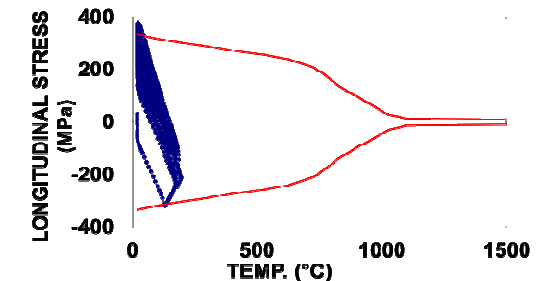
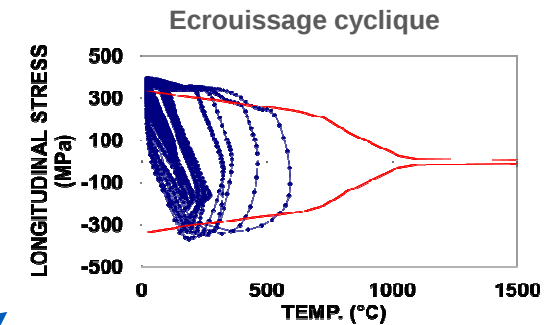
Définition de l'état de référence – calcul 2D multipasses

Détermination d'un ensemble d'indicateurs mécaniques représentatifs de l'état résiduel de soudage :



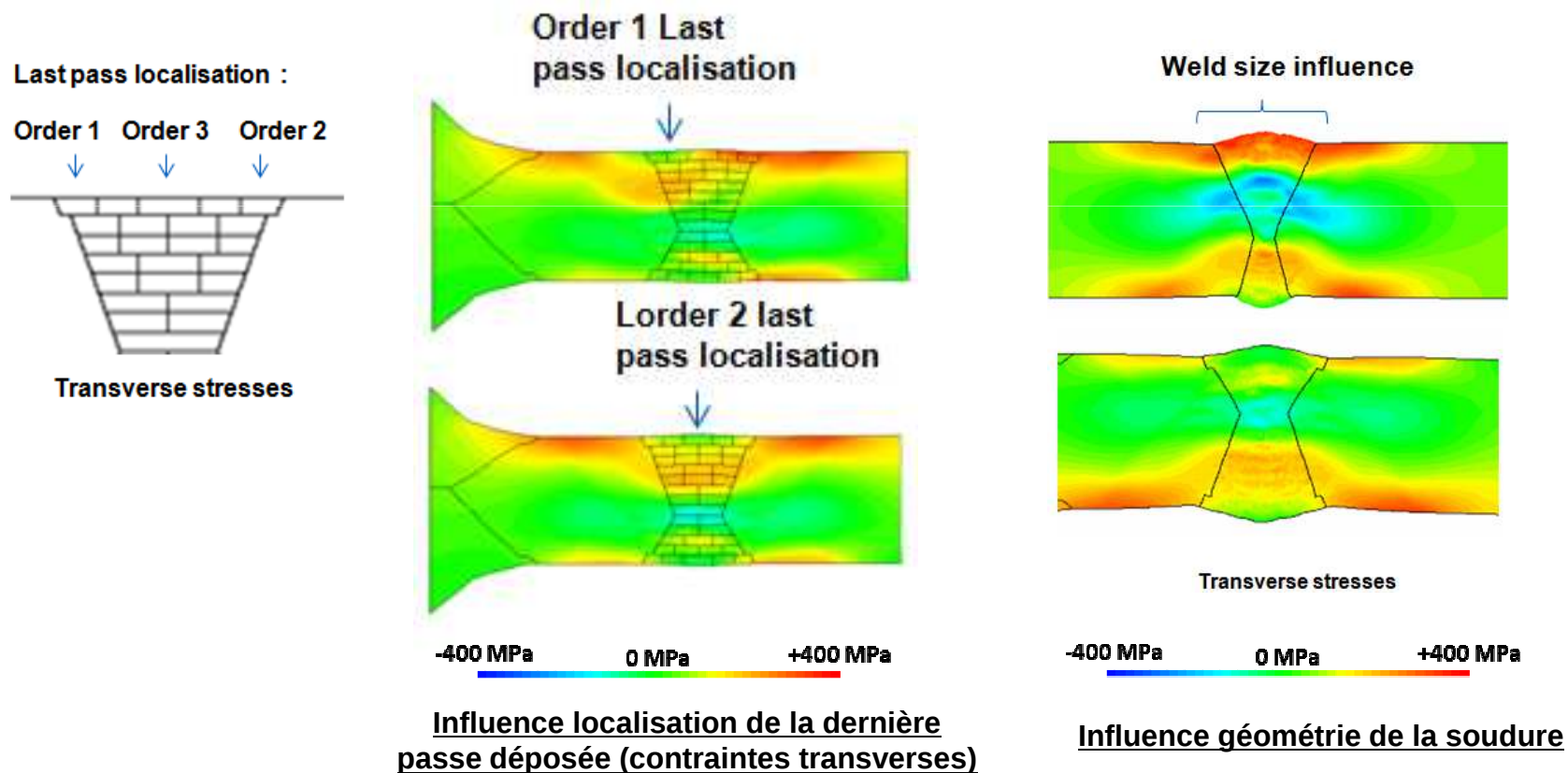
Base metal				
SL	ST	SVM	CPS	PZD
398	313	341	15,3 %	24
Weld				
SL	ST	SVM	CPS	PZD
446	120	476	18,2 %	-
408	98	403	6,80 %	-

SL : Maximal longitudinal stress at the surface (MPa)
 ST : Maximal transverse stress at the surface (MPa)
 SVM: Maximal Von Mises stress at the surface (MPa)
 CPS : Maximal cumulated plastic strain at the surface (%)
 PZD : average dimension of the plastic zone in the base metal (mm)



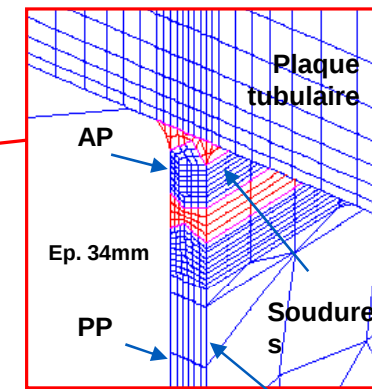
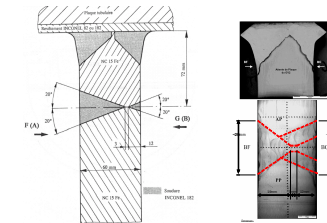
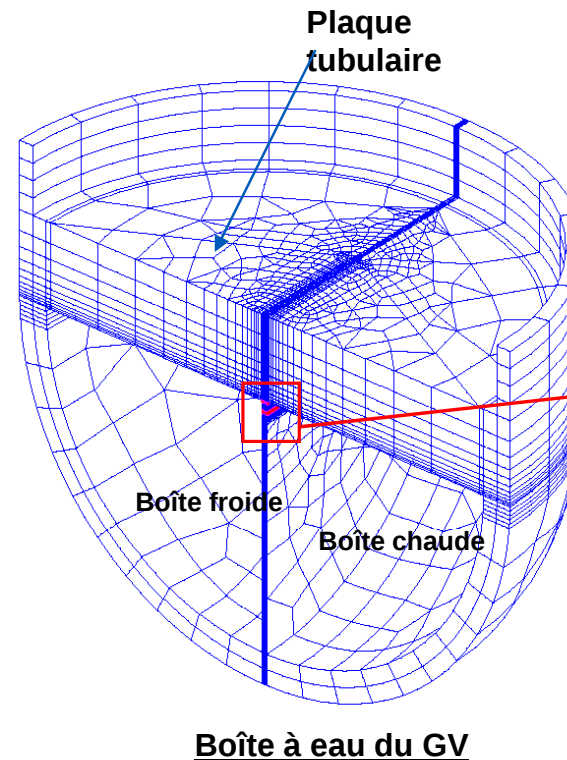
Analyses paramétriques sur modèle 2D

- ▶ Estimer l'influence des paramètres inconnus (ordre des passes, géométrie exacte de la soudure, apport de chaleur, donnée matériaux)
- ▶ Estimer la variabilité des indicateurs mécaniques retenus en fonction des données d'entrée

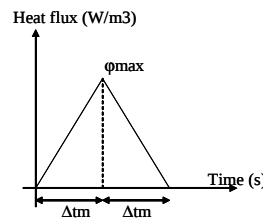


Modèle 3D bol GV

- Obtention de l'état résiduel de soudage sur modèle EF 3D à partir des résultats de référence obtenus en 2D
- Groupage des passes dans des macro-dépôts
- Calibration du flux de chaleur pour correspondre aux résultats du calcul 2D



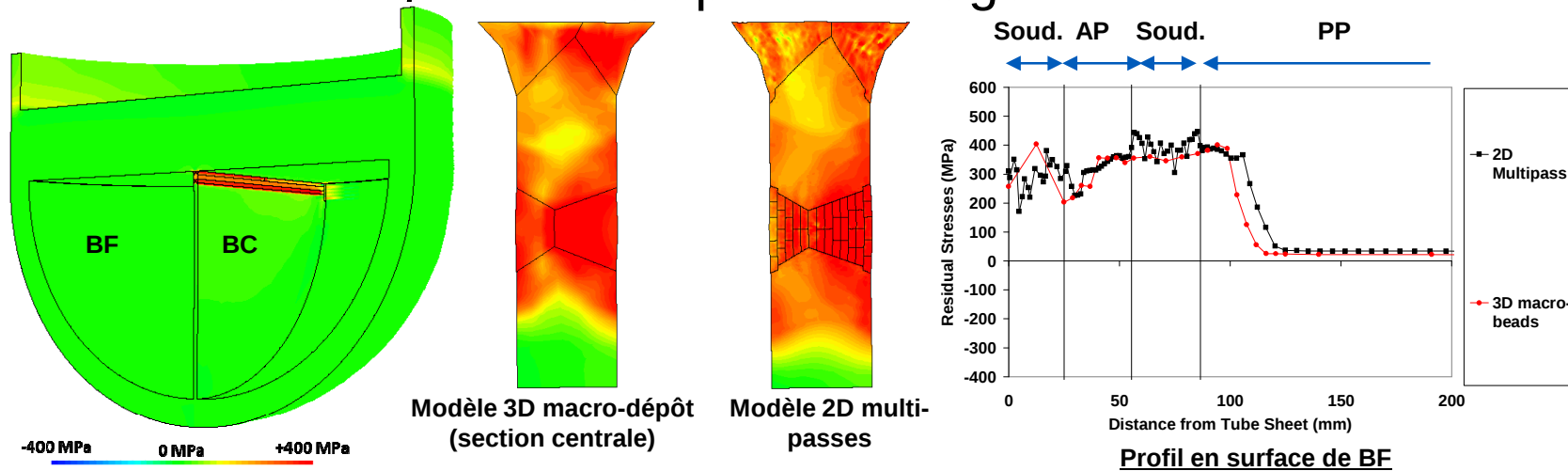
Détail zone soudée



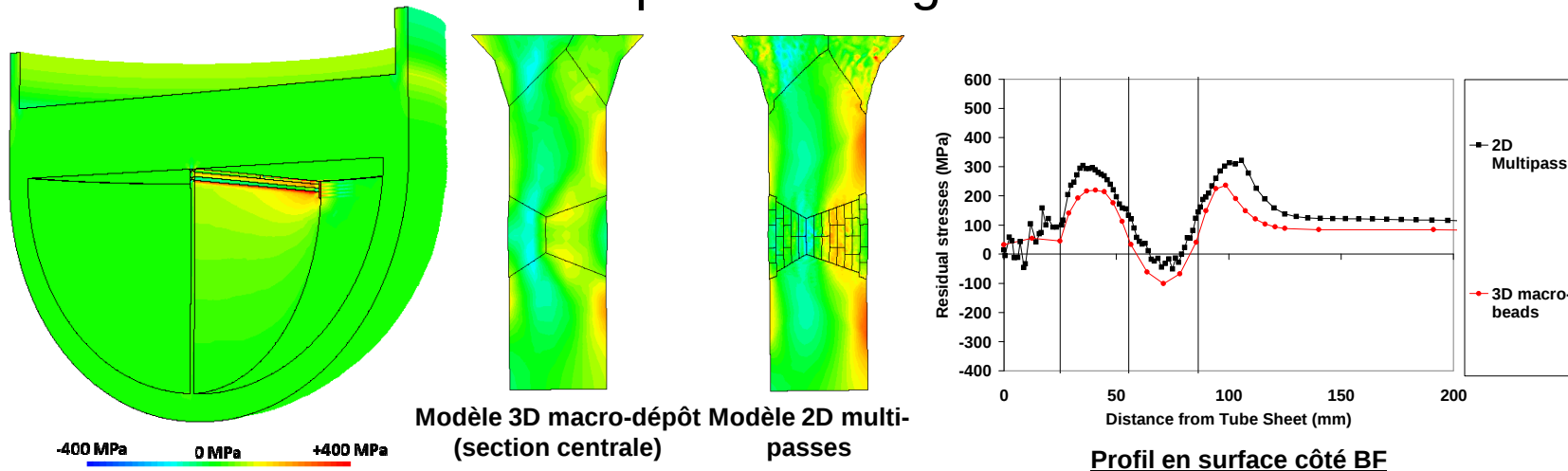
	Métal de base					Métal déposé			
	SL	ST	SVM	CPS	PZD	SL	ST	SVM	CPS
2D Model	398	313	341	15,3 %	24	446	120	476	18,2 %
3D Model	401	236	333	1,73 %	20	408	98	403	6,80 %
Variation	<1%	25%	2.5%		16%	8%	15%	15,3%	

Calcul mécanique 3D – Etat résiduel de soudage

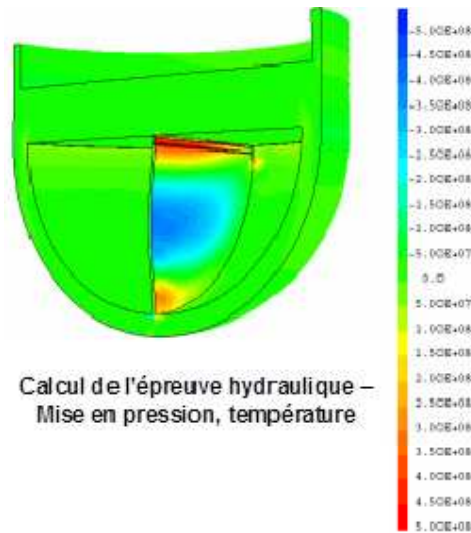
► Contraintes longitudinales après soudage



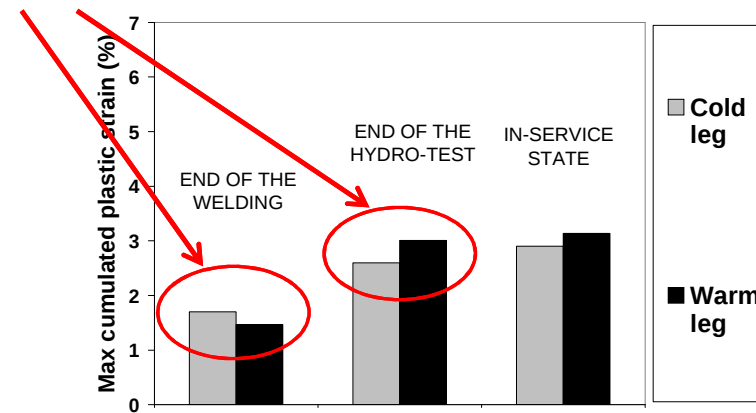
► Contraintes transverses après soudage



Calcul mécanique 3D – Influence de l'épreuve hydraulique



Evolution de la plasticité lors de l'épreuve

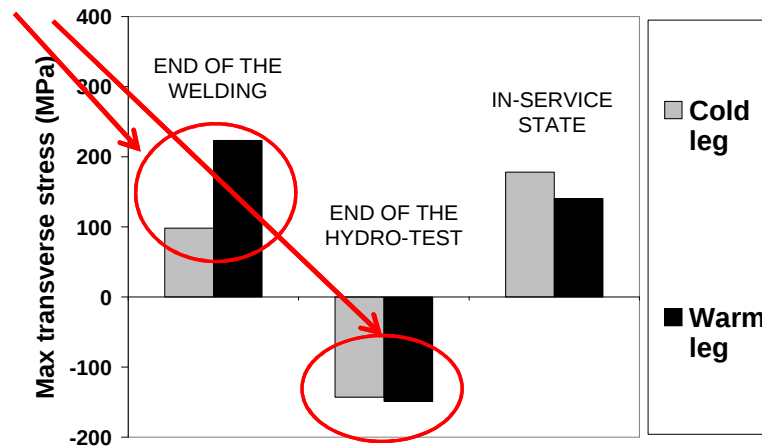


Evolution de la déformation plastique cumulée dans l'AP (soudage, épreuve, état permanent)

Effet de l'épreuve hydraulique:

- Mise en traction de la cloison
- Flexion de la cloison lié au différentiel de pression BC-BF
- Interaction complexe avec l'état résiduel de soudage (contraintes et déformations)

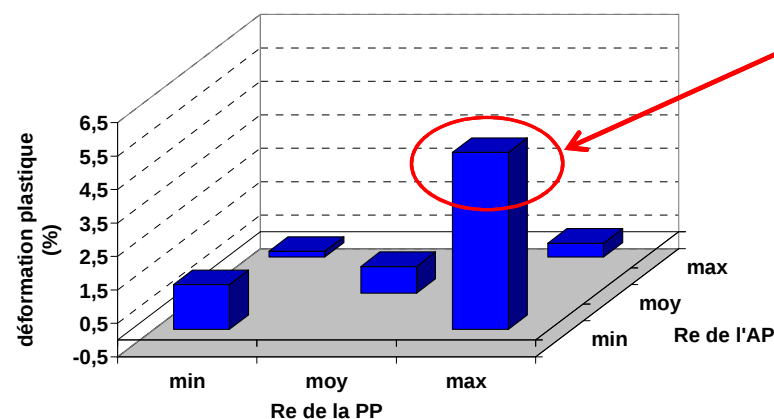
Forte redistribution des contraintes transverses



Evolution de la contrainte transverse maximale

Apport des calculs

- Obtention des champs mécaniques dus au soudage (contraintes et déformations en surface et dans l'épaisseur, zones plastifiées monotones et cycliques...)
- Variabilité des indicateurs mécaniques en fonction des données d'entrée : ordre des passes, apport de chaleur, géométrie...
- Influence de l'épreuve hydraulique sur la redistribution des champ mécaniques :
 - redistribution des contraintes résiduelles
 - augmentation de la déformation plastique, concentrée dans l'AP
 - influence de la différence de R_e entre l'AP et la PP sur l'intensité de la plasticité lors de l'EH



Cas le plus critique :
- $R_e(AP)_{min}$
- $R_e(PP)_{max}$

Plasticité max dans l'AP en fonction du R_e de l'AP et de la PP

COMPARAISON AVEC LES EXPERTISES SUR LES GV DÉPOSÉS

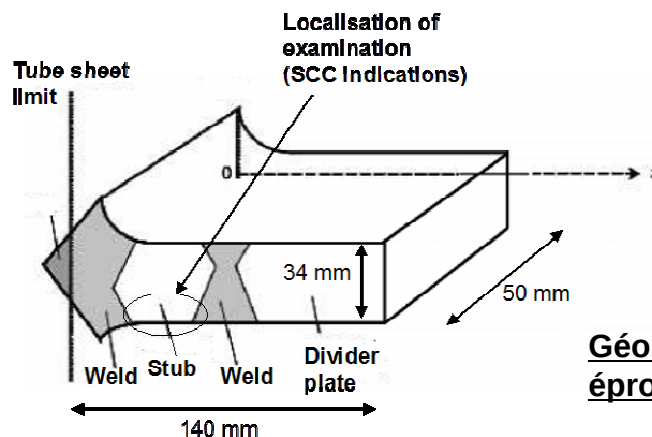
Deux GV déposés – expertise CEIDRE 2007

► GV déposés

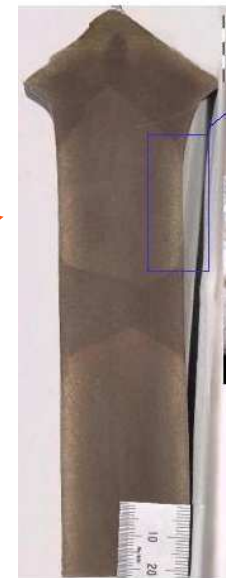
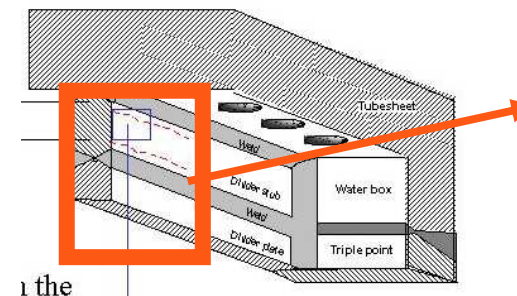
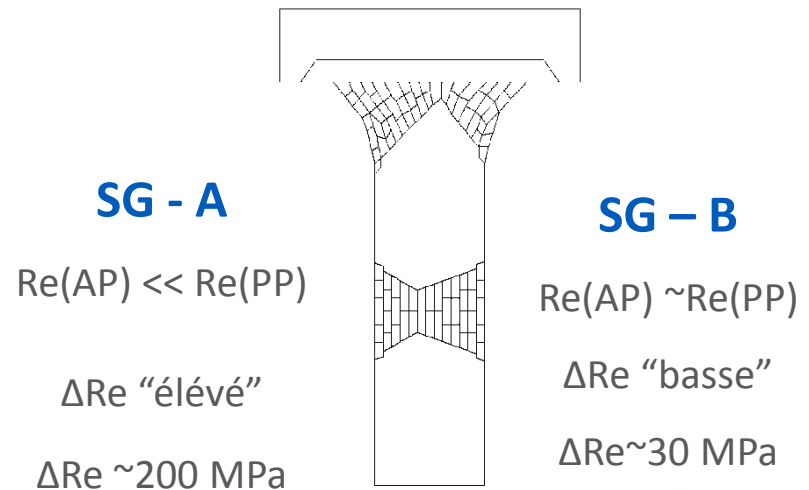
- Réalisation de calculs dédiés
 - Calcul dédié avec les données matériaux adaptées
 - Différence de limite élastique $\Delta Re = Re(PP) - Re(AP)$

► Etapes de chargement (calcul)

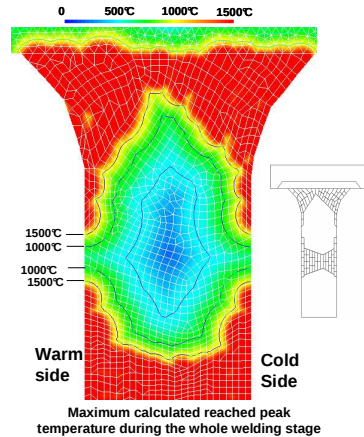
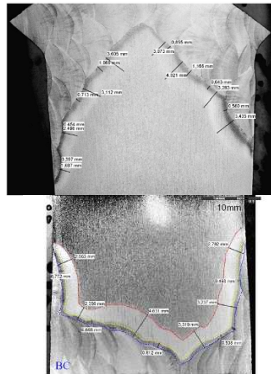
- Soudage : AP / PT + TTD
- Soudage : AP / PP
- Epreuve hydraulique
- Etat permanent
- **Découpe de l'échantillon**
– (relaxation des contraintes)



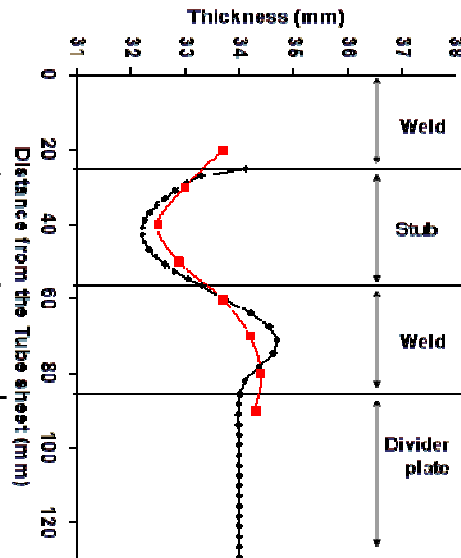
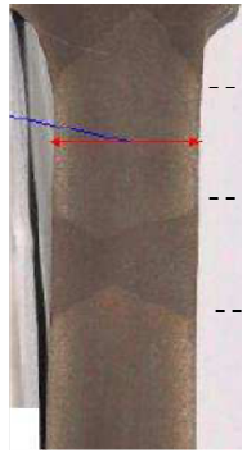
Géométrie des échantillons prélevés



Expertises sur GV déposés



- Calculs thermiques 2D multi-passes – sans mesures thermique disponibles
- Estimation des isothermes à 1000° C / (température estimée de dissolution des carbures)

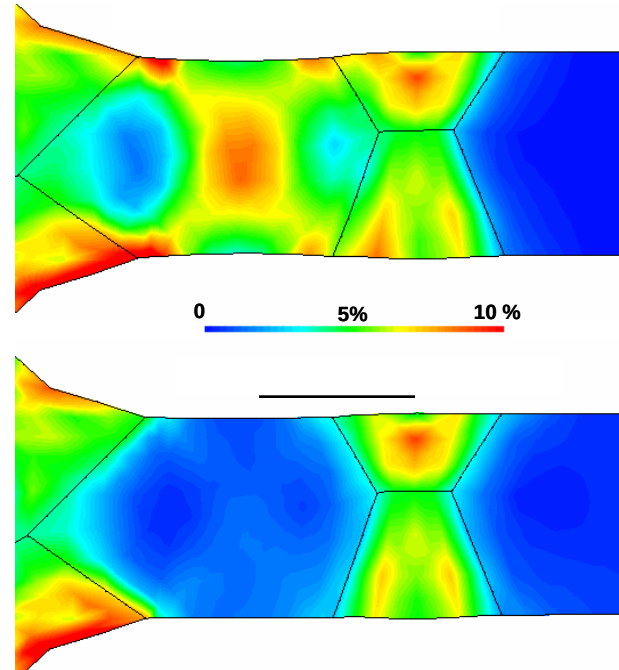
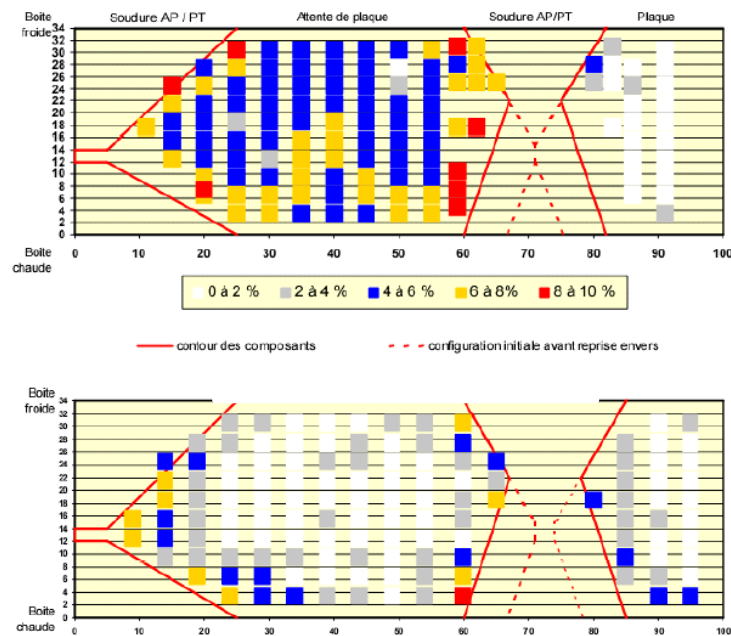


SG – A
computed

SG – A
measured

- Calculs 3D
- Prédiction de la striction de l'AP due à l'épreuve hydraulique – GV avec $\Delta Re \sim 200$ MPa

Comparaison des résultats d'expertise avec les résultats numériques



$\Delta Re \sim 200 \text{ MPa}$

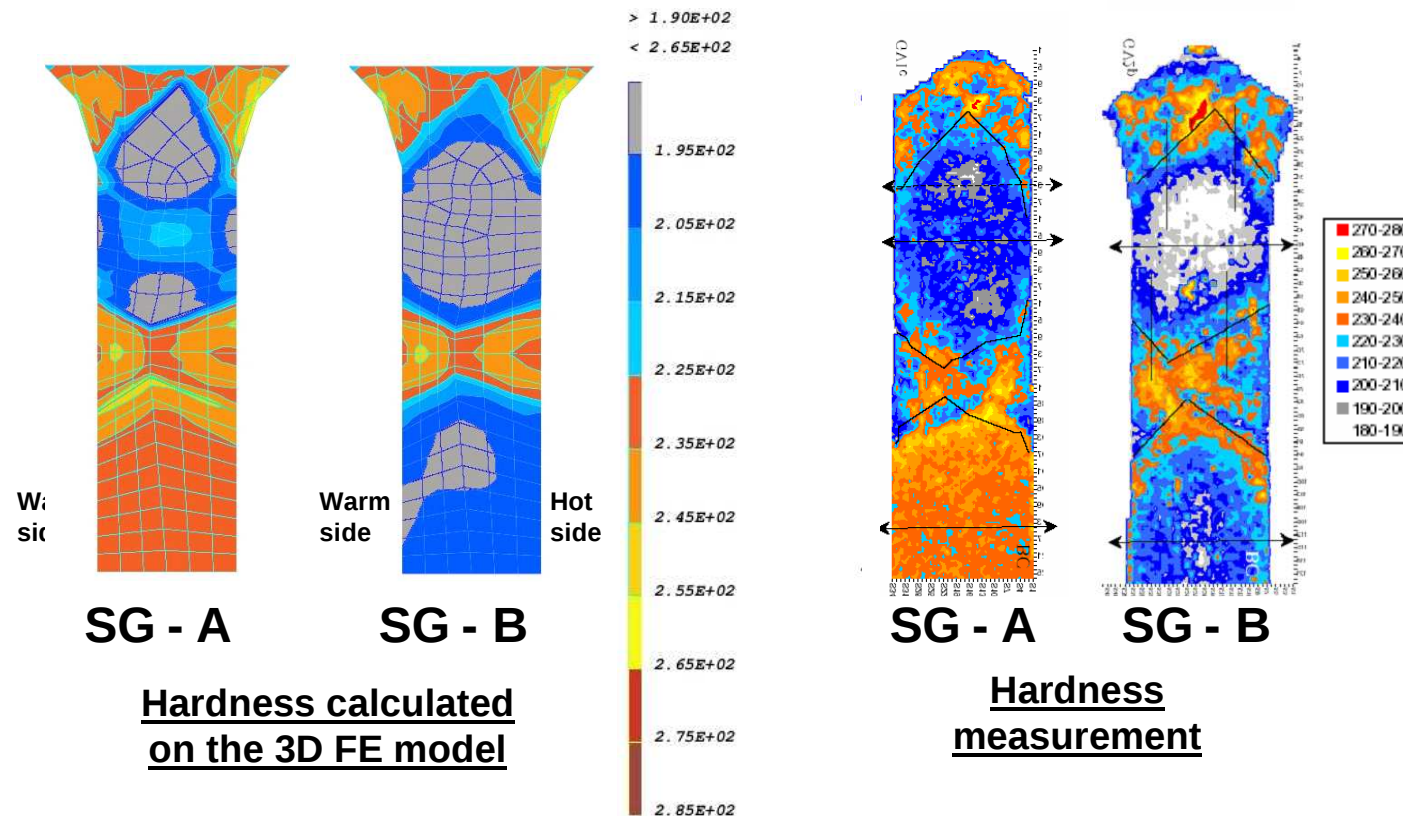
$\Delta Re \sim 30 \text{ MPa}$

Mesures d'écrouissage dans l'AP par mesures DN – ILL SALSA

→ Des courbes de calibration permettent de lier la largeur de corde mesurée avec le niveau d'écrouissage.

Déformations plastiques cumulées calculées sur modèle 3D SNS

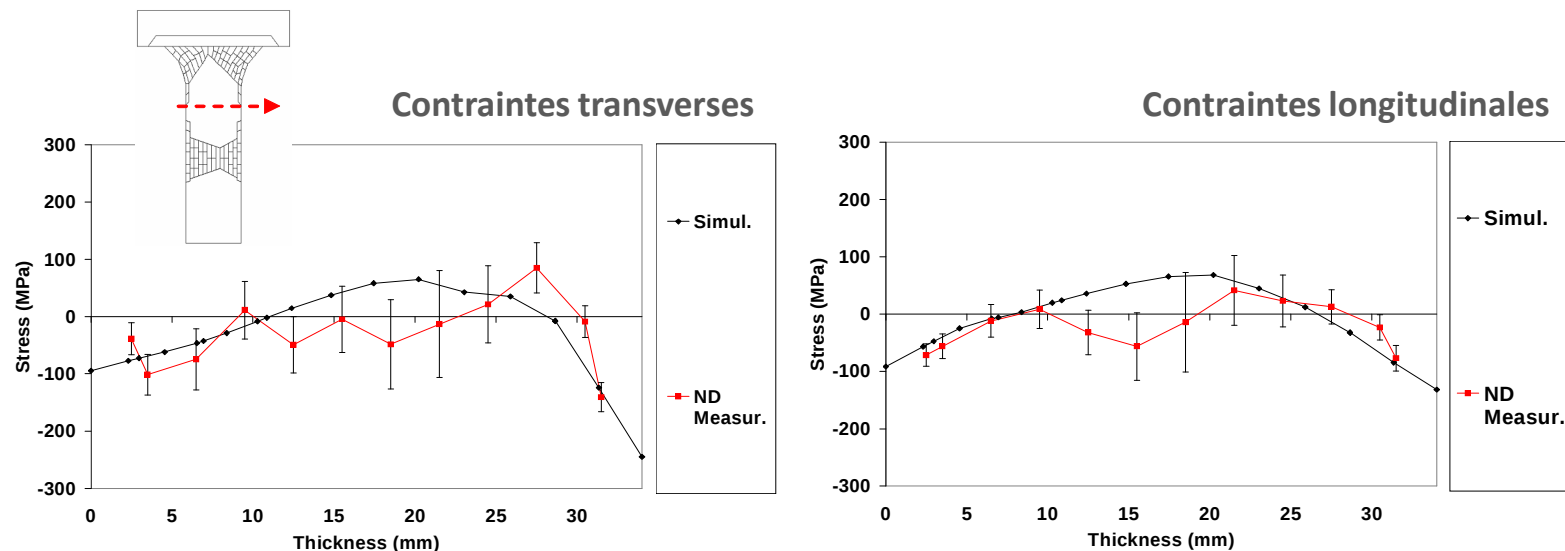
Comparaison des résultats d'expertise avec les résultats numériques



- ▶ Comparaison des duretés calculées (relation S_y -Dureté) et mesurées sur les 2 configurations (GV A et 2)
- ▶ Confirmation du rôle du ΔRe sur l'écrouissage généré lors de l'EH

Comparaison des résultats d'expertise avec les résultats numériques

- ▶ Comparaison avec des mesures de diffraction neutronique (ILL-Salsa instrument) – GV A



- ▶ Malgré un niveau de contrainte assez faible, du à l'effet de la découpe de l'échantillon, et des incertitudes de mesures importantes, un bon accord calcul mesure est constaté au centre de l'AP
- ▶ Des mesures complémentaires sont en cours

Conclusions

► Une méthode simplifiée de prise en compte du soudage a été développée:

■ Simplifiée:

- Par la prise en compte du soudage par un calcul simplifié sur un composant – utilisation de macro-dépôts qui réduit le nombre de passes et donc la taille du modèle
- Elle permet le calcul de transitoire thermomécanique lors du fonctionnement et améliore la connaissance du comportement **en service** des gros composants sur une structure 3D

■ Industrielle:

- Utilisation d'un critère « objectif » permettant de décrire un état de référence
- Permet de palier au manque de données : un calcul est possible même si l'intégralité des données n'est pas disponible

■ Assez largement consolidée:

- sur un cas industriel des cloisons des générateurs de vapeur et par les apports récents des expertises destructives sur composant

■ Méthode générale, la démarche peut être appliquée à d'autres zones d'étude.

Conclusions et perspectives

► Appliquée aux cas des cloisons des générateurs de vapeur 900MWe, ces études ont montré que:

- Par comparaisons aux expertises destructives, les étapes de chargement prépondérantes sur l'état mécanique en fin de vie du GV sont prises en compte dans la simulation,
- Les contraintes résiduelles de soudage sont redistribuées par l'épreuve hydraulique réglementaire relatives aux appareils à pression,
- L'épreuve hydraulique a un effet prépondérant sur le niveau d'écrouissage de l'attente de plaque (suivants les caractéristiques mécaniques des cloisons des GV), elle induit une **pré-déformation** de l'AP.
- Ces résultats rejoignent les travaux actuels de R&D sur l'endommagement par CSC qui essayent d'intégrer les effets de la déformation en plus de celui de la contrainte

► Perspectives d'évolution

- Pour une compréhension plus fine des phénomènes, il est nécessaire d'améliorer les modèles de prévision des déformations, dans le métal de base et le métal déposé: restauration d'écrouissage, etc...
- La méthode simplifiée présentée est une alternative à de coûteuses simulations 3D multipasse. Cette démarche pragmatique est applicable à d'autres zones et peut permettre une diffusion/utilisation plus rapide de l'outil SNS dans l'industrie