AREVA

Caractérisation du risque de fissuration à froid lors du soudage

Christophe PRIMAULT, Jeanne SCHROEDER
AREVA NP, Centre Technique, Département Soudage, SAINT MARCEL
Florence GOMMEZ
AREVA NP, Département d'Ingénierie mécanique de Lyon, Secteur Réacteur, LYON

AREVA

Plan

- **La fissuration à froid et l'essai sur implant**
  - **Le contexte AREVA**
  - **Apports de la SNS**
- **Calcul mécanique de la mise en charge de l'implant**
  - **Modélisation**
  - **Analyse des déformations**
  - **Analyse des contraintes**
- **Calcul de diffusion de l'hydrogène**
  - **Modélisation thermique**
  - **Modélisation mécanique**
  - **Diffusion d'hydrogène**
- **Conclusions et Perspectives**

Plan

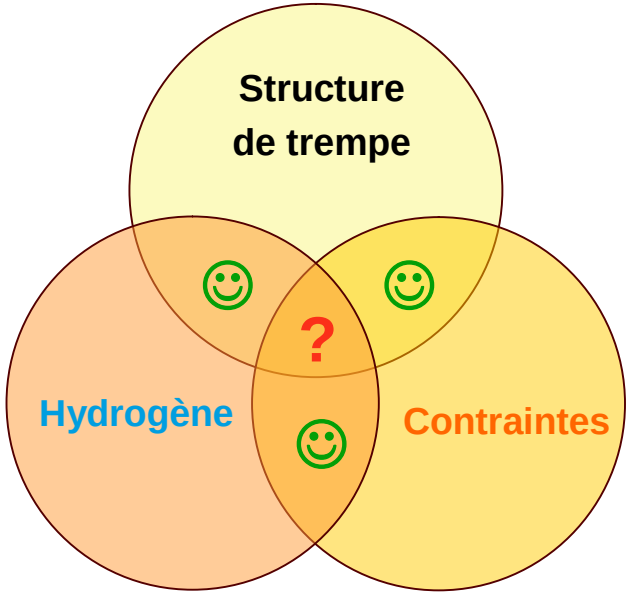
- **La fissuration à froid et l'essai sur implant**
  - **Le contexte AREVA**
  - **Apports de la SNS**
- **Calcul mécanique de la mise en charge de l'implant**
  - **Modélisation**
  - **Analyse des déformations**
  - **Analyse des contraintes**
- **Calcul de diffusion de l'hydrogène**
  - **Modélisation thermique**
  - **Modélisation mécanique**
  - **Diffusion d'hydrogène**
- **Conclusions et Perspectives**

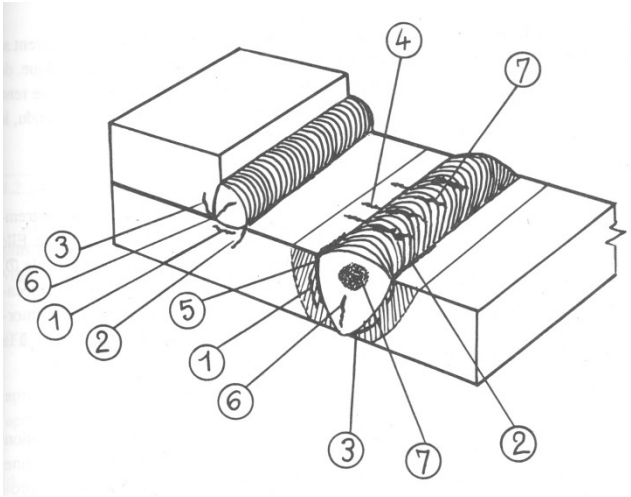
La fissuration à froid

- **Origine de la fissuration à froid**
  - **3 facteurs simultanés**
  - **Un niveau critique**

- **3 facteurs influents**
  - **Structure de trempe**
    - Composition chimique (C_{Eq})
    - Vitesse de refroidissement $t_{8/5}$
  - **Hydrogène**
    - Origine : produit d'apport, air ambiant, pièce
    - Diffusion (phases en présence, température, …)
  - **Contraintes internes**
    - Bridage lors du retrait au refroidissement

- **Des tests existent pour en évaluer le risque**

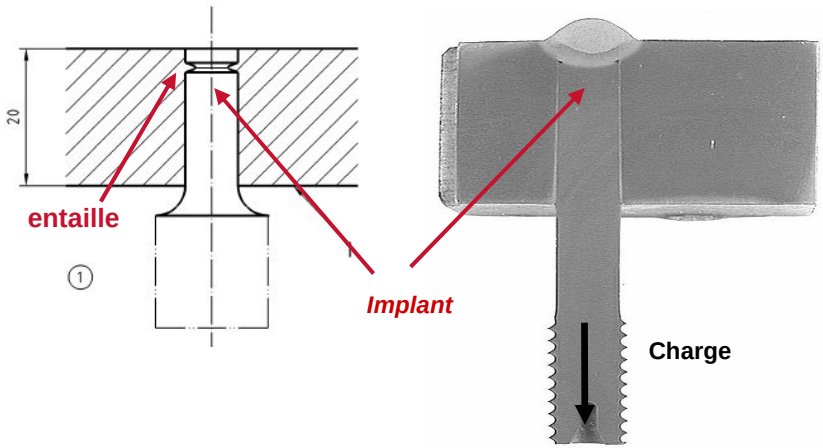


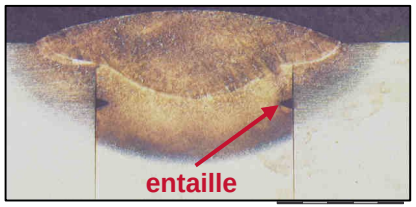


AREVA

L’essai sur implant

- **Essai pour déterminer la sensibilité à la fissuration à froid des matériaux de base lors du soudage à l'arc**
  - **Essai normalisé (NF EN ISO 17642-3) monocordon sous charge extérieure avec zone de concentration de contraintes (entaille). Ex : passe de racine**





  - **Détermination des limites de fissuration/non-fissuration : apport de chaleur, température de préchauffage, température/temps de postchauffage, teneur en hydrogène diffusible, contrainte appliquée**
  - **Essai à la base de nombreuses préconisations de soudage (RCC-M, règles AREVA, …). Il fait toujours référence.**

Contexte AREVA

- **Soudage dans l'industrie nucléaire**
  - **Aciers trempants (faiblements alliés, non alliés)**
  - **Fortes épaisseurs (cycle thermique, ségrégations, …)**

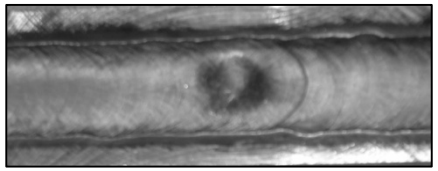
  ⟹ **Impositions des codes : peu de "marge de manœuvre"**

- **Des préconisations ou impositions "anciennes " pour le soudage**
  - **pouvant dans certains cas s'avérer trop conservatives ?**
  - **toujours d'actualité malgré l'évolution des matériaux, des produits d'apport, des procédés… ?**
  - **d'application parfois difficile (interventions sur site)**

- **Une volonté pour AREVA de maîtriser toujours mieux ses fabrications , de s'ouvrir de nouvelles portes pour améliorer ses process de fabrication et de réparation**
  - **Réalisation d'essais instrumentés pour une meilleure compréhension et analyse**
  - **Développement d'outils de simulation prédictifs**

Aide de la SNS face à la problématique " fissuration à froid"

Outil justificatif sur des cas particuliers



- **Exemple : Essais sur implants en vue d'intégration au RCC-M d'une technique de réparation ASME**
  - Contexte : Dépôt austénitique sur acier faiblement allié
  - Difficulté de l'essai : affaissement du cordon de soudure à la mise en charge
  - Problématique : réduire la charge, mais quelle validité conserve l'essai ? Reste-t-on conservatif ?

Développement d'outils prédictifs et d'aide à la compréhension

- **Modélisation multiphysique du soudage en vue d'intégration de critères de fissuration/non-fissuration**
  - Applications exhaustives : différents matériaux, et configurations d'assemblages multipasses et procédés de soudage
  - Détermination de conditions de soudage assurant la non fissuration, et/ou réduction du nombre d'essais
- **1ère application à l'essai d'implant en vue de corrélations essai/simulation**

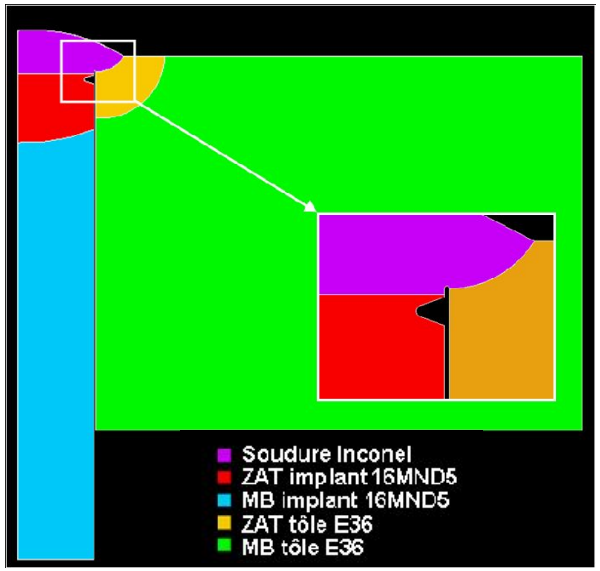
Plan

- La fissuration à froid et l'essai sur implant
  - Le contexte AREVA
  - Apports de la SNS
- **Calcul mécanique de la mise en charge de l'implant**
  - **Modélisation**
  - **Analyse des déformations**
  - **Analyse des contraintes**
- Calcul de diffusion de l'hydrogène
  - Modélisation thermique
  - Modélisation mécanique
  - Diffusion d'hydrogène
- Conclusions et Perspectives

Description du cas simulé

Modèle

- 2D axisymétrique, calcul mécanique, T° ambiante
- Implant (r=4 mm) + tôle (ep=20 mm) + soudure (r=5.5 mm)
- Maillage raffiné dans les zones d'entaille

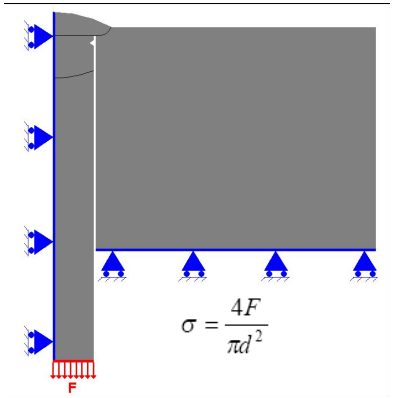


Matériaux

- prise en compte de la ZAT : 5 zones ↔ cpt matériau ≠
- Lois EP - écrouissage isotrope non linéaire

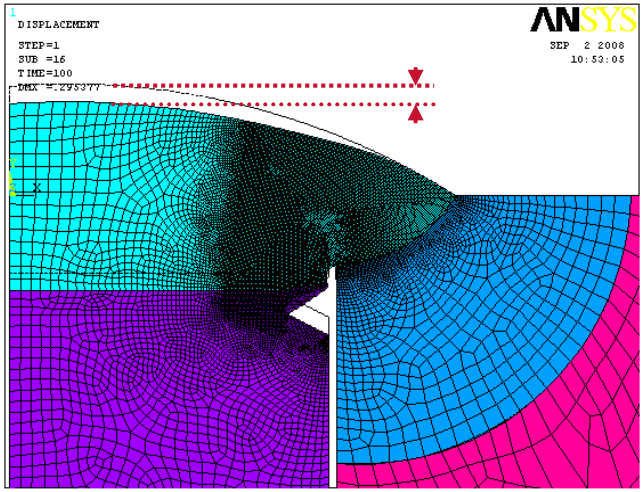
Chargement

- Charge appliquée en bas de l'implant
- Charge diminuée / charge nominale=σ_e=500 MPa
- 3 niveaux :
  - F_1 = 11 550 N => 300 MPa, soit -40%
  - F_2 = 13 050 N => 340 MPa, soit -30%
  - F_3 = 15 390 N => 400 MPa, soit -20%

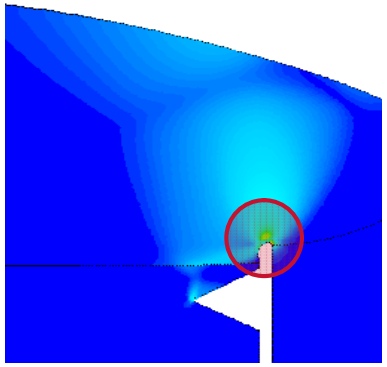
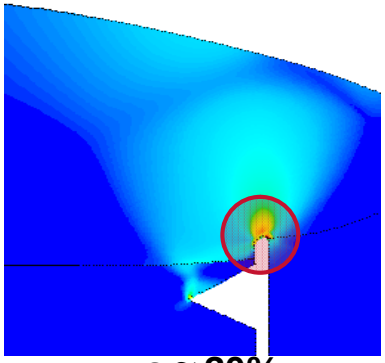
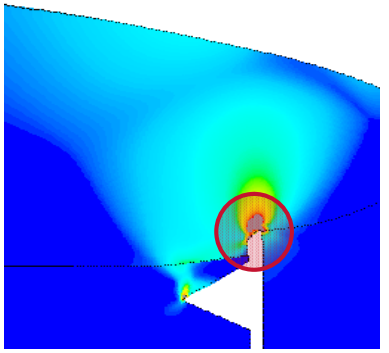


Analyse des déformations

- **Déformée globale**
  - Effondrement de la soudure
  - Confirmation des résultats expérimentaux



- **Localisation de la déformation**
  - Dans la zone de raccordement tôle / soudure / implant

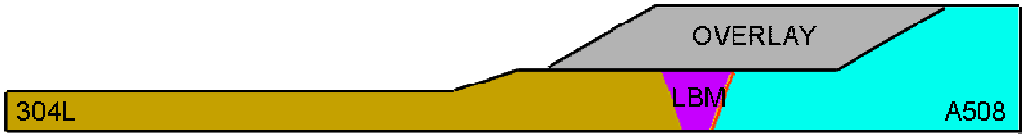
Charge appliquée	F_1 ; - 40%	F_2 ; - 30%	F_3 ; -20%
Calcul	 ε < 20%	 ε ≈ 30%	 ε > 40%
Essai	Pas d'affaissement	affaissement	affaissement

Estimation des contraintes rencontrées lors de l'overlay

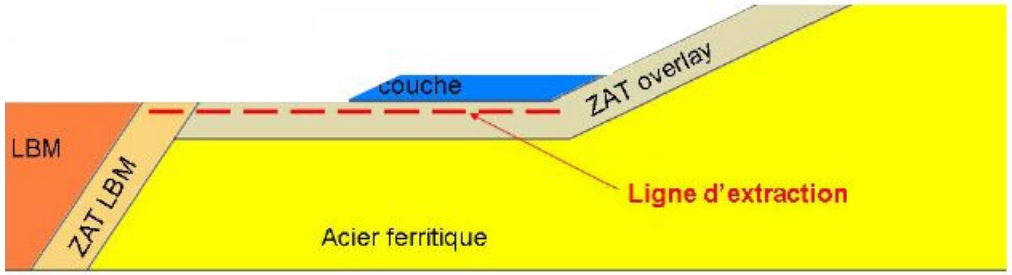
Ré-exploitation d'une SNS – contraintes résiduelles

Calcul thermo-mécanique-métallurgique *[Courtin, 2006]*

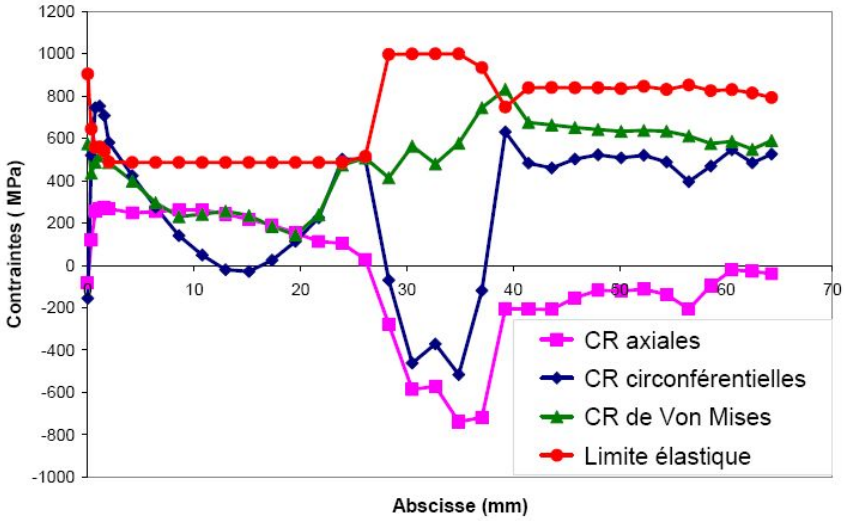
- Usinage
- Beurrage
- Soudage multipasse LBM
- Dépôt Overlay



Profil de contrainte en ZAT overlay, 1ère couche, milieu de dépôt

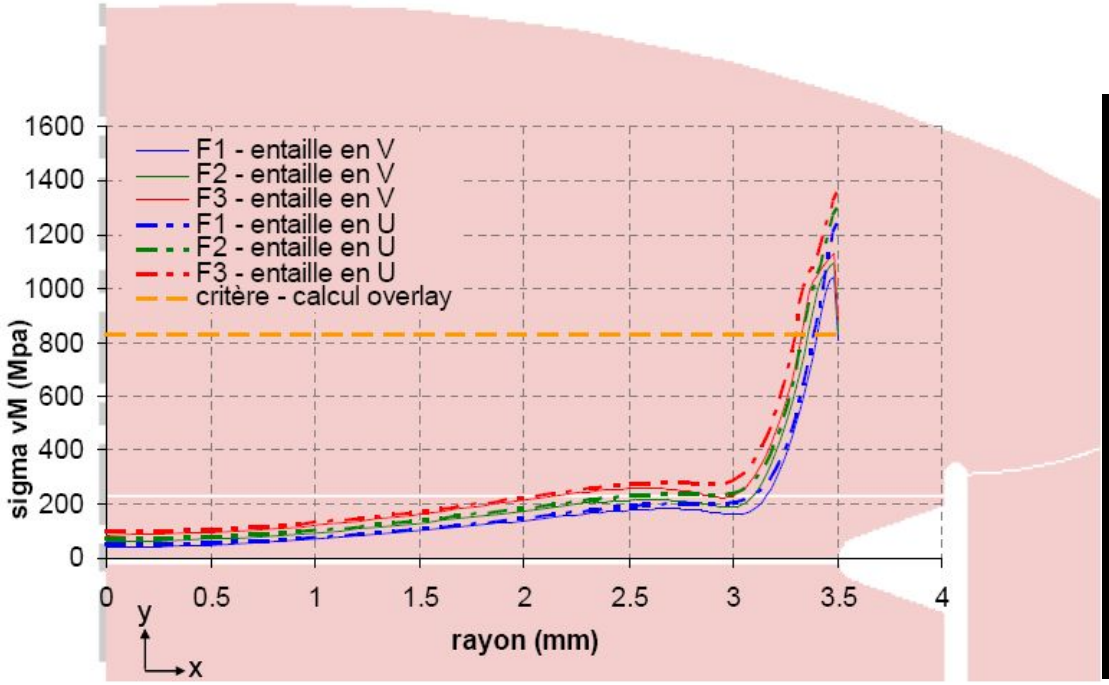


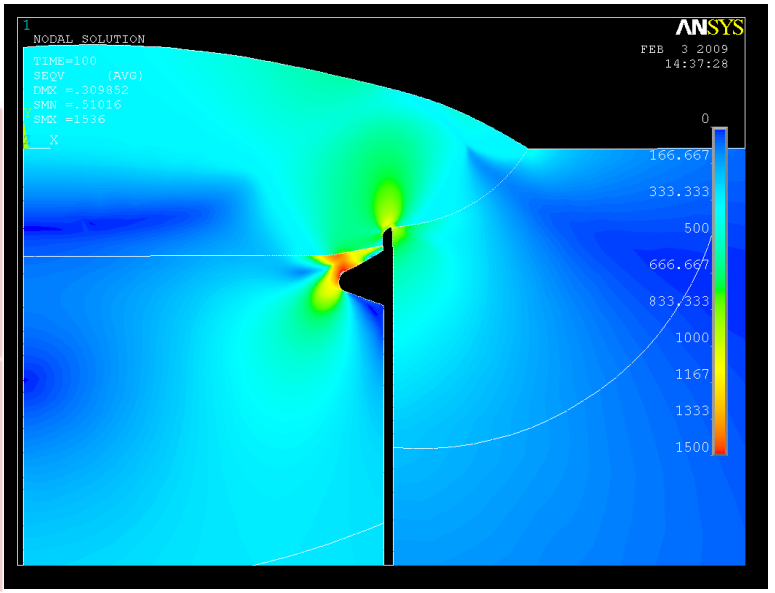
$\sigma_{\theta\theta}$ max = 630 MPa
σ_{vM} max = 830 MPa



Analyse des contraintes

Contraintes de von Mises





Distance pour laquelle σ_{vM} > 830 MPa

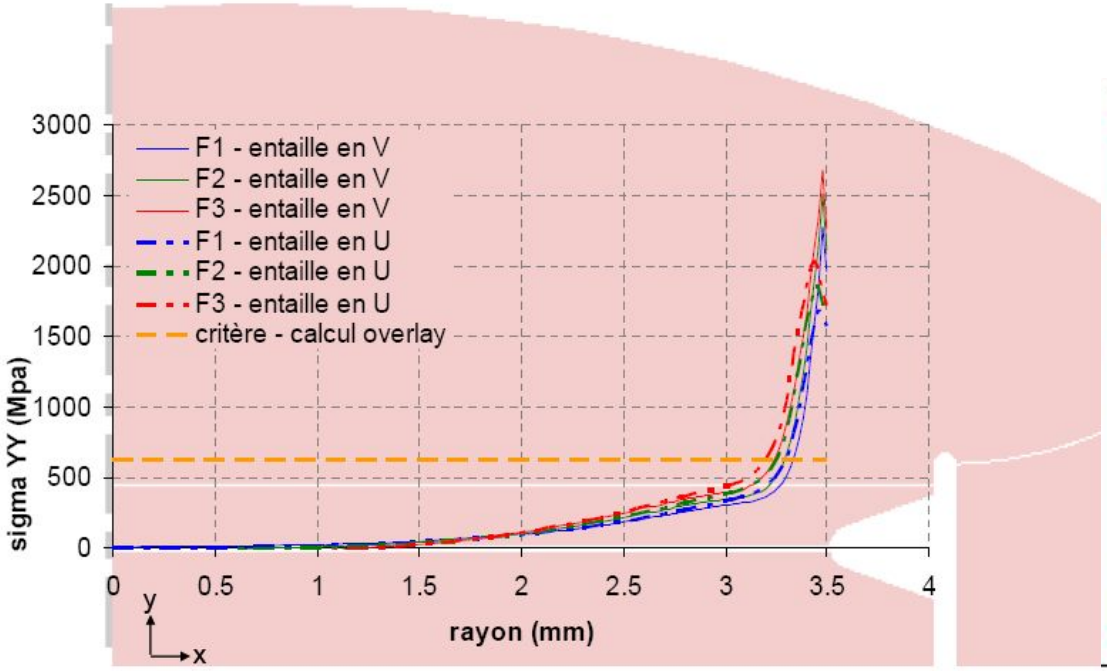
F_1 (-40%) ⇨ d = 0,11 mm

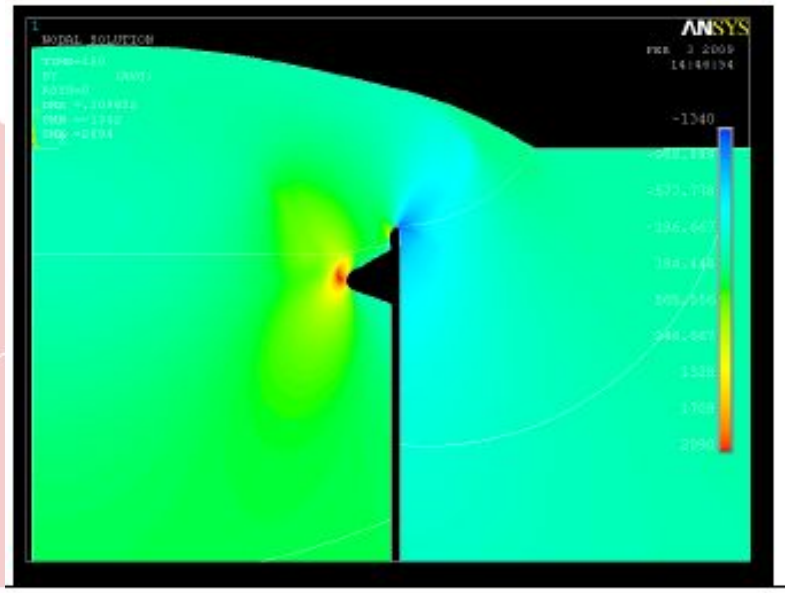
F_2 (-30%) ⇨ d = 0,16 mm

F_3 (-20%) ⇨ d = 0,21 mm

Analyse des contraintes

Contraintes axiales





Distance pour laquelle σ_{YY} > 630 MPa

F_1 (-40%) ⇨ d = 0,20 mm

F_2 (-30%) ⇨ d = 0,25 mm

F_3 (-20%) ⇨ d = 0,30 mm

Conclusion

Simulation de la mise en charge de l'implant

- Localisation de la déformation dans la zone de raccordement tôle / soudure / implant
- Déformée en accord avec les observations expérimentales

Evaluation des contraintes rencontrées lors du soudage

- Dépôt inconel sur une LBM (cas d'une réparation)
- Calcul des contraintes en cours de dépôt overlay
- Contraintes max : $\sigma_{\theta\theta}$ = 830 MPa, σ_{vM} = 630 MPa ➔ critère

Contraintes – essai d'implant avec charge diminuée

- Les contraintes en fond d'entaille dépassent le critère overlay
- **L'essai reste conservatif ➔ possibilité de diminuer la charge démontrée**

Limitations de l'étude

- Pas de prise en compte du soudage ➔ contraintes résiduelles
- Pas de simulation de la diffusion d'hydrogène

Plan

- La fissuration à froid et l'essai sur implant
  - Le contexte AREVA
  - Apports de la SNS
- Calcul mécanique de la mise en charge de l'implant
  - Modélisation
  - Analyse des déformations
  - Analyse des contraintes
- **Calcul de diffusion de l'hydrogène**
  - **Modélisation thermique**
  - **Modélisation mécanique**
  - **Diffusion d'hydrogène**
- **Conclusions et Perspectives**

Problématique

Description du cas simulé

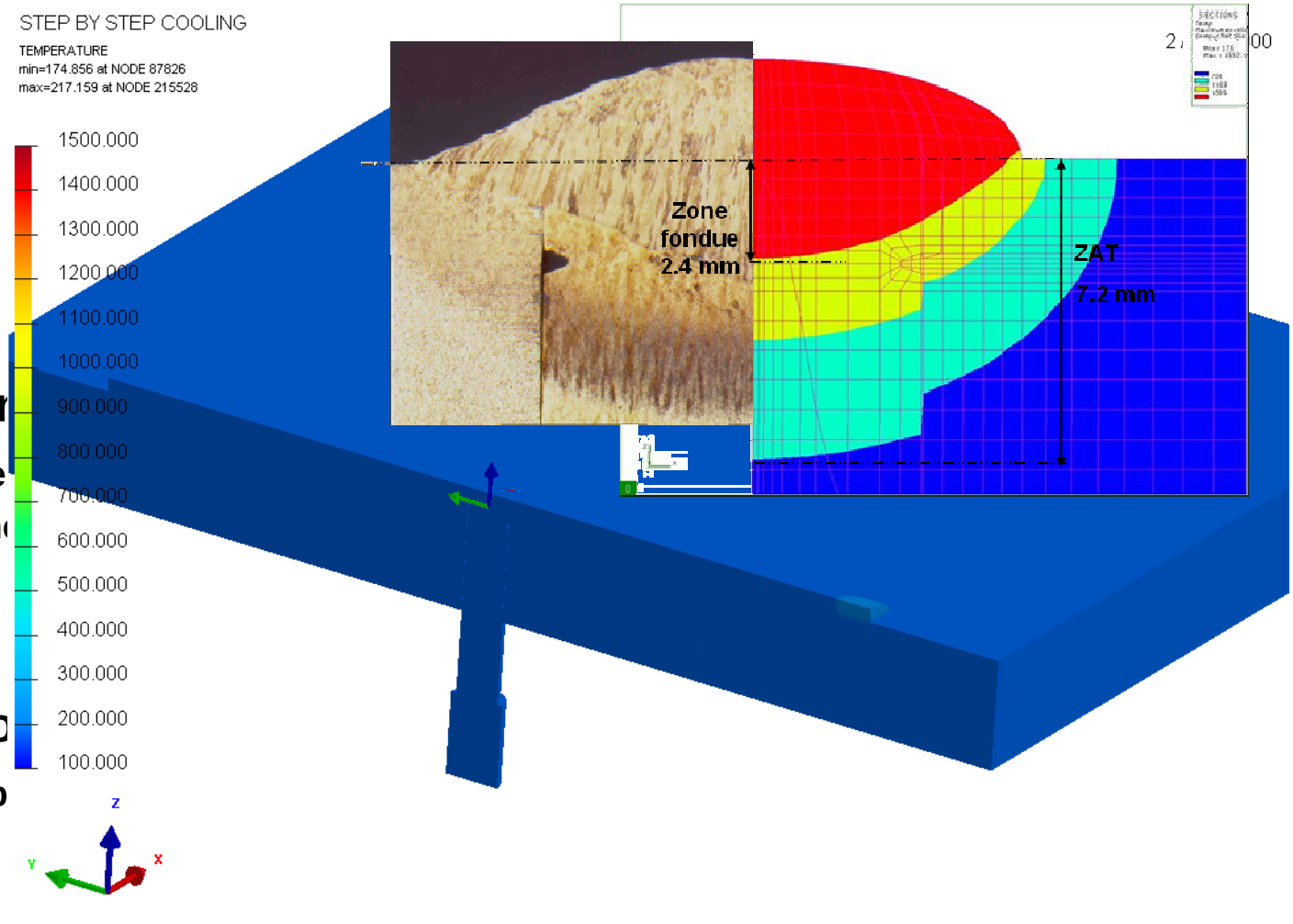
- **Soudage homogène : 16MND5**
- **Température de préchauffage: 175°C**

Objectifs

- **Simuler l'essai d'implant**
  - Soudage de l'implant
  - Mise en charge de l'implant
  - Diffusion de l'hydrogène
- **Intégrer un critère de fissuration à froid**
- **Prévision de la fissuration à froid**

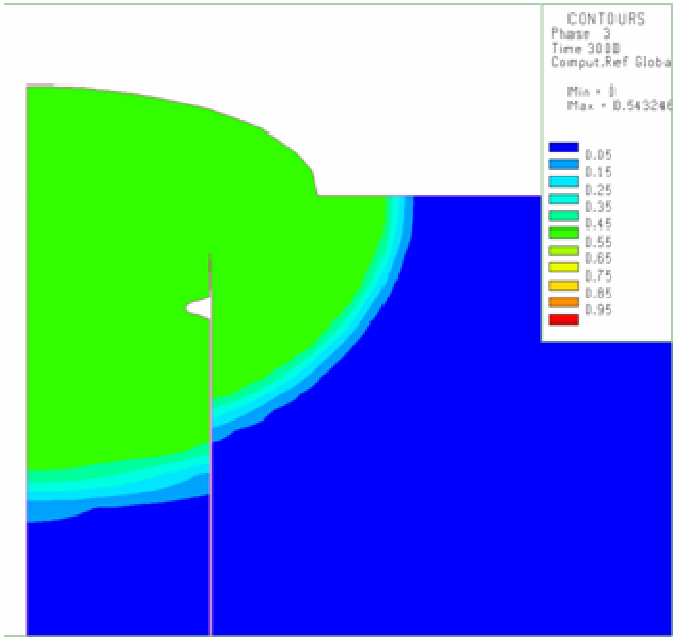
Calcul thermique

- **Modèle 3D**
- **Chargemer**
  - **Source de**
  - **Déplacem**
- **Prise en co**
  - **Métal de b**
  - **Austénite**
  - **Austénite**



Calcul mécanique

- **Modèle 2D axisymétrique**
- **Projection des champs de température**
  - **3D – section médiane → 2D**
  - **Reconstitution de la métallurgie**
- **Calcul mécanique**
  - **Cpt EP multiphasé**
  - **Contraintes résiduelles de soudage**
  - **Mise en charge de l'implant**
  - **Nouvel état de contraintes**

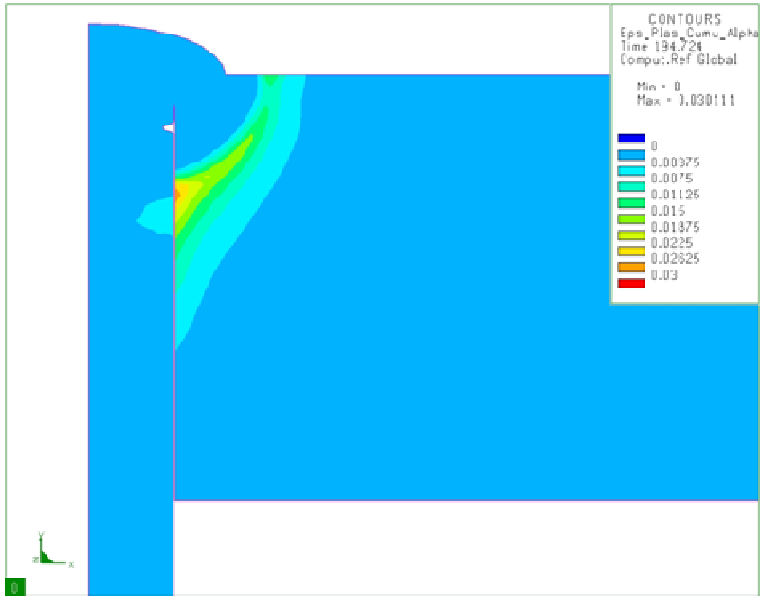


Proportion de bainite du modèle 2D issue du modèle thermique 3D

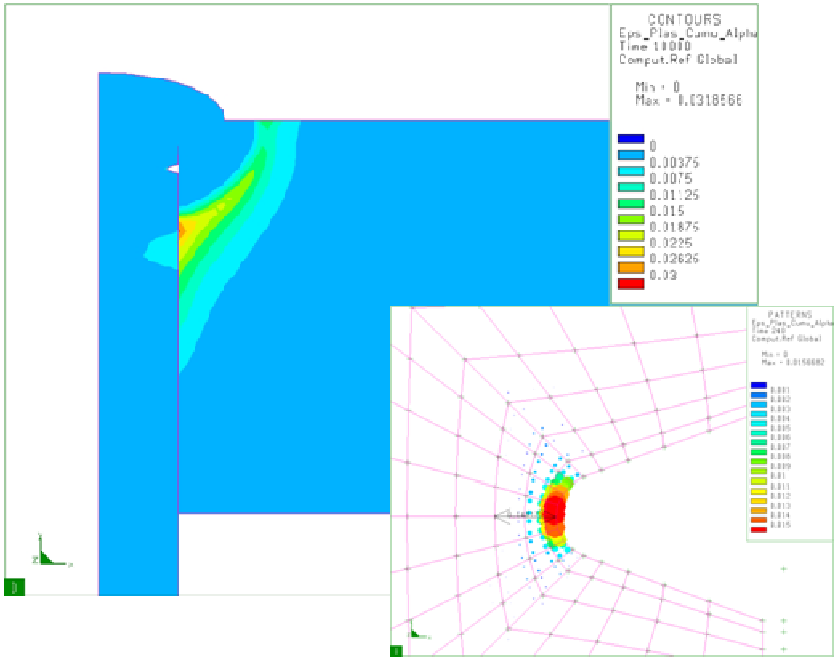
Calcul mécanique

- **Déformations plastiques avant / après la mise en charge**

AVANT



APRES

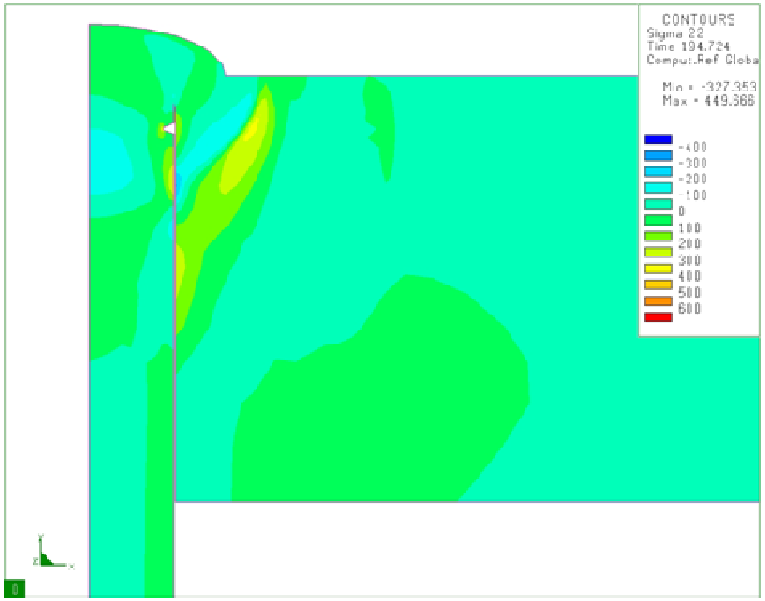


- **AVANT : déformations plastiques faibles, principalement dans la plaque**
- **APRES : la plasticité apparait en fond d'entaille**

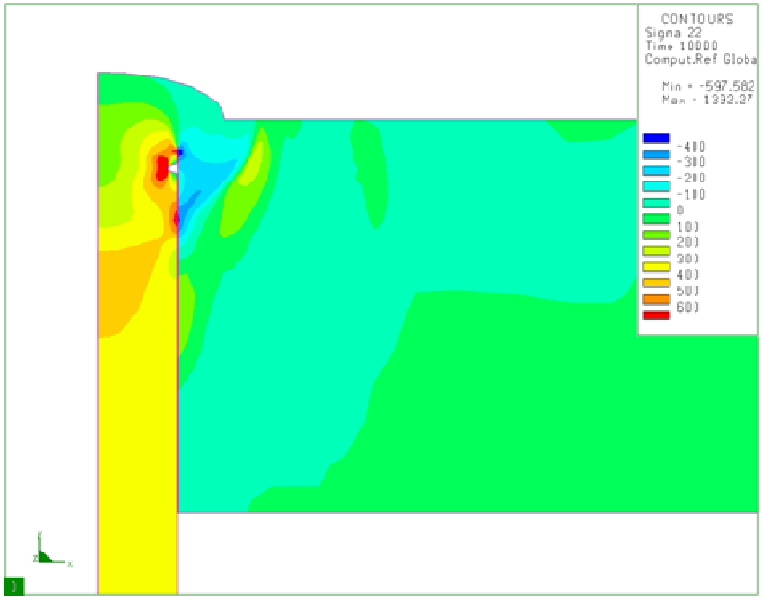
Calcul mécanique

- **Contraintes axiales avant / après la mise en charge**

AVANT



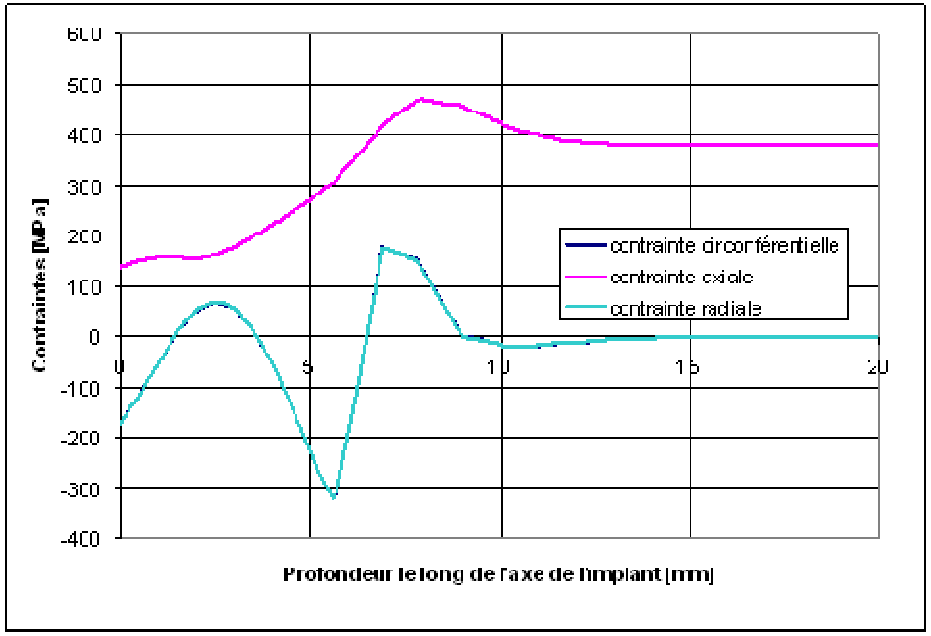
APRES

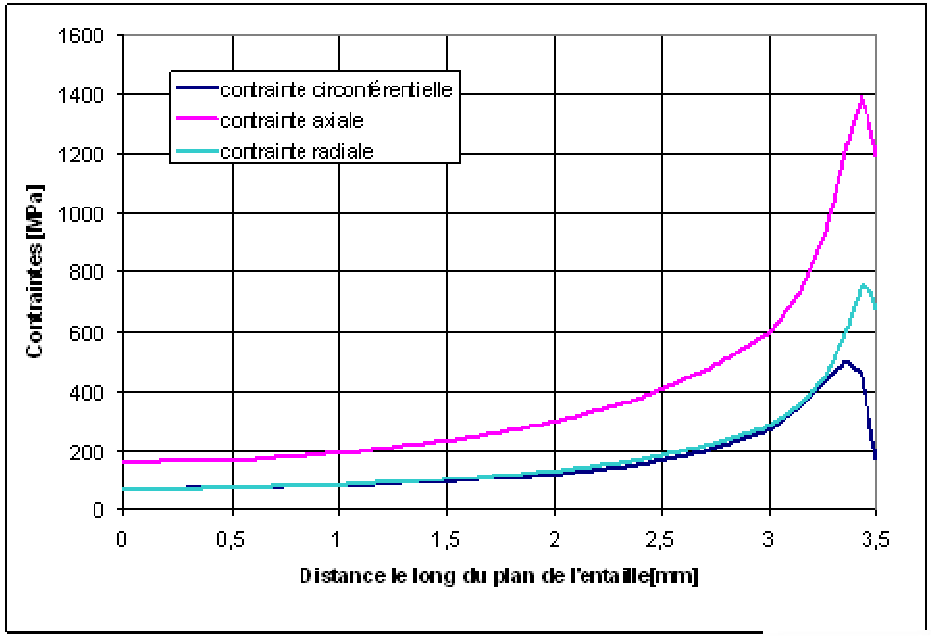


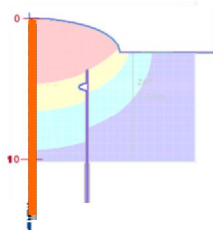
- **AVANT : σ déjà élevées, notamment en fond d'entaille → 450 MPa**
- **APRES : σ localisées en fond d'entaille**

Calcul mécanique

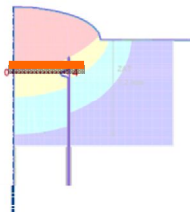
Profils de contraintes







- σ_{rr} $\sigma_{\theta\theta}$: Compression sur la partie supérieure de l'implant
- état triaxial des contraintes en fond d'entaille
- σ maxi à une distance de 0.1 mm du fond de l'entaille

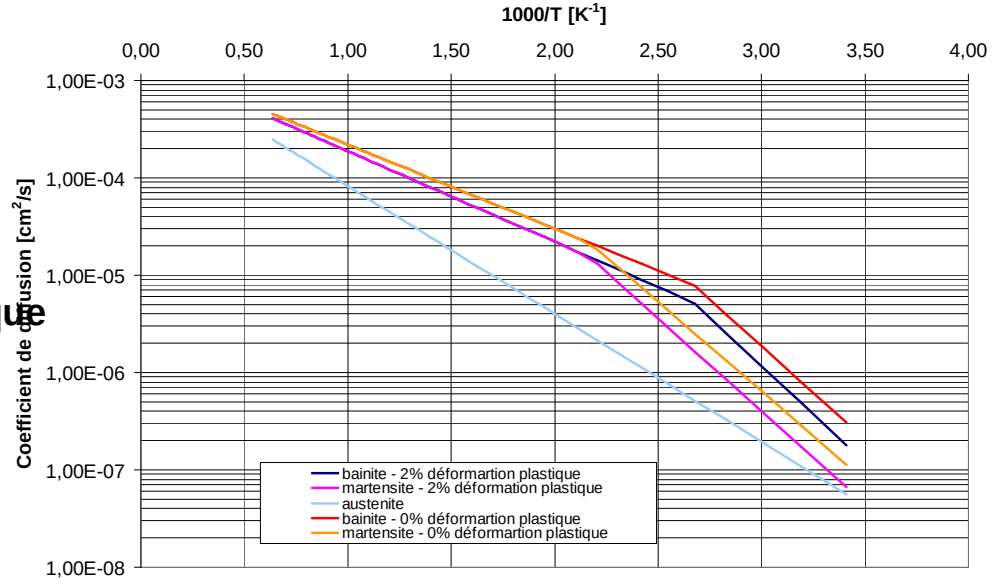


AREVA

Diffusion de l'hydrogène

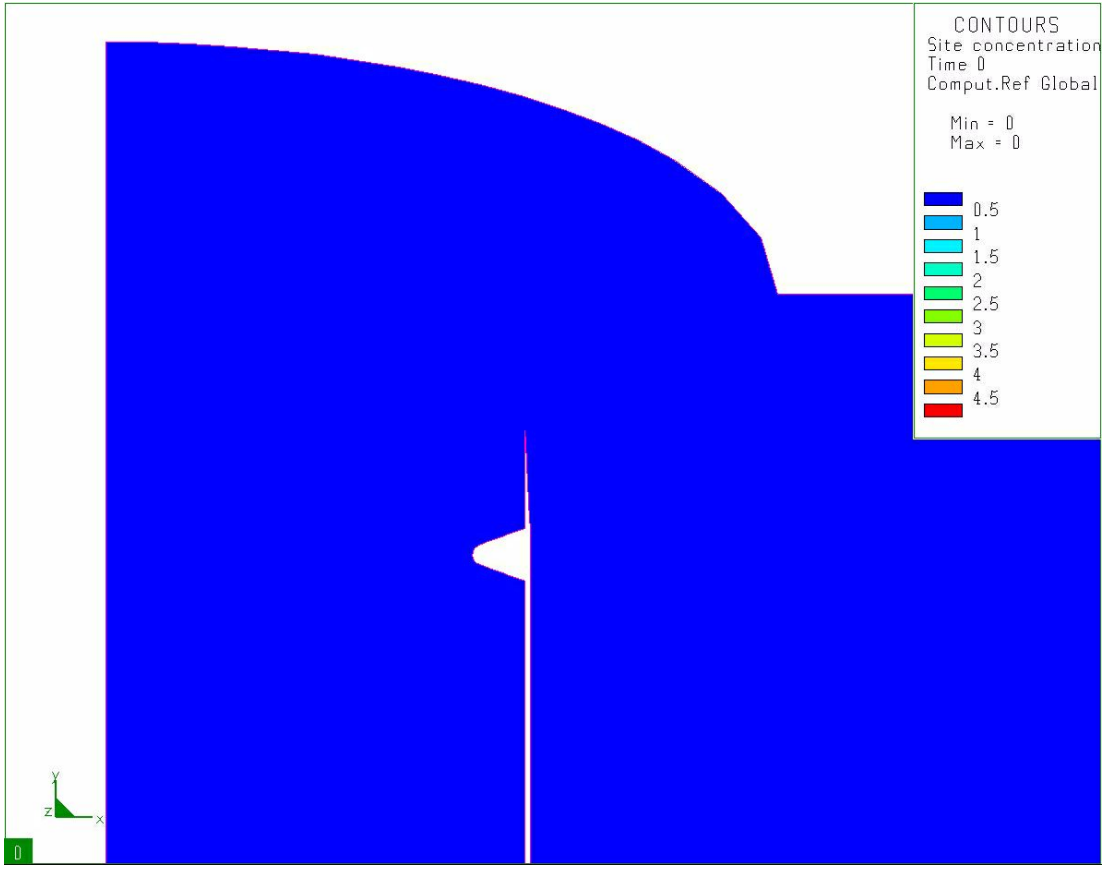
- **Conditions limite**
  - **Concentration initiale en H imposée dans la ZF**
    - D'après des mesures d'hydrogène
  - **Diffusion débute lorsque $T_{cordon} > T_{fusion}$**
  - **Activité nulle imposée en surface**

- **Propriétés**
  - **Solubilité et perméabilité définies pour chaque phase**
  - **Dépendance à la déformation plastique**



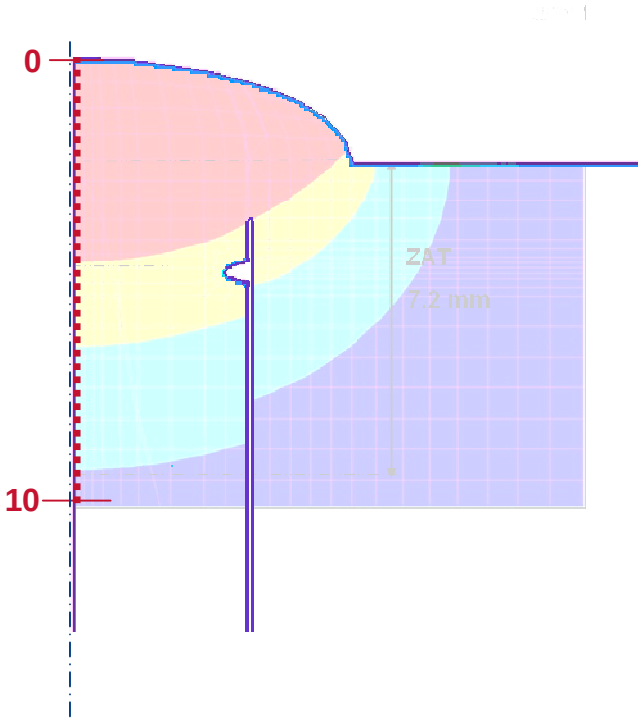
Diffusion de l'hydrogène

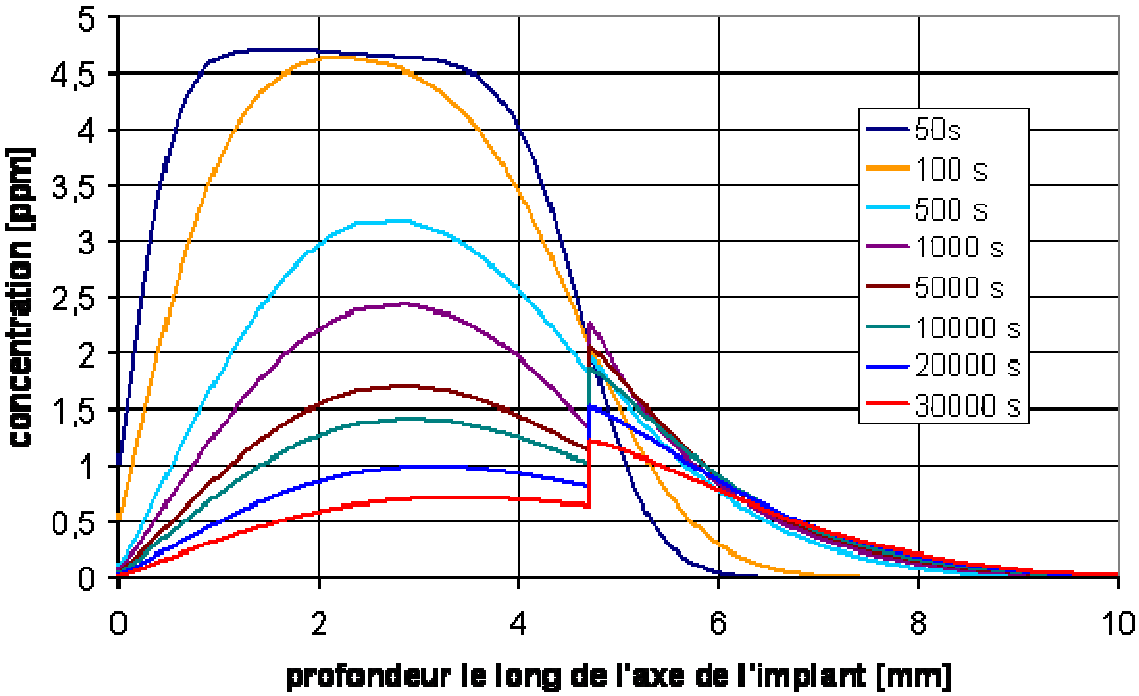
- **Evolution de la concentration en H**



Diffusion de l'hydrogène

- **Résultats le long de l'axe**



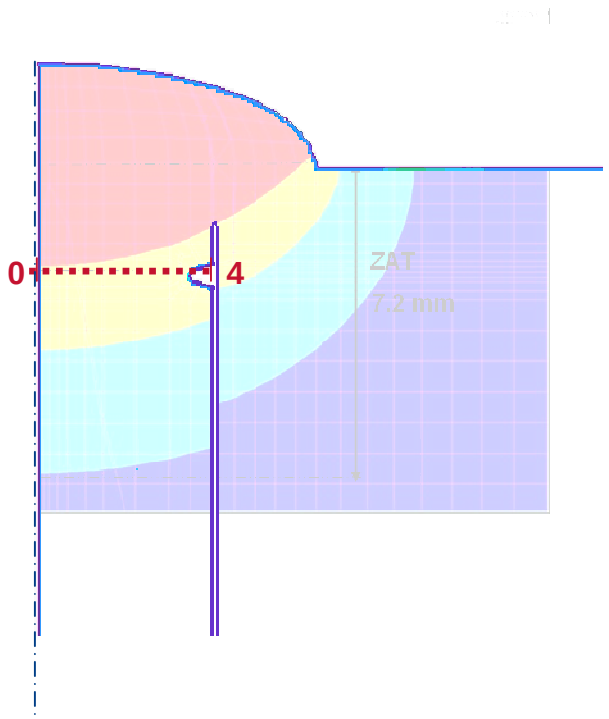


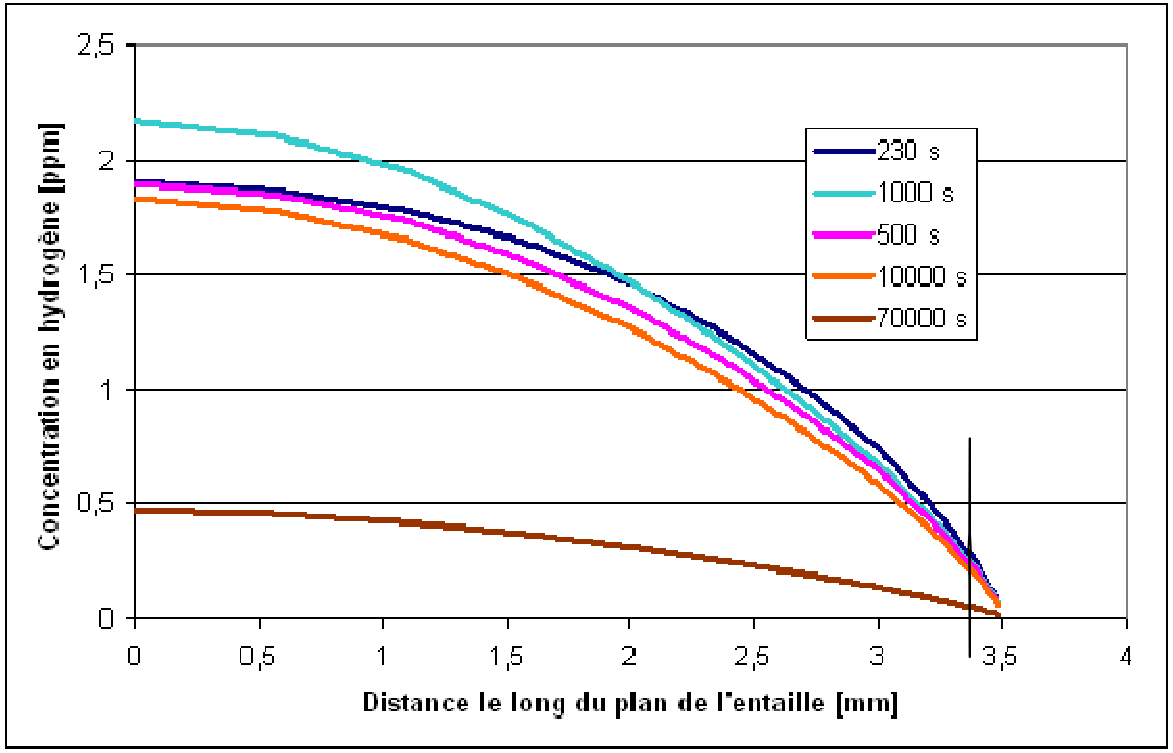
- **Discontinuité à l'interface ZF / ZAT ⇔ solubilité bainite < solubilité martensite**
- **Pas d'influence de la déformation plastique (ε^p faibles)**

AREVA

Diffusion de l'hydrogène

- **Résultats le long du rayon entaillé**





- **Cs = 0,3 ppm à 0.1 mm en arrière du fond d'entaille, là où σ max.**
- **À 70000 s (20h), Cs < 0,5 ppm**

Conclusion

Rappel du cas considéré

- Soudage homogène 16MND5

Simulation de l'essai d'implant

- Calcul thermique 3D du soudage
- Métallurgie
- Calcul 2D mécanique
- Calcul de diffusion d'H

Evolution des variables pilotant la fissuration à froid

- Proportions de phases
- Contraintes
- Concentration en hydrogène

Résultats en accord avec [Leblond et al., 1988]

Conclusion générale et perspectives

CONCLUSIONS

Essai sur implant

- Essai de référence pour la détermination de la sensibilité à la fissuration à froid et la détermination de préconisations pour le soudage
- Essai parfois trop conservatif et limité dans ses applications (ZAT, matériaux homogènes)

Apports de la simulation numérique pour l'analyse de l'essai d'implant:

- Cas d'une soudure inconel sur implant 16MND5
  - Calcul mécanique
  - Validation de l'effondrement du cordon
  - Possibilité d'une diminution de la charge **démontrée**
- Cas d'une soudure homogène 16MND5
  - Description de l'évolution des variables pilotant la fissuration à froid
  - **prévision ZAT + Contraintes + Concentration d'hydrogène**

PERSPECTIVES

Définition d'une loi de fissuration à froid

Identification d'un critère d'après les essais normalisés

- Par comparaison simulation numérique / essais

Prévision de la fissuration à froid à l'aide de la simulation numérique