



AREVA

l'avenir pour énergie

Etablissement d'un critère numérique de fissuration à froid au soudage

PRIMAULT Christophe

TIRAND G. ; GOMMEZ F. ; ROBIN V.

SNS 2014 - 12ème Colloque du Groupement Scientifique et Technique Simulation Numérique du Soudage

Le 27/03/2014

- ▶ **Rappels sur la fissuration à froid**
- ▶ **La problématique et l'approche AREVA**
- ▶ **L'intérêt pour AREVA des essais, de la SNS et de leur couplage**
- ▶ **Présentation de l'essai sur implant**
- ▶ **Métallurgie de la ZAT (zone affectée thermiquement)**
 - ◆ **Microstructure et dureté**
 - ◆ **Taille de "grains"**
 - ◆ **Influence de l'hydrogène**
- ▶ **Simulation numérique de l'essai sur implant**
 - ◆ **Comparaison simulation/expérimentation : température**
 - ◆ **Comparaison simulation/expérimentation : thermo-métallurgie**
 - ◆ **Comparaison simulation/expérimentation : contraintes et hydrogène**
- ▶ **Conclusion et perspectives**

Rappel sur la fissuration à froid au soudage

► Origine de la fissuration à froid (FAF) des aciers faiblement alliés

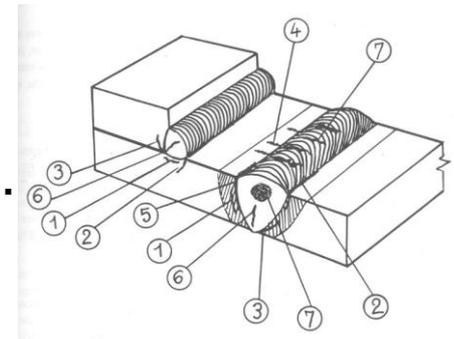
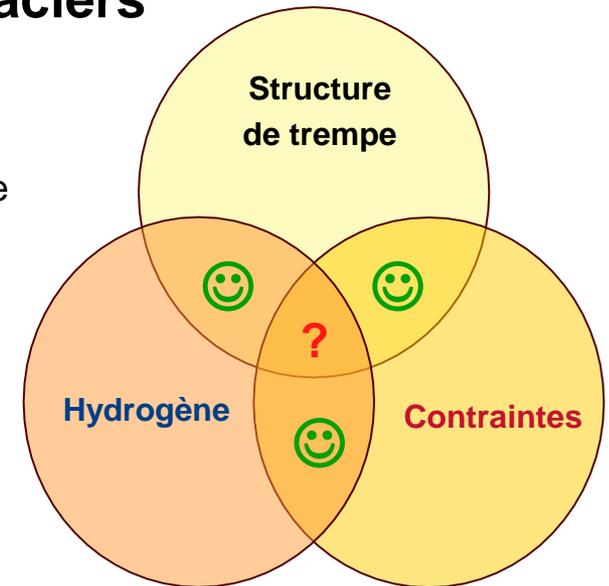
◆ 3 facteurs simultanés

- Structure de trempé en zone fondue (ZF) et/ou affectée thermiquement (ZAT)
 - Composition chimique (C%, C_{Eq})
 - Vitesse de refroidissement
- Hydrogène
 - Origine : produit d'apport, air ambiant, pièce, ...
 - Diffusion (phases en présence, température, ...)
- Contraintes
 - Bridage lors du retrait au refroidissement

◆ Un seuil critique inter-dépendant

► Des essais (normalisés ou non) existent pour :

- ◆ Définir les modalités opératoires pour s'en prémunir : énergie de soudage, préchauffage, postchauffage, etc...
- ◆ Sélectionner les produits/procédés pour chaque application



- ▶ Rappels sur la fissuration à froid
- ▶ **La problématique et l'approche AREVA**
- ▶ L'intérêt pour AREVA des essais, de la SNS et de leur couplage
- ▶ Présentation de l'essai sur implant
- ▶ Métallurgie de la ZAT (zone affectée thermiquement)
 - ◆ Microstructure et dureté
 - ◆ Taille de "grains"
 - ◆ Influence de l'hydrogène
- ▶ Simulation numérique de l'essai sur implant
 - ◆ Comparaison simulation/expérimentation : température
 - ◆ Comparaison simulation/expérimentation : thermo-métallurgie
 - ◆ Comparaison simulation/expérimentation : contraintes et hydrogène
- ▶ Conclusion et perspectives

La problématique et l'approche AREVA



- ▶ **Soudage dans l'industrie nucléaire**
 - ◆ Aciers non et faiblement alliés en fortes épaisseurs
==> risque fissuration à froid très présent

- ▶ **Des préconisations ou impositions de soudage "anciennes "**
 - ◆ Toujours d'actualité malgré l'évolution des matériaux, des produits d'apport, des procédés... ?
 - ◆ Parfois difficiles d'application (interventions sur site)
 - ◆ "Trop" conservatives ?

La problématique et l'approche AREVA

- ▶ **Une volonté pour AREVA de maîtriser toujours mieux ses fabrications, ses opérations de maintenance**
- ▶ **L'approche AREVA**
 - ◆ **Réalisation d'essais**
 - ◆ **Instrumentation des essais pour une meilleure maîtrise, compréhension et analyse**
 - ◆ **Développement d'outils de simulation numérique du soudage, des mécanismes de dégradation**
- ▶ **L'origine des développements de la SNS appliquée à la fissuration à froid par AREVA = être en appui aux essais pour**
 - ◆ **Apporter des justifications complémentaires lorsque les essais ne sont pas suffisamment représentatifs du cas d'application**
 - ◆ **Etre un élément de preuve du maintien du conservatisme d'un essai de soudabilité "dégradé" ou hors cadre usuel**
 - ◆ **Permettre de réduire le nombre d'essai en ciblant mieux les paramètres clés, leur impact, en étant "prédictif"**
 - ◆ **Aider à la compréhension des mécanismes donnant lieu à fissuration**
- ▶ **La modélisation de l'essai permet de valider le modèle**

REACTEURS & SERVICES

- ▶ Rappels sur la fissuration à froid
- ▶ La problématique et l'approche AREVA
- ▶ **L'intérêt pour AREVA des essais, de la SNS et de leur couplage**
- ▶ Présentation de l'essai sur implant
- ▶ Métallurgie de la ZAT (zone affectée thermiquement)
 - ◆ Microstructure et dureté
 - ◆ Taille de "grains"
 - ◆ Influence de l'hydrogène
- ▶ Simulation numérique de l'essai sur implant
 - ◆ Comparaison simulation/expérimentation : température
 - ◆ Comparaison simulation/expérimentation : thermo-métallurgie
 - ◆ Comparaison simulation/expérimentation : contraintes et hydrogène
- ▶ Conclusion et perspectives

L'intérêt pour AREVA des essais, de la SNS et de leur couplage



► Intérêts des essais

- ◆ Indispensables pour comprendre les phénomènes
- ◆ Indispensables pour appuyer un dossier de justification
- ◆ Indispensables pour développer les modèles de simulation numérique
- ◆ Indispensables pour caler les modèles de simulation numérique, les valider

► Intérêts de la simulation numérique

- ◆ Aide à la détermination de l'influence des paramètres d'essais
- ◆ Participe à la réduction du nombre d'essais
- ◆ Devient un bon outil de justification complémentaire aux essais
- ◆ Favorise une meilleure maîtrise des essais (se poser des questions, savoir comment ça influe)

Sommaire

- ▶ Rappels sur la fissuration à froid
- ▶ La problématique et l'approche AREVA
- ▶ L'intérêt pour AREVA des essais, de la SNS et de leur couplage
- ▶ **Présentation de l'essai sur implant**
- ▶ Métallurgie de la ZAT (zone affectée thermiquement)
 - ◆ Microstructure et dureté
 - ◆ Taille de "grains"
 - ◆ Influence de l'hydrogène
- ▶ Simulation numérique de l'essai sur implant
 - ◆ Comparaison simulation/expérimentation : température
 - ◆ Comparaison simulation/expérimentation : thermo-métallurgie
 - ◆ Comparaison simulation/expérimentation : contraintes et hydrogène
- ▶ Conclusion et perspectives

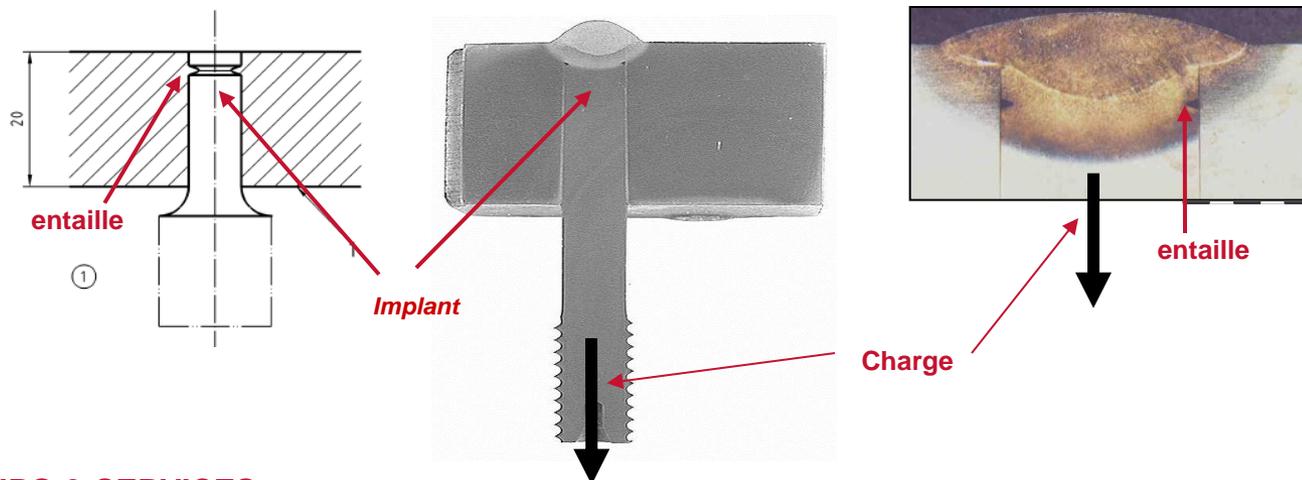
REACTEURS & SERVICES

L'essai sur implant

Essai de soudabilité : fissuration à froid

► Test de fissuration à froid sous charge extérieure (NF EN ISO 17642-3)

- ◆ Implant : éprouvette entaillée du matériau à tester
- ◆ L'implant est enchâssé dans une plaque d'essai
- ◆ Un cordon de soudure est déposé sur l'assemblage : création de la ZAT
- ◆ Avant retour à température ambiante, application d'une charge extérieure pour "reproduire" les contraintes au retrait, avec concentration de contraintes en fond d'entaille.



Sommaire

- ▶ Rappels sur la fissuration à froid
- ▶ La problématique et l'approche AREVA
- ▶ L'intérêt pour AREVA des essais, de la SNS et de leur couplage
- ▶ Présentation de l'essai sur implant
- ▶ **Métallurgie de la ZAT (zone affectée thermiquement)**
 - ◆ Microstructure et dureté
 - ◆ Taille de "grains"
 - ◆ Influence de l'hydrogène
- ▶ Simulation numérique de l'essai sur implant
 - ◆ Comparaison simulation/expérimentation : température
 - ◆ Comparaison simulation/expérimentation : thermo-métallurgie
 - ◆ Comparaison simulation/expérimentation : contraintes et hydrogène
- ▶ Conclusion et perspectives

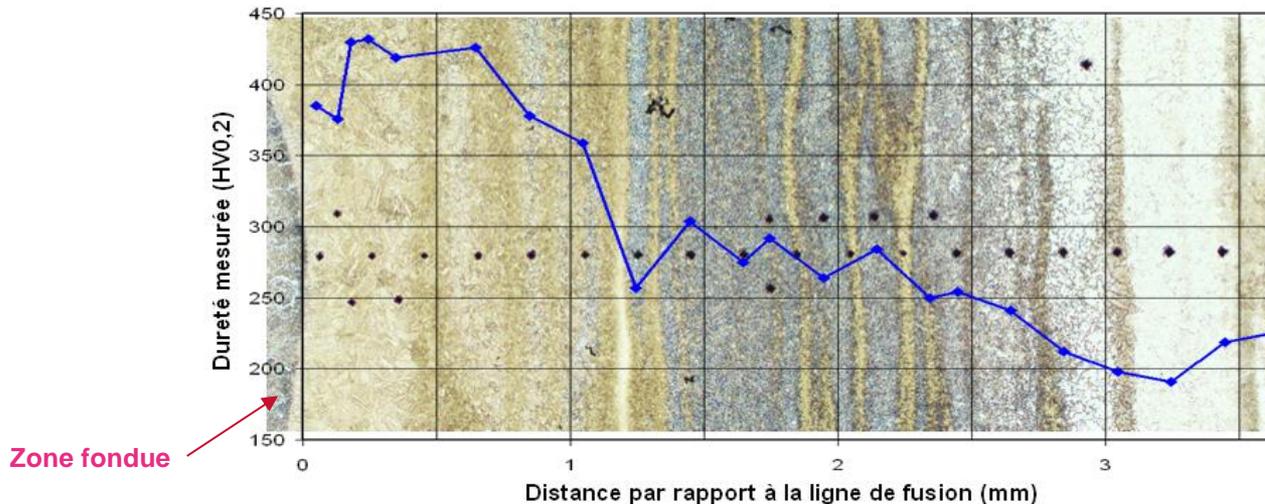
REACTEURS & SERVICES

Métallurgie de la ZAT

Microstructure et dureté

► Microstructure et microdureté en ZAT 16MND5

- ◆ Soudure électrode enrobée: E = 20kJ/cm ; pré et postchauff. 150° C, maintien 15min
- ◆ Matériau : acier faiblement allié 16MND5, C = 0,174% (massique) ; CEq = 0,59 (IIW)



◆ Microstructure en ZAT :

- Majoritairement martensitique sur environ 0,7 à 1mm sous la zone de liaison (ZL), avec une dureté moyenne de l'ordre de 400HV0,2. En même temps que la proportion de bainite augmente, la dureté chute ensuite jusqu'à atteindre l'isotherme de transformation de phase Ac1.

◆ La présence de ségrégations se superpose aux hétérogénéités liées au cycle thermique

Métallurgie de la ZAT "Taille de grains"

► Taille de grains

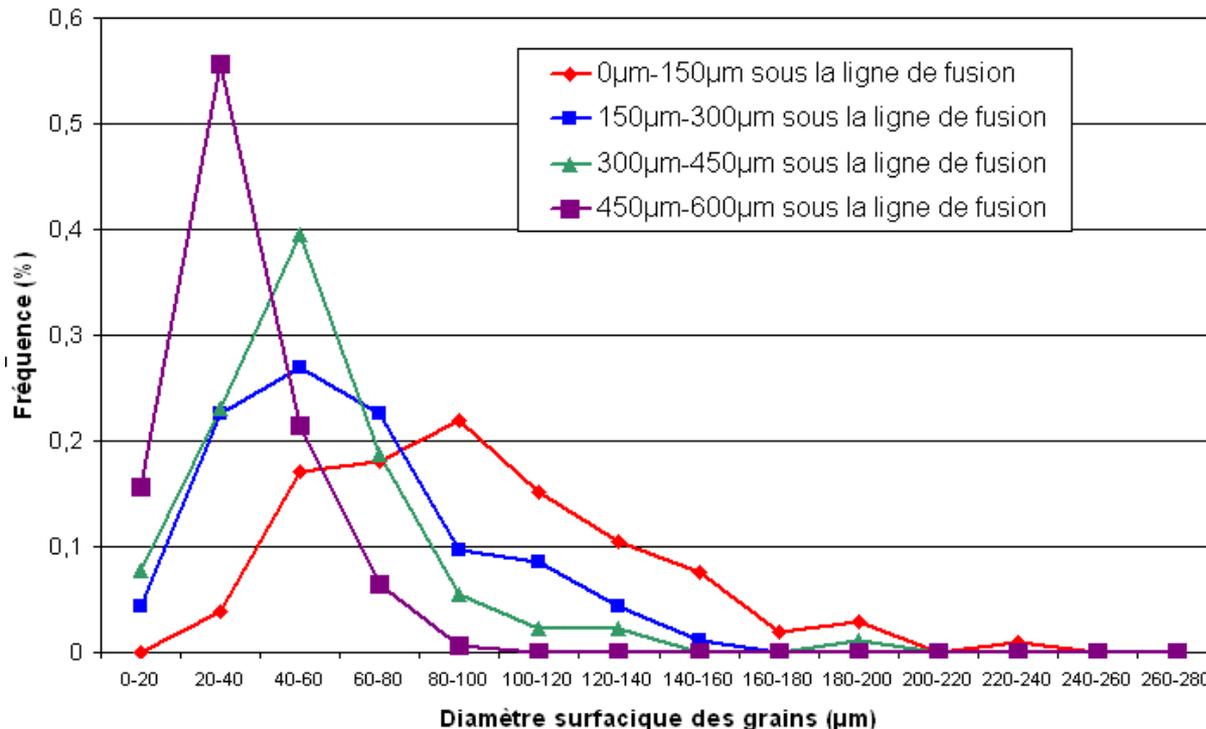
Acier 16MND5

Soudure électrode enrobée

E = 20kJ/cm

préchauffage 150° C,
postchauffage 15min

Mesure des tailles de
grains après attaque
Bechet Beaujard



◆ Diminution de la taille moyenne des grains pré-austénitiques de la ZL et Ac3

- Sous la ZL : temps plus long au-dessus de Ac3 et température maximale atteinte plus élevée → grains austénitiques plus grossiers
- Cette hétérogénéité est conservée même après transformation allotropique au refroidissement.

◆ La structure "à gros grains" est plus sensible à la fissuration à froid

- La norme d'essai d'implant demande un positionnement de l'entaille dans cette zone
- Pour les essais du modèle de SNS le plan d'entaille est situé à 350µm sous la zone de liaison (réduction du risque de fusion de l'entaille), donc hors grains les plus grossier, mais dans la zone majoritairement martensitique

REACTEURS & SERVICES

Métallurgie de la ZAT

Influence de l'hydrogène

► Influence de l'introduction d'hydrogène dans le matériau

- ◆ Dans le but de définir un critère de fissuration à froid, des essais de traction sur éprouvettes chargées en hydrogène(*) ont été réalisés pour en estimer l'effet fragilisant.

	Rp0.2 (MPa)	Rm (MPa)	Réduction d'aire (%)
Martensite non chargée en hydrogène	1000	1349	60
Martensite chargée en hydrogène (4ppm)	729	750	10

Exemple : caractérisation mécanique à température ambiante en ZAT à gros grains

- ◆ Le chargement en hydrogène abaisse les caractéristique Rp0,2 et Rm
- ◆ La perte de ductilité est plus nette par la chute de striction (notable dès 0,5ppm)

(*) : Travaux en collaboration avec le BAM (Bundesanstalt für Materialforschung)

Sommaire

- ▶ Rappels sur la fissuration à froid
- ▶ La problématique et l'approche AREVA
- ▶ L'intérêt pour AREVA des essais, de la SNS et de leur couplage
- ▶ Présentation de l'essai sur implant
- ▶ Métallurgie de la ZAT (zone affectée thermiquement)
 - ◆ Microstructure et dureté
 - ◆ Taille de "grains"
 - ◆ Influence de l'hydrogène
- ▶ **Simulation numérique de l'essai sur implant**
 - ◆ **Comparaison simulation/expérimentation : température**
 - ◆ **Comparaison simulation/expérimentation : thermo-métallurgie**
 - ◆ **Comparaison simulation/expérimentation : contraintes et hydrogène**
- ▶ Conclusion et perspectives

REACTEURS & SERVICES

Simulation numérique de l'essai d'implant

► La simulation numérique de l'essai d'implant est réalisée avec le logiciel SYSWELD®

◆ Simulation couplée :

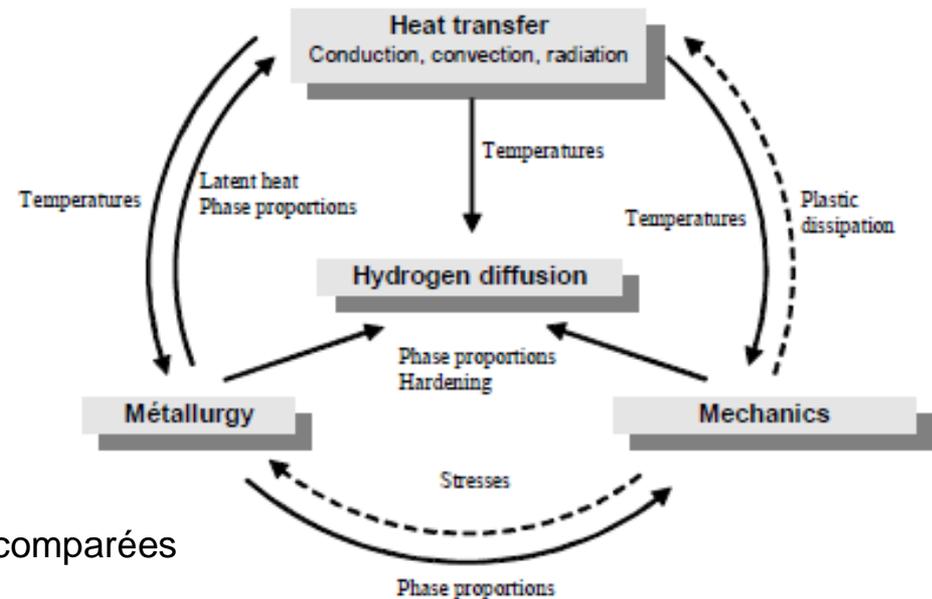
- Transferts thermiques
- Transformations métallurgiques
- Diffusion de H
- Déformations et contraintes

◆ Approche pour la simulation

- Thermo-métallurgique 3D
- Mécanique et diffusion – 2D ou 3D comparées

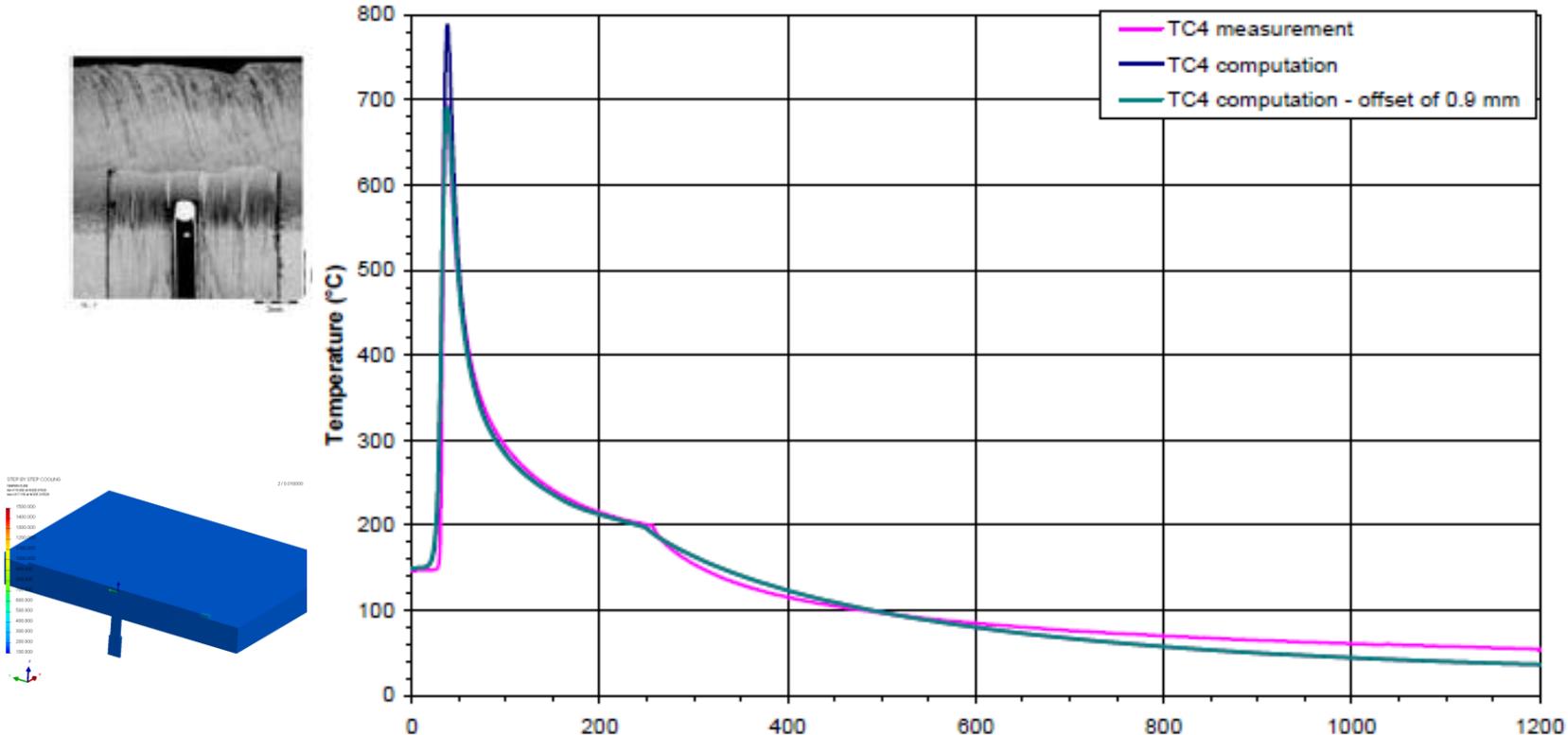
◆ Cas d'étude = Essai sur implant (possibilité de cas fissurant ou non)

- Implant : Acier 16MND5
- Dépôt électrode enrobée "homogène" : énergie de soudage = 20kJ/cm
- Préchauffage 150° C puis postchauffage par maintien 150° C pendant 15min
- Hydrogène : 8,5ppm d'hydrogène total (en métal déposé)



Comparaison num. / expérim. Températures

► Comparaison des courbes de température en ZAT

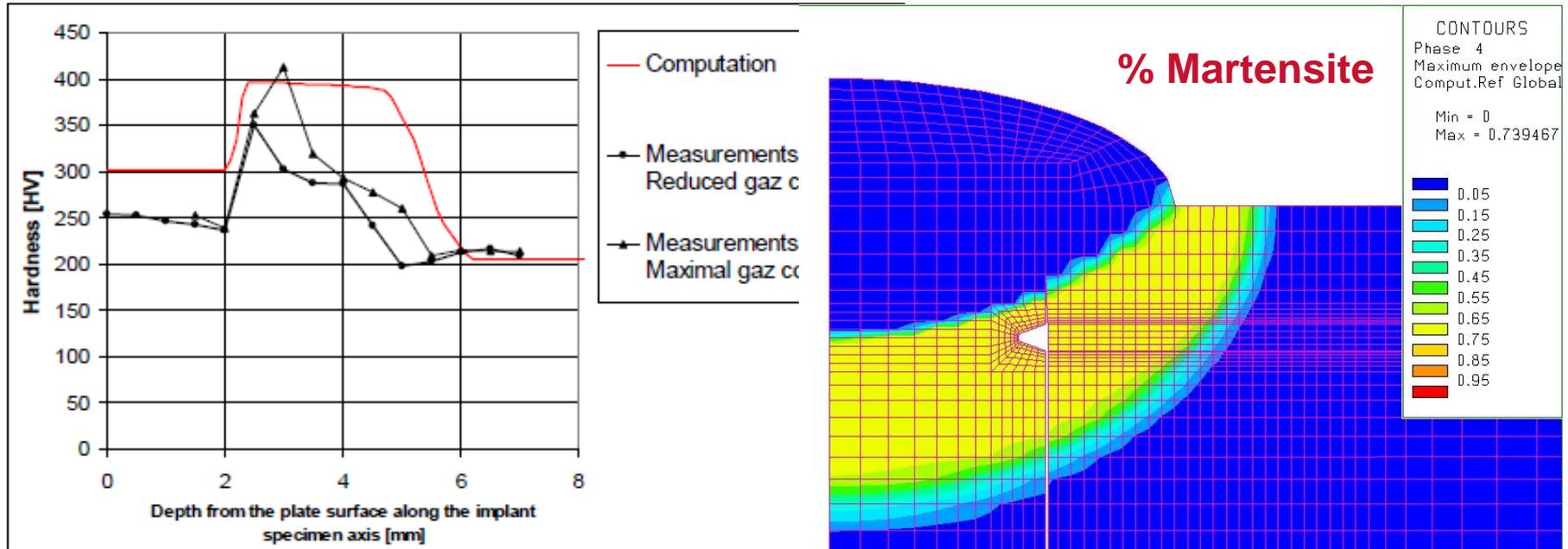


- ◆ Température maximale calculée environ 100° C supérieure à la mesure
- ◆ Vitesses de refroidissement comparables ; léger écart après application du vortex

REACTEURS & SERVICES

Comparaison num. / expérim. Thermo-métallurgie

► Comparaison microstructures / duretés

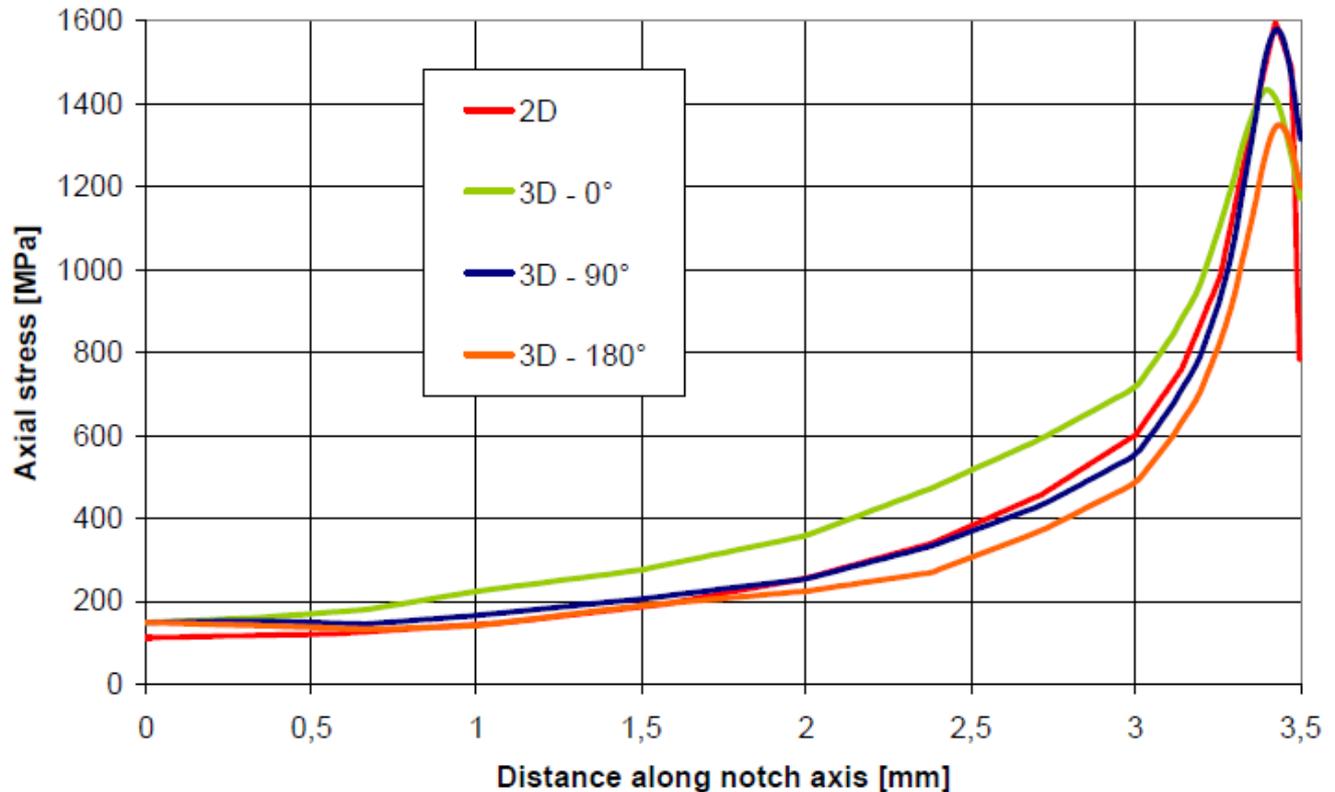
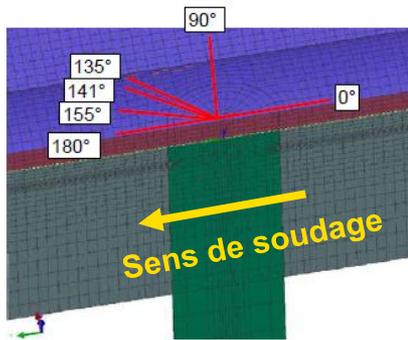


- ◆ Ecart sur la microstructure prédite en ZAT. Les duretés montrent une baisse du pourcentage de martensite et non une bande homogène
- ◆ L'écart se retrouve de fait sur les duretés prédites
- ◆ Le modèle numérique établit tout de même la présence de martensite en fond d'entaille, comme observé sur implant

Simulation numérique Contraintes et hydrogène

► Contraintes

◆ 2D et 3D



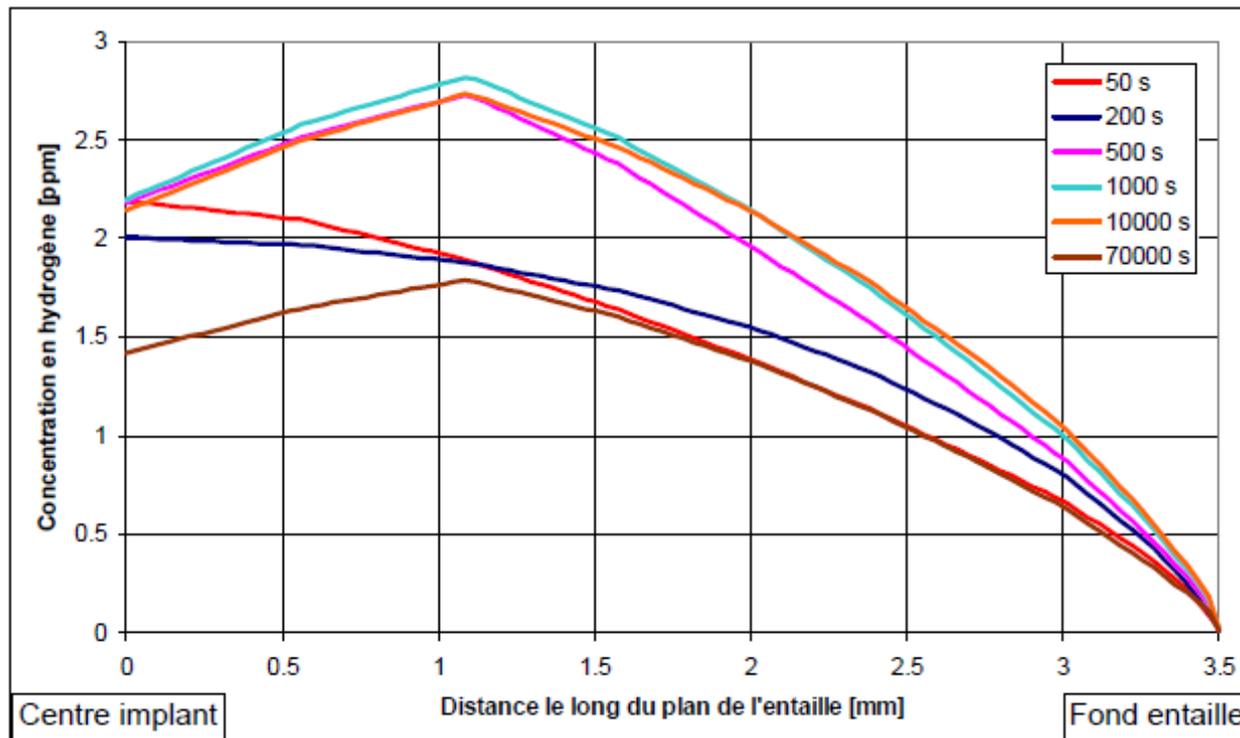
- ◆ Les modèles 2D et 3D convergent : maximum de contraintes à 70 μ m du fond d'entaille
- ◆ Le pic de contraintes en "fond d'entaille" est maximal dans le plan 90° , perpendiculaire au sens de soudage
- ◆ Nota : écart en déformations plastiques "en fond d'entaille" : 4% sur le modèle 3D, 2% sur le modèle 2D

REACTEURS & SERVICES

Simulation numérique Contraintes et hydrogène

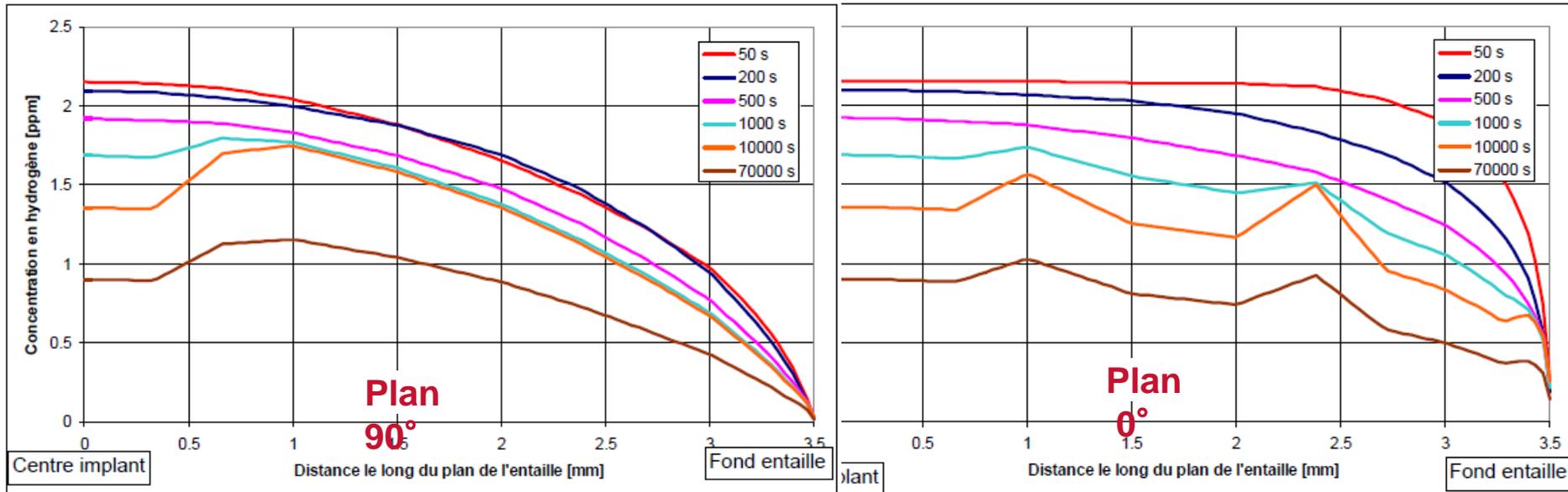
► Hydrogène 2D

- ◆ Diffusion de l'hydrogène dans le plan de l'entaille



Simulation numérique Contraintes et hydrogène

► Hydrogène 3D



- ◆ Résultats similaires dans les plans 0° et 180° , mais différents à 90°
- ◆ La concentration en hydrogène à proximité de l'entaille (contraintes maxi) est plus importante dans les plans à 180° et 0° que dans le plan à 90°
- ◆ Effusion moins rapide que dans le modèle 2D
- ◆ Des pics de concentration liés à une différence de solubilité martensite/bainite en-dessous de 200° C
- ◆ Des conditions aux limites à revoir

- ▶ Rappels sur la fissuration à froid
- ▶ La problématique et l'approche AREVA
- ▶ L'intérêt pour AREVA des essais, de la SNS et de leur couplage
- ▶ Présentation de l'essai sur implant
- ▶ Métallurgie de la ZAT (zone affectée thermiquement)
 - ◆ Microstructure et dureté
 - ◆ Taille de "grains"
 - ◆ Influence de l'hydrogène
- ▶ Simulation numérique de l'essai sur implant
 - ◆ Comparaison simulation/expérimentation : température
 - ◆ Comparaison simulation/expérimentation : thermo-métallurgie
 - ◆ Comparaison simulation/expérimentation : contraintes et hydrogène
- ▶ **Conclusion et perspectives**

Conclusion et perspectives

► Modélisation de l'essai sur implant

◆ Approche conservative :

- La simulation thermo-métallurgie 3D, mécanique 2D et diffusion 2D avec hypothèse de symétrie de révolution peut être qualifiée de raisonnablement enveloppe
- Pour la diffusion 2D, une adaptation des conditions aux limites s'avère nécessaire

◆ Approche prédictive :

- Difficile d'envisager actuellement une autre approche qu'un "tout 3D"

► Modélisation de la fissuration à froid (travaux en cours)

◆ Nécessité d'amélioration d'identification des paramètres des lois physiques

- Diffusion d'hydrogène pour les différentes microstructures à différentes températures et différents niveaux de déformation et de contrainte (travaux en cours avec le BAM)
- Modèles métallurgiques : conditions d'austénitisation, effet des hétérogénéités chimiques (%C)

◆ Définition d'un critère de fissuration (travaux en cours)

- Approche probabiliste (ex. Weibull) ou déterministe

► Perspectives

◆ Evaluer la robustesse du modèle par

- Vérification par instrumentation du modèle de diffusion de l'essai d'implant
- application à d'autres essais de soudabilité (Tekken) et cas pratiques (maquettes)



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

Simulation numérique Contraintes et hydrogène

► Hydrogène 3D

