



REACTEURS & SERVICES

SNS2014 –Fissuration à chaud des alliages à haute teneur en chrome Tirand. - 31 mars 2014 - p.1

Sed qui doloratur, qui sincit doles maximi, nonsentur solorro officte sima si conse optiatet acium
excesti quia sanducit qui quis nis pa quam velit faccaturis



Fissuration à chaud (Alliage base nickel ER NiCrFe7)

Guillaume TIRAND

PTCMMC-F

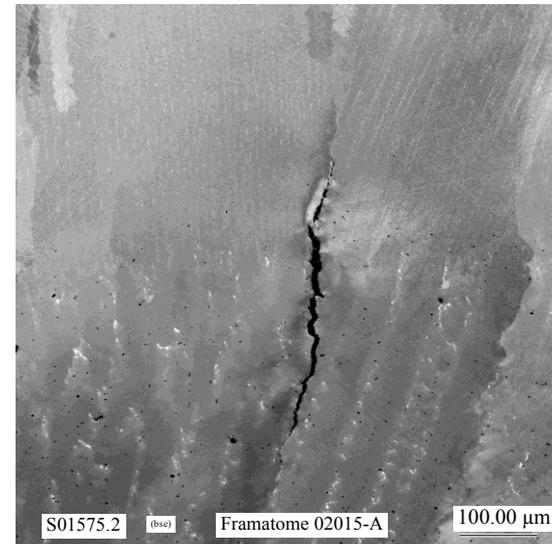
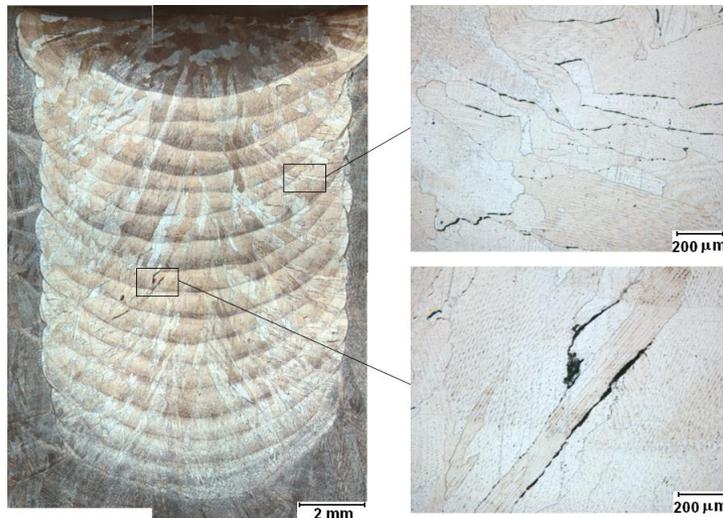
Paris - SNS 2014 - 28 mars

Sommaire

- ▶ **Présentation de la problématique**
- ▶ **Etude des matériaux d'intérêt**
- ▶ **Sensibilité à la fissuration à chaud**
- ▶ **Simulation numérique / Instrumentation de l'essai**
- ▶ **Perspectives**

Problématique

- ▶ **Alliage 52 (690) est utilisé dans le milieu nucléaire en remplacement de l'alliage base nickel 82 (600)**
 - ◆ **Alliage austénitique**
 - ◆ **Bonne tenue à la corrosion sous contrainte**
 - ◆ **Risque plus élevé de fissurer à chaud lors d'opération de soudage**



REACTEURS & SERVICES

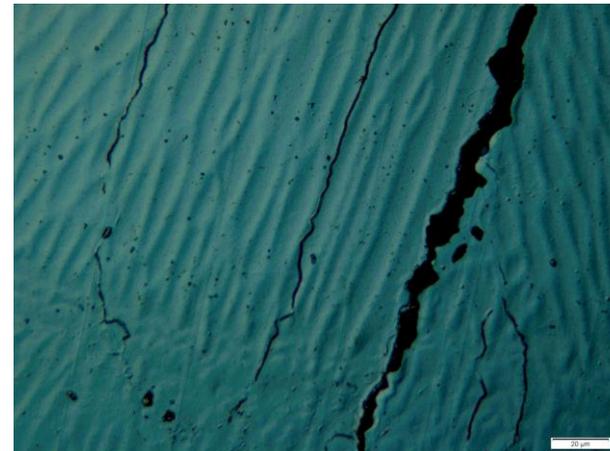
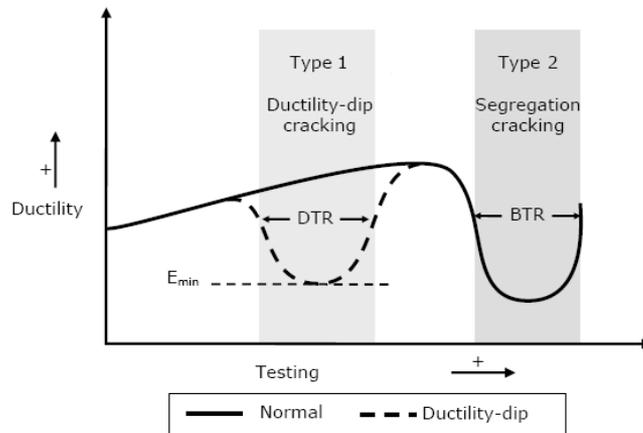
► Type de fissuration dans les alliages base nickel

◆ Fissuration de ségrégation (solidification, liquation)

- Fissures induites par des microségrégations élémentaires et la formation de phases à bas point de fusion

◆ Fissuration par manque de ductilité

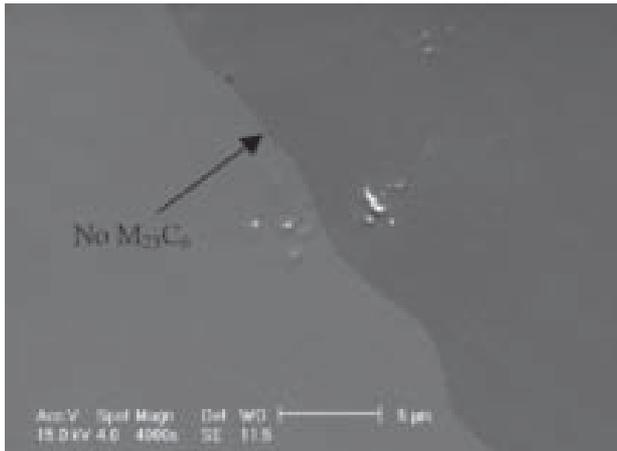
- Fissures intergranulaires se formant à l'état solide, localisées principalement dans les zones réaffectées thermiquement (750°C - 1000°C)



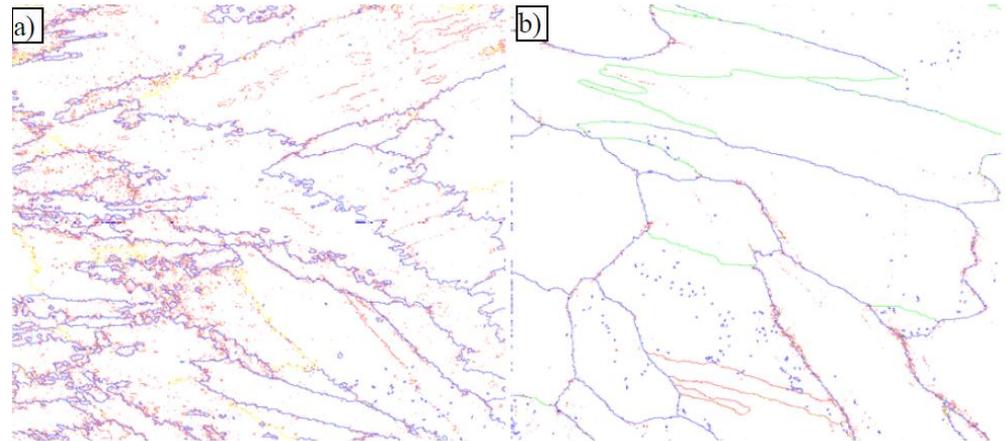
Problématique

► Origine du mécanisme de fissuration à l'état solide Mécanismes proposés

- ◆ Glissement de joint de grain: Joint de grain droit libres de toute précipitation (SMWPC-OSU)



Joint de grain sans précipitation [1]



Joint de grain tortueux (52MSS) joint de grain droit (52) [1]

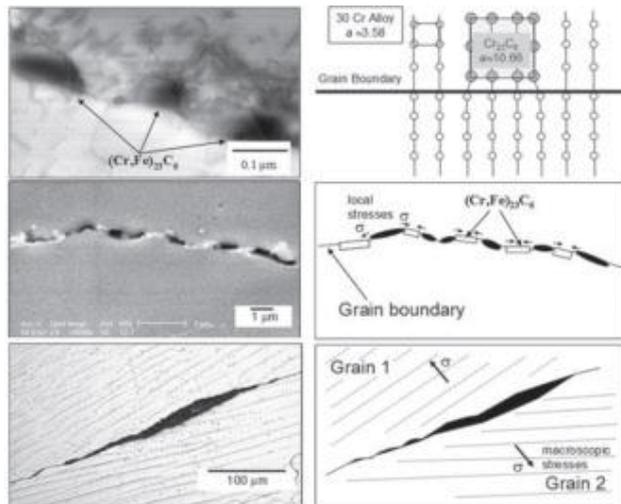
[1] Kiser.S, « A new NiCrFe welding product-INCONEL FM52MSS provides optimum resistance to PWSCC and DCC»

REACTEURS & SERVICES

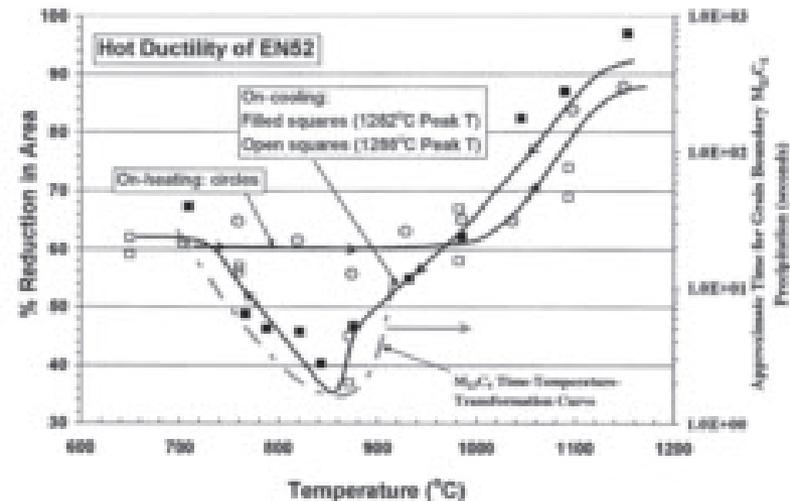
Problématique

► Origine du mécanisme de fissuration à l'état solide Mécanismes proposés

- ◆ Contraintes locales induites par précipitation secondaire $M_{23}C_6$



Schématisation du rôle de la précipitation secondaire [1]



Corrélation entre chute de ductilité et diagramme TTT [1]

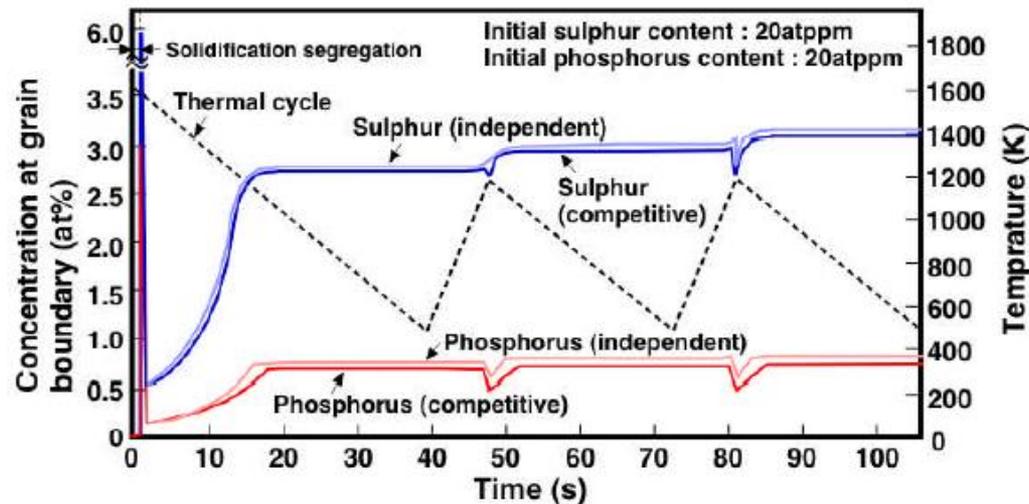
[1] Young G.A, « The mechanism of ductility dip cracking in nickel chromium alloys», Welding Journal, 2008

Problématique

► Origine du mécanisme de fissuration à l'état solide Mécanismes proposés

◆ Influence des éléments résiduels soufre et phosphore

- Microségrégation importante aux joints de grains en soudage multi-passe



Simulation d'enrichissement des joints de grain en éléments résiduels durant une opération de soudage multi-passe

Problématique

- ▶ **Nouveaux matériaux d'apports développés pour diminuer la sensibilité à la fissuration à chaud de l'alliage FM52**
 - ◆ **Evaluer la sensibilité à la fissuration des nouveaux matériaux d'apport**
 - ◆ **Mieux appréhender les conditions critiques d'apparition de fissuration à chaud**

Sommaire

- ▶ **Présentation de la problématique**
- ▶ **Etude des matériaux d'intérêts**
- ▶ **Sensibilité à la fissuration à chaud**
- ▶ **Simulation numérique / Instrumentation de l'essai**
- ▶ **Perspectives**

Etude des matériaux d'apport

► Microstructure brute de solidification des alliages

◆ Composition des matériaux d'apport étudiés

- Les fils se distinguent principalement par leur teneur en niobium et molybdène

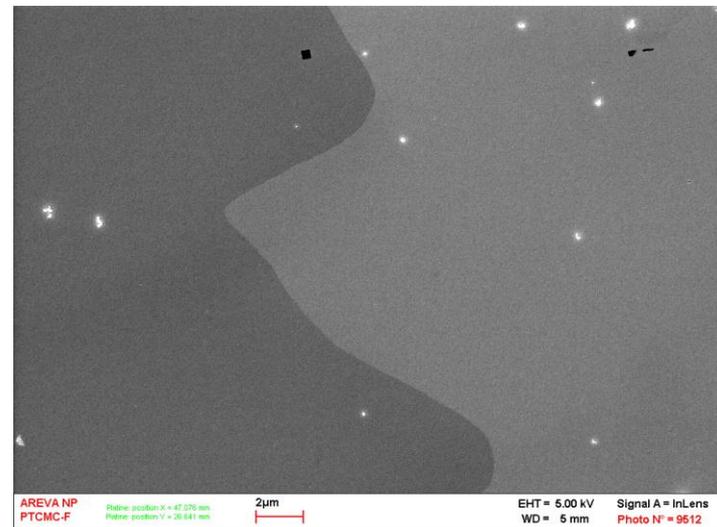
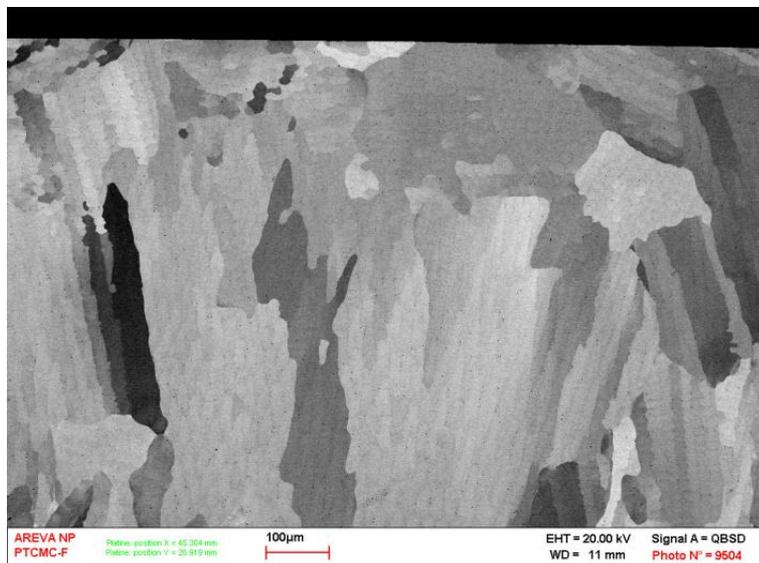
	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Mn	Si	Al	Ti	C
FM52 (NX9090JK)	60.72	28.97	8.86	0.01	0.01	0.24	0.14	0.69	0.58	0.02
FM52MS (D57804)	55.54	29.64	9.03	1.03	4	0.6	0.03	0.01	0.2	0.02
FM52MSS (NX77W3UK)	52.36	29.49	8.79	2.52	3.51	0.3	0.11	0.13	0.18	0.023

Etude des matériaux d'apport

► Microstructure brute de solidification des alliages:

◆ MEB + Analyse EDS: Alliage base nickel 52

- Peu de microségrégation – Faible précipitation (Carbonitride de titane – Cr_{23}C_6)

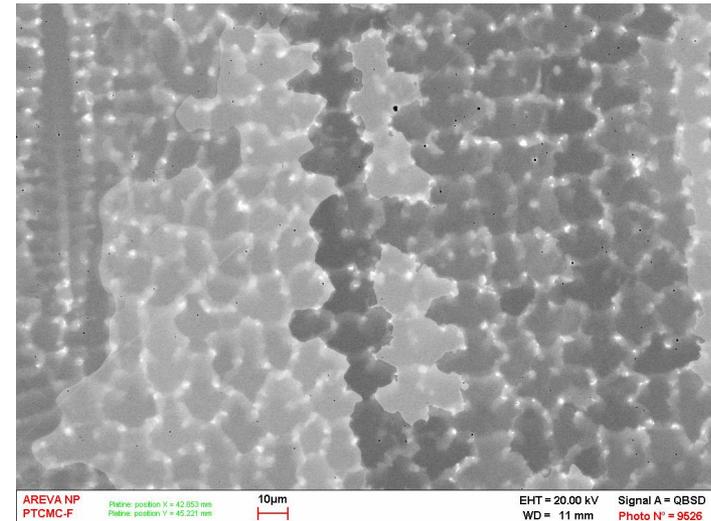
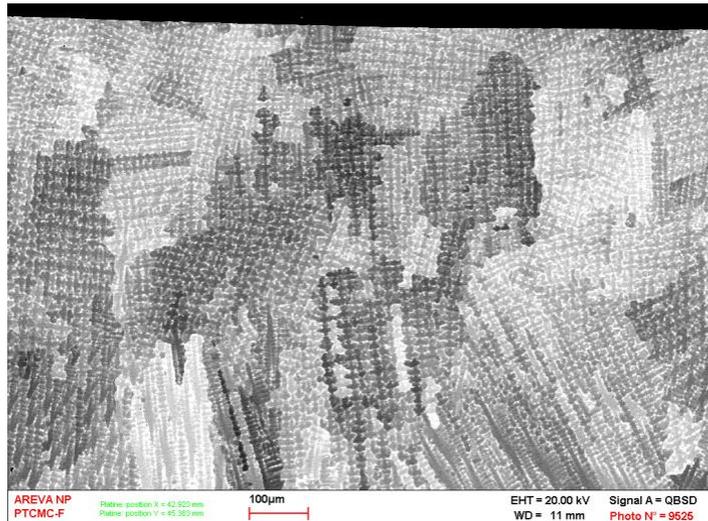


Etude des matériaux d'apport

► Microstructure brute de solidification des alliages

◆ MEB + Analyse EDS: Alliage base nickel 52 MSS

- Microségrégation dense en niobium Molybdène



	Ni	Cr	Fe	Ti	Nb	Mo
Corps de dendrite	54	32	9.14	0	1.84	3.37
Espace interdendritique	48	29	6.95	0.5	11.3	4.94

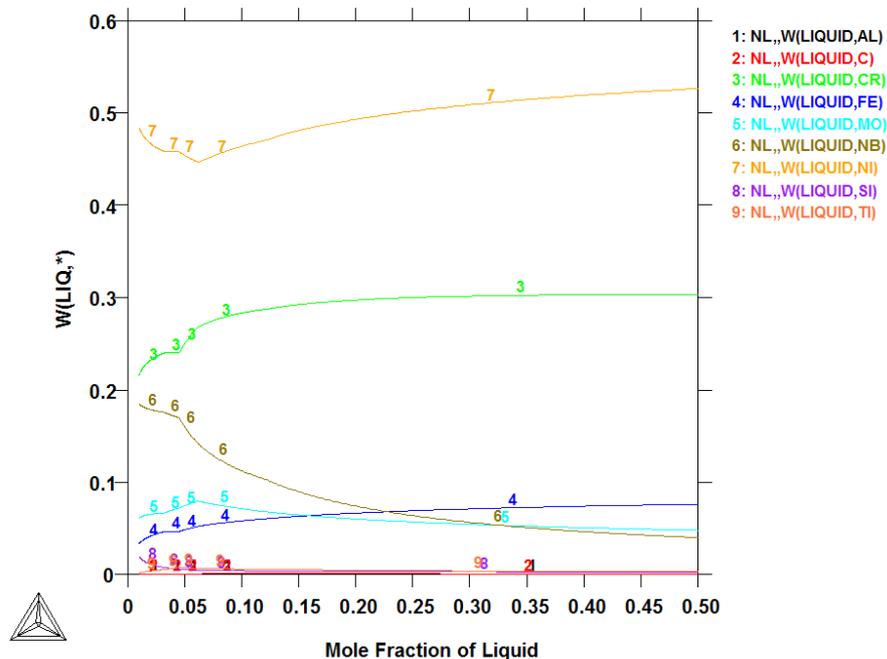
Résultats des analyses EDS

Etude des matériaux d'apport

► Microstructure brute de solidification des alliages

◆ Analyse Thermo-Calc® - 52 et 52MSS

- Loi de Scheil améliorée; Base de données TCNI5
- Bonne retranscription phénoménologique des microségrégations



Composition du liquide résiduel en fonction de la fraction molaire de liquide 52MSS

REACTEURS & SERVICES

Etude des matériaux d'apport

► Microstructure brute de solidification des alliages

◆ Analyse Thermo-Calc® Comparaison entre 52-52MS-52MSS

- Alliage 52 : Intervalle de solidification restreint et peu de phases interdendritique
- Alliage 52MS: Grand intervalle de solidification et peu de phase interdendritique
- Alliage 52MSS: Grand intervalle de solidification et une grande teneur de phase interdendritique

	T_L (° C)	T_S (° C)	ΔT	Phase interdendritique	
				M(C,N)	Autres phases
52	1379	1281	98	0,03%	X
52MS	1369	1155	214	X	0,3%
52MSS	1355	1124	231	0,2%	2,2%

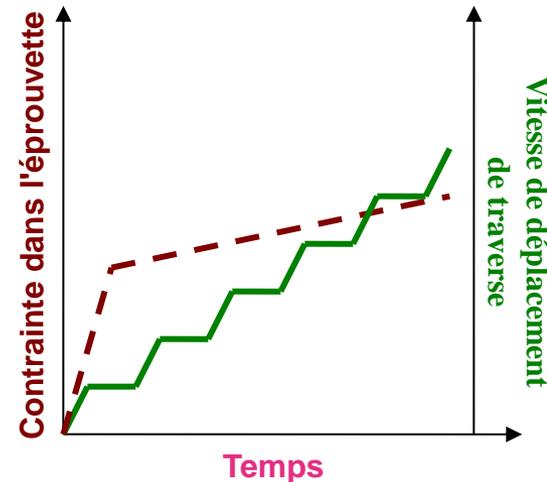
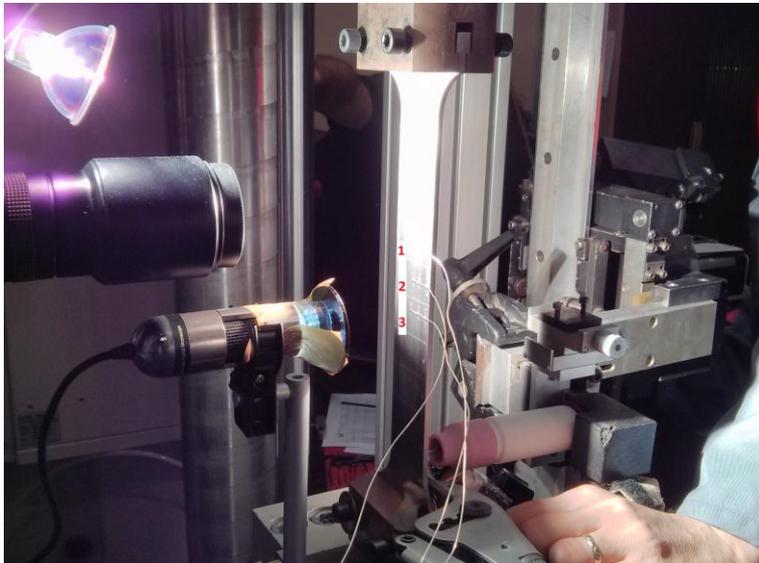
Sommaire

- ▶ **Présentation de la problématique**
- ▶ **Etude des matériaux d'apports**
- ▶ **Sensibilité à la fissuration à chaud**
- ▶ **Simulation numérique / Instrumentation de l'essai**
- ▶ **Perspectives**

Sensibilité à la fissuration à chaud

► Sensibilité à la fissuration à chaud: Essai PVR

- ◆ Essai mis en œuvre au milieu des années 70 par Böhler Welding
- ◆ Consiste en une traction couplée à une ligne de refusion sur le matériau d'étude
 - Energie constante, Vitesse de déplacement de traverse augmente par palier (2,4..16 mm/min)
 - Avantage: Discriminant vis à vis des fissures de ségrégation et DDC
 - Inconvénient: Effort dans sens longitudinal



REACTEURS & SERVICES

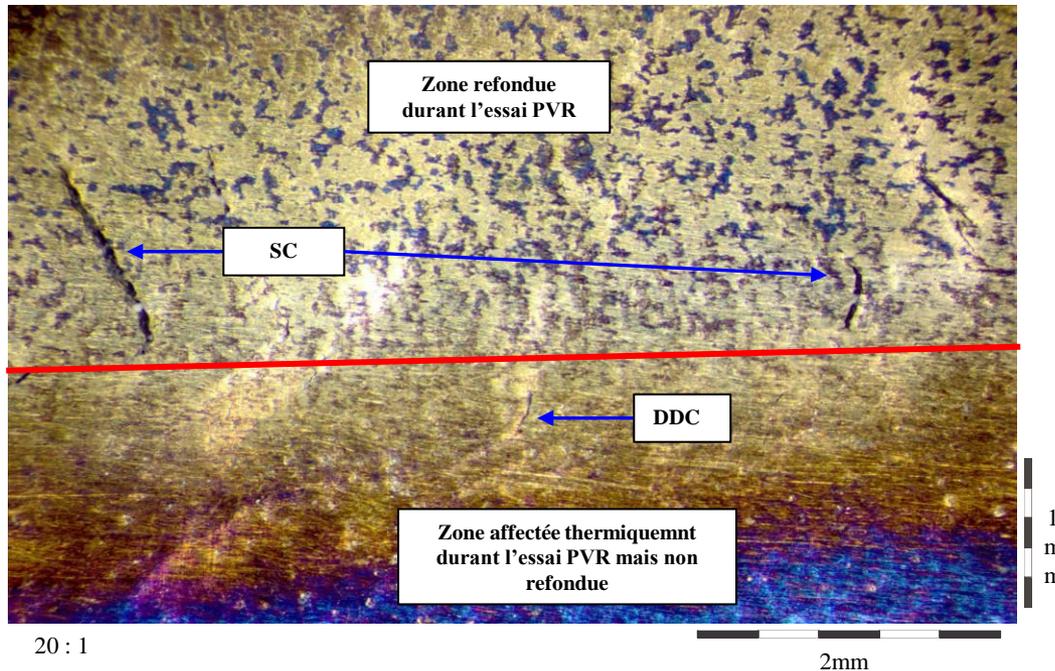
Sensibilité à la fissuration à chaud

► Sensibilité à la fissuration à chaud: Essai PVR

◆ Exploitation de l'essai

- Décompte des fissures en surface (côté soudage) en fonction de leur localisation

← Orientation de soudage



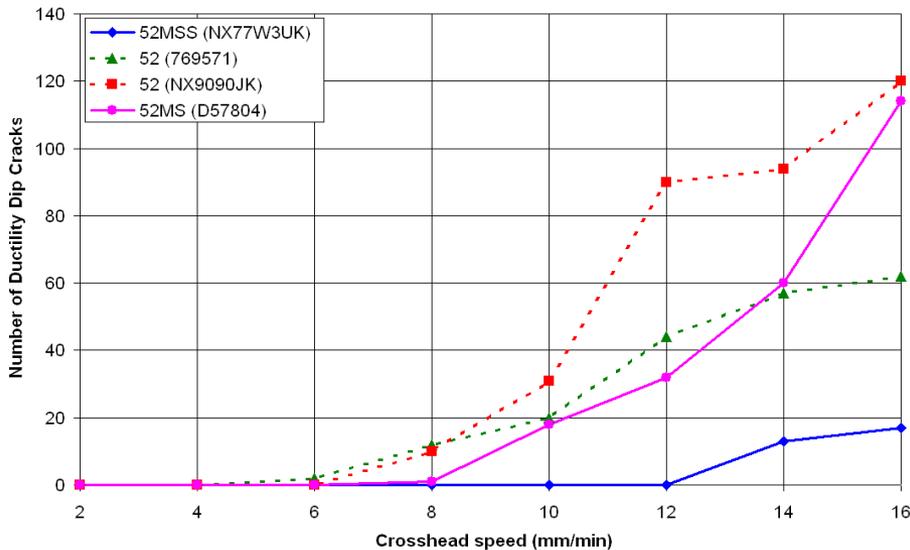
Vitesse traverse (mm/min)	Nombre de SC	Nombre de DDC
2		
4		
6		
8		
10		
12		
14		
16		

Sensibilité à la fissuration à chaud

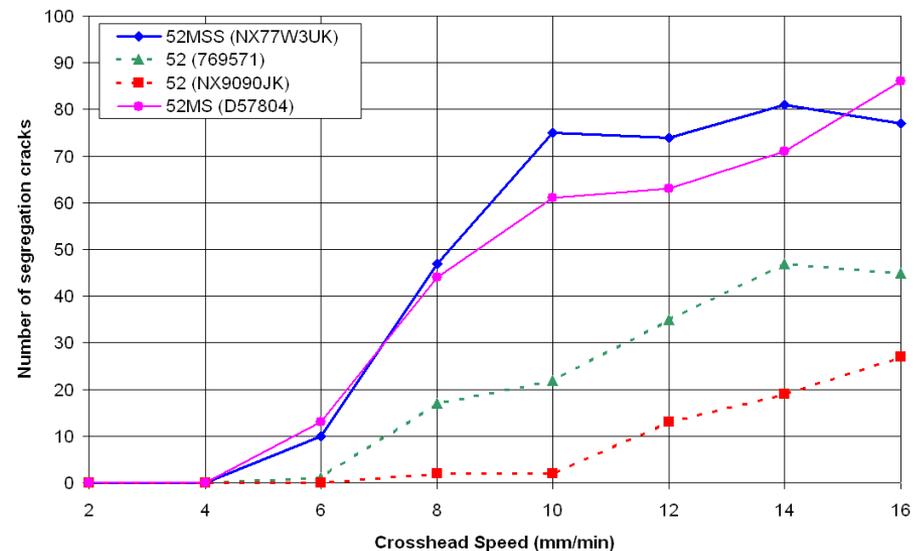


► Sensibilité à la fissuration à chaud de différents matériaux d'apport via l'essai PVR

◆ Nombre de fissure par manque de ductilité sur chaque palier de vitesse de traverse



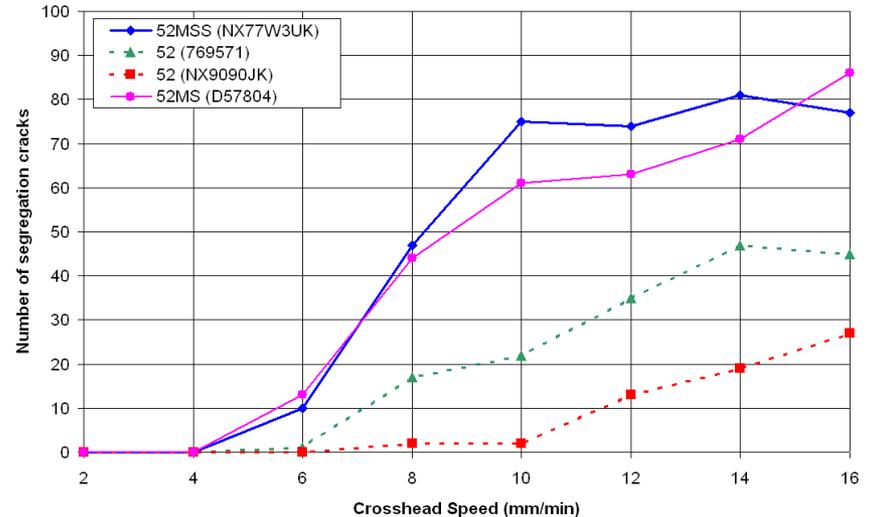
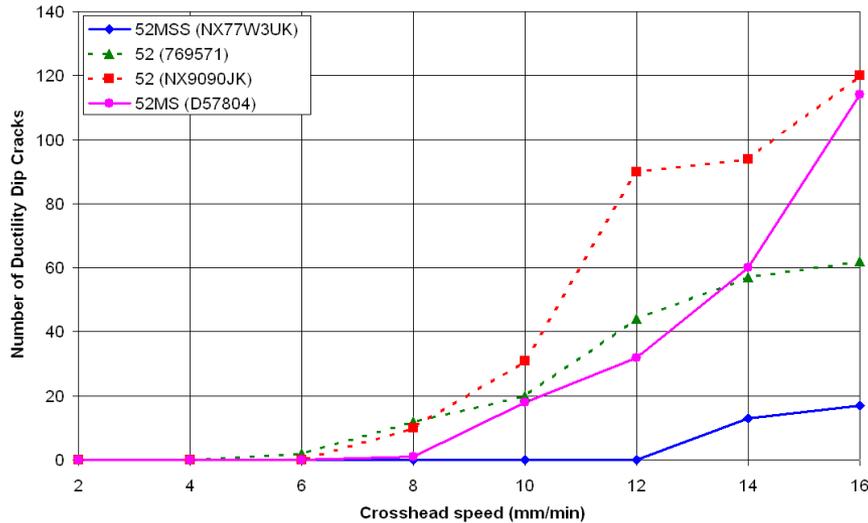
◆ Nombre de fissure de ségrégation sur chaque palier de vitesse de traverse



REACTEURS & SERVICES

Sensibilité à la fissuration à chaud

► Corrélation essai PVR / Analyses Thermo-Calc®



	T _L (° C)	T _S (° C)	ΔT	Intergranular Phases	
				M(C,N)	Other Phases
52	1379	1281	98	0,03%	X
52MS	1369	1155	214	X	0,3%
52MSS	1355	1124	231	0,2%	2,2%

Large Intervalle de solidification entraîne une sensibilité importante vis-à-vis de la SC

Grande proportion de phase intergranulaire conduit à une bonne résistance à la DDC

REACTEURS & SERVICES

Sensibilité à la fissuration à chaud



- ▶ **Conclusions sur la sensibilité à la fissuration à chaud des alliages étudiés**
 - ◆ L'essai PVR permet de discriminer les fils vis-à-vis de leur sensibilité à la fissuration à chaud de ségrégation et par manque de ductilité
 - ◆ Corrélation simulation thermo-Calc® et résultats d'essais PVR

- ▶ **Nécessité de mieux appréhender les conditions critiques d'amorçage de fissuration lors de l'essai PVR**

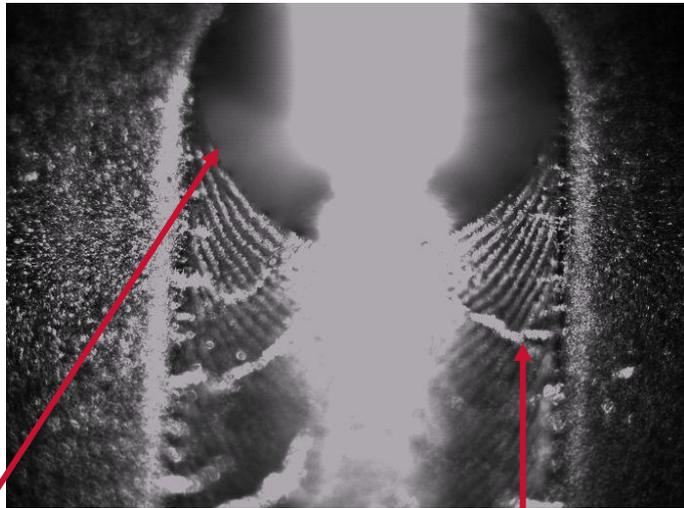
Sommaire

- ▶ **Présentation de la problématique**
- ▶ **Etude des matériaux d'apports**
- ▶ **Sensibilité à la fissuration à chaud**
- ▶ **Simulation numérique / Instrumentation de l'essai**
- ▶ **Perspectives**

Simulation numérique / instrumentation de l'essai

► Fissures de ségrégation: Visualisation de leur formation

- ◆ Développement d'outillage visuels
- ◆ Caméra CCD+ laser ou HDR



Bain

Fissures de
solidification

Caméra CCD+ laser: Matériau de base 316L(N)

REACTEURS & SERVICES



Amorce
de fissure

Bain

Caméra HDR: Métal déposé FM52

Simulation numérique / instrumentation de l'essai



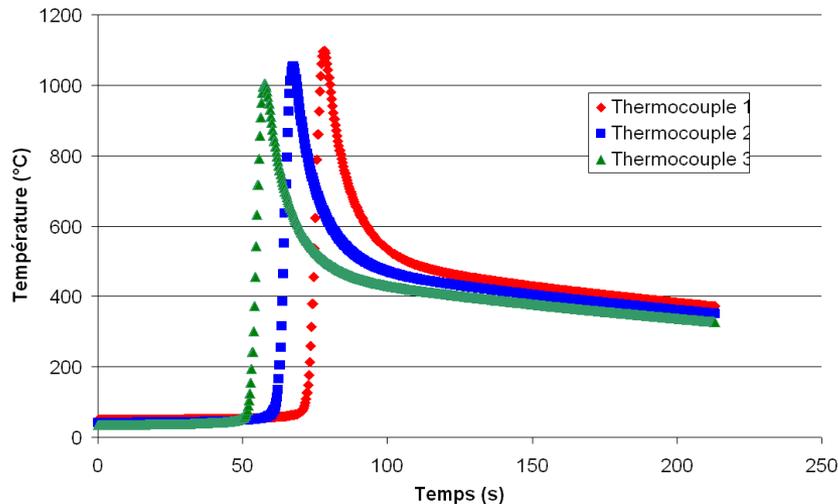
► Fissuration par manque de ductilité

- ◆ Des fissures apparaissent en dos d'éprouvette (Pas d'arc)
- ◆ Mieux appréhender les conditions critiques conduisant à la fissuration (Température / taux de déformation / vitesse de déformation / contraintes)
- ◆ Deux méthodologies: Instrumentation de l'essai / Simulation numérique

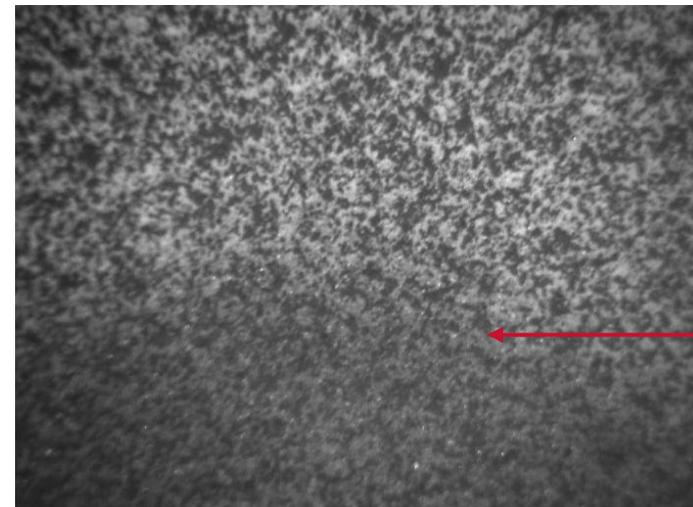
Simulation numérique / instrumentation de l'essai

► Fissuration par manque de ductilité

- ◆ Instrumentation de l'essai / Mesure de champ de température / Mesure de champs de déformation par corrélation d'images



Mesure de température en envers d'éprouvette sous passage de torche



Dépôt de mouchetis tenant à haute température

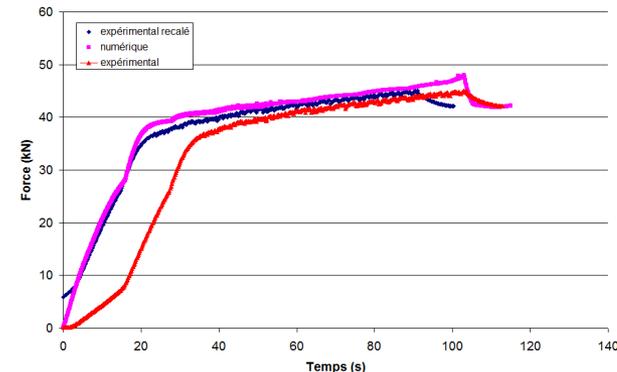
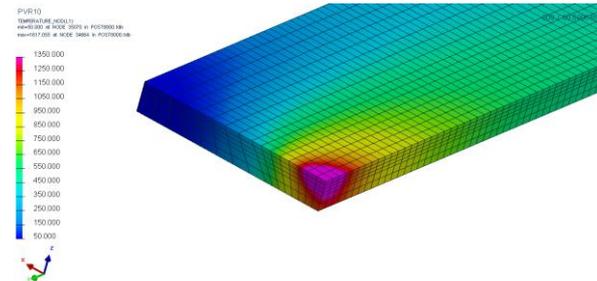
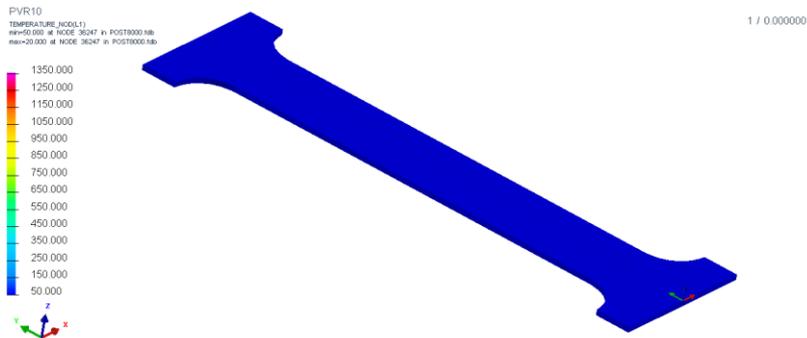
REACTEURS & SERVICES

Simulation numérique / instrumentation de l'essai

► Modélisation de l'essai PVR

◆ Modèle thermo-mécanique

- Ligne de soudage + essai de traction



► Principales conclusions

- ◆ Discrimination des fils vis-à-vis de leur sensibilité à la fissuration à chaud grâce à l'essai PVR
- ◆ Corrélation entre résultats des essais PVR et données métallurgiques issues de Thermo-Calc®
- ◆ Instrumentation de l'essai et simulation

► Perspectives

- ◆ Mesurer les champs de déformation locaux via la corrélation d'images
- ◆ Evaluer numériquement les champs de contraintes conduisant à l'apparition de la DDC