

PROGRAMME

9h00 Première séance de travail

- 1) Jean Paul MASSOUD (EDF-DPI SEPTEN Réacteurs nucléaires et Echangeurs Lyon) : *Utilisation des aciers inoxydables dans les réacteurs nucléaires*
- 2) Armin ROTH (AREVA GmbH, Technical Center, Erlangen) : *IASCC of Austenitic Stainless Steels in BWR RPV Internals*
- 3) Lionel FOURNIER (AREVA, Centre Technique du Creusot) : *Evolution de la microstructure des aciers inoxydables sous irradiation*
- 4) Thérèse STERNELAND (Sandvik Materials Technology) : *Overlay welding of heavy components using strip electrodes : new design requirements for high strength deposits and Sandvik solutions*
- 5) Denis CEDAT (AREVA, Centre Technique du Creusot) : *Utilisation de la métallurgie des poudres d'aciers inoxydables pour le nucléaire*
- 6) Yann De CARLAN, Joël MALAPLATE, Sébastien VINCENT, Denis SORNIN (DEN/DMN/SRMA, CEA Saclay) : *Les aciers ODS pour le gainage combustible des réacteurs de quatrième génération : métallurgie et comportement mécanique*

14h00 Deuxième séance de travail

- 7) Guy CROMER, Olivier LARDOT (Fives-Nordon), Jean Marc LARDON (Aubert et Duval) : *Fabrication des lignes d'expansion du pressuriseur des EPR à partir de tubes de niveau IRCC-M, forgés forés de nuance X2CrNiMo18-12 à teneur en azote contrôlée cintrés par induction*
- 8) Guy MICOLAJSKI (AREVA), Maxime LEROY, Thierry FAUDAN, Yannick PINNEUR (Industeel, Aciérie Le Creusot), Isabelle POITRAULT, Andrew GINGELL (CRMC, Le Creusot) : *Volute de pompe en acier inoxydable : 38 ans d'évolution de la qualité*
- 9) Jean Marc LARDON (Aubert et Duval, Les Ancizes) : *Nouvel acier inoxydable superausténitique B 66 pour le nucléaire*
- 10) Ana Laura CRUZ-FABIANO, Roland LOGE, Marc BERNAKI (CEMEF Sophia Antipolis), Isabelle POITRAULT, Michaela TEACA, Andrew GINGELL (CRMC Le Creusot), Frédéric PERDRISSET, Evelyne GUYOT (AREVA Creusot Forge) : *Modèles de recristallisation et de croissance de grains de l'acier inoxydable 304L et applications industrielles*
- 11) Julien FAVRE, Pauline LAMBERT, Franck MONTHEILLET, Christophe DESRAYAUD (UMR CNRS 5307, ENSMSE), François ROCH (AREVA C.R. Paris) : *Modélisation de la recristallisation du 304L avec effet d'addition de niobium*
- 12) Jean Michel PARIS (AREVA, Creusot Forge), Geoffroy GARZINO (Netec Chalons/Saône) : *Mise au point du contrôle US des aciers inoxydables forgés à gros grains*

AVANT PROPOS

Cette journée, organisée conjointement par le Cercle d'Etudes des Métaux, AREVA et la section Sud Est de la SF2M, avec le soutien du Pôle Technologique de Bourgogne, du Pôle de compétitivité VIAMECA et de l'Agence Rhône Alpes du Développement et de l'Innovation, a rassemblé 70 personnes dont 60% du monde industriel, 25% de représentants des centres techniques et universitaires et 15% d'institutionnels. Le programme de 12 conférences peut être divisé en cinq parties :

- une introduction qui permet de situer la part des aciers inoxydables dans les réacteurs des différentes générations,
- une première partie relative aux mécanismes de dégradation des aciers inoxydables austénitiques sous irradiation,
- une deuxième partie relative aux évolutions des différents moyens de mise en oeuvre des aciers inoxydables,
- une troisième partie relative aux solutions innovantes,
- une quatrième partie relative au suivi de la taille de grains, grâce à la modélisation et à l'adaptation des moyens de contrôle.

1 – Situation des aciers inoxydables dans les différents réacteurs : Les aciers inoxydables représentent 28% de la part des aciers dans les réacteurs à eau pressurisée (REP) et 50% dans les réacteurs à neutrons rapides (RNR). Il s'agit de pièces de très grandes dimensions qui nécessitent une bonne homogénéité microstructurale avec des problèmes de fatigue et de corrosion au contact du fluide caloporteur sur une durée de vie longue (60 ans). Les aciers inoxydables se trouvent sous différentes formes :

- revêtements sur acier 16MnNiMo5 choisi pour cause de caractéristiques mécaniques,
- pièces moulées pour volutes de pompes et coudes sur tuyauterie primaire,
- pièces forgées pour tuyauterie, essentiellement sur les circuits primaires,
- pièces laminées pour boulonnerie, tiges de vannes, entretoises, ailettes de turbines.

Les aciers le plus utilisés sont les aciers austénitiques du type X2CrNi19-10, X2CrNiMo18-12 à l'état forgé ou laminé. Les duplex sont utilisés à l'état moulé (GX3CrNi20-09) et les aciers martensitiques sont utilisés à l'état forgé ou laminé pour les pièces sollicitées mécaniquement pour la boulonnerie, les tiges de vannes et les plaques d'entretoises. Les aciers ferritiques sont faiblement utilisés, essentiellement pour les tubes d'échangeurs ou de condenseurs. Dans les réacteurs à neutrons rapides pour lesquels il y a une forte irradiation avec augmentation de température, il y a une forte opportunité pour l'utilisation d'aciers ferrito-martensitiques renforcés par dispersion d'oxydes nanométriques.

2 – Dégradation par irradiation : Dans les réacteurs à eau bouillante (BWR) utilisés notamment en Allemagne, les premiers incidents de fissuration des aciers austénitiques par irradiation ont été observés dans la décennie 1990. Les travaux coopératifs conduits par l'EPRI ont abouti à déterminer les causes de ce phénomène. Il y a un effet de durcissement par irradiation, concentration des déformations sous la forme de bandes de glissement et propagation des fissures sous forme intergranulaire en liaison avec la modification de la composition chimique du voisinage des joints de grains (appauvrissement en chrome et enrichissement en nickel). Des remèdes ont été apportés suite à ces travaux pour réduire ce phénomène, on peut citer notamment l'allègement des contraintes du revêtement interne de cuves par voie mécanique et la réduction du potentiel de corrosion par voie chimique.

Dans les réacteurs à eau pressurisée, les premiers incidents ont été observés dans les années 1980. Les études menées suite à ces premiers incidents ont conduit à identifier un effet de durcissement de l'acier avec précipitation de phases, modification de la chimie du joint dont les effets sont très importants dans le domaine de température 300-700°C. Dans le contexte de l'augmentation de la durée de vie des centrales, la connaissance et la prédiction de l'évolution de la microstructure des aciers inoxydables austénitiques sous irradiation constitue un enjeu majeur pour les internes de cuves. Les modèles mis au point ont permis d'apprécier les effets de gonflement avec présence d'un pic vers 470°C très dépendant de la dose d'irradiation. C'est ainsi qu'en fonctionnement du type REP à 300°C, le gonflement est très faible, de l'ordre de 0,23%, alors qu'il peut atteindre des valeurs de 6% en fonctionnement du type RNR à 335°C. Ces modèles ont permis de modifier la conception de l'enveloppe du cœur des réacteurs avec assemblage de renforts horizontaux par visserie en acier X5CrNiMo18-12 écroui.

3 – Evolution des procédés de fabrication : Un premier exemple d'évolution a été montré avec le rechargement sous flux spécifiques d'internes de cuve avec des plats en acier inoxydable austénitique de haute pureté pour obtenir des dépôts garantissant un niveau minimum de limite d'élasticité de 550 MPa, avec de très bas taux de résiduels P, S, Cu, V, Co et B. Un tel niveau de caractéristiques mécaniques est obtenu avec des nuances du type X8CrNiMn20-11-2 et X4CrNiMoMn22-14-2-1 (AISI 308L et 309L).

Un deuxième exemple d'évolution du process a été l'utilisation de la métallurgie des poudres pour réduire les ségrégations d'éléments d'alliage dans la réalisation de grosses pièces pour la tuyauterie primaire et les corps de pompes. Il y a une réelle opportunité d'utilisation de cette technique pour les réacteurs de la génération 4 et des essais sont actuellement en cours sur le réacteur pilote ASTRID. Les résultats obtenus après compaction isostatique à chaud montrent que, par rapport aux nuances forgées, les tailles de grains sont beaucoup plus fines après traitement de mise en solution, avec des résultats analogues en tenue à la fatigue, tenue à la corrosion et aptitude au soudage. Le seul problème réside dans l'obtention de résiliences plus faibles qu'en forgé à basse température, en liaison vraisemblablement avec le taux d'oxydes, paramètre qu'il faudra surveiller tout particulièrement dans le cadre d'un futur développement industriel.

Un troisième exemple d'évolution du procédé de fabrication est la réalisation de lignes d'expansion du pressuriseur des EPR à partir de tubes en acier inoxydable du type X2CrNiMo17-12-2 de diamètre externe 406mm et d'épaisseur 42mm à très bas taux inclusionnaire. Les tubes sont élaborés au four à arc par technique VOD et forgés pour obtenir des longueurs de 8m qui sont ensuite forées par usinage. Le cintrage des tronçons de tube est réalisé par induction, puis il y a une première mise en propreté avant le traitement thermique, ensuite, le soudage, suivi par le contrôle CND à 100% avec vérification de l'obtention des caractéristiques mécaniques. Il y a enfin l'épreuve hydraulique et le décalaminage en milieu nitrofluorhydrique. Cette fabrication rigoureuse suit les exigences du RCC-M avec réalisation d'une maquette pour qualification.

Un quatrième exemple d'évolution du procédé de fabrication est relatif à la mise en forme de volutes de pompe en acier duplex GX3CrNi20-9 par fonderie. Il a été montré l'évolution du procédé de fabrication de pièces de 28 tonnes depuis la décennie 1970. Dans cette période, les résiduels ont été abaissés d'une manière sensible avec une division par 8 du taux de soufre, par 5 du taux de cobalt et par 2 du taux de phosphore. Cela a conduit à une meilleure fiabilité

d'obtention des caractéristiques mécaniques après hypertrempe et stabilisation à 400°C. Par ailleurs, les moyens de modélisation numérique ont conduit à une réduction significative des réparations inhérents à toute pièce de fonderie. L'utilisation de résines et l'optimisation du séchage du moule avant coulée ont conduit à un bien meilleur état de surface de la pièce coulée, ce qui a réduit la durée des temps de préparation ultérieurs. Le taux de réparation qui peut être mesuré par la quantité de soudure déposée est passé de 200kg en 1981 à 50kg en 2010.

4 – Solutions innovantes : Un premier exemple de solution innovante est l'extrapolation du procédé de métallurgie des poudres à la réalisation d'aciers ferritiques ou martensitiques renforcés par oxydes d'yttrium et/ou de titane par atomisation, mechanical alloying, filage ou compaction isostatique à chaud. Il est obtenu à la suite de cette gamme de fabrication une structure ferritique avec une teneur en chrome comprise entre 13 et 20% et une structure martensitique avec 9% de chrome extrêmement stable, puisque la limite d'élasticité, égale à 1000 MPa sur la nuance ferritique, ne commence à chuter qu'à partir de 450°C. La recristallisation se traduit bien sûr par une chute de cette caractéristique au niveau de 600 MPa. Ces produits présentent une très forte anisotropie, leur ductilité est fortement réduite par une augmentation de la vitesse de déformation et la rupture en fluage se fait pratiquement sans déformation, de manière intergranulaire. La recristallisation entraîne également une chute de la résistance aux chocs, mais ce critère n'est pas déterminant dans la mesure où ce type de matériau sera utilisé exclusivement sous forme de produit mince. En effet, son très faible taux de gonflement sous irradiation à des températures de 400°C en fait un bon candidat pour les crayons contenant le combustible dans les réacteurs de génération 4.

Un deuxième exemple de solution innovante est la mise au point d'une nouvelle nuance d'acier superausténitique à forte teneur en azote (0,5%) qui peut atteindre 1200 MPa de résistance avec 30% d'écrouissage. Cette nuance, déjà utilisée en boulonnerie, a des niveaux de résistance à la corrosion en eau de mer équivalents à ceux de l'alliage base nickel 625. Elle peut donc être envisagée pour les composants de pompes ou éléments de condenseurs dans le cas de centrales côtières où un circuit de refroidissement ouvert en eau de mer est souvent utilisé. Cette nuance a d'ailleurs été substituée à l'alliage 625 pour les circuits eau de mer des sous marins du type Baracuda. Il est à signaler que cette nuance peut être élaborée par métallurgie des poudres, ce qui peut présenter de l'intérêt pour les composants de pompes de fortes dimensions sensibles aux ségrégations d'éléments d'alliage.

5 – Modélisation de la croissance et du contrôle des grains : Trois conférences ont été consacrées sur ce sujet afin de mieux maîtriser la structure des composants du circuit primaire en acier inoxydable austénitique.

La première conférence a présenté la confrontation de différents modèles de grossissement de grains à plusieurs situations correspondant à des tailles de grains initiales assez voisines, tant par la taille moyenne que par la dispersion. Dans un contexte où la mobilité et l'énergie des joints sont isotropes avec l'absence de phases précipitées, le modèle qui prend en compte l'influence de la taille des grains par rapport à la taille moyenne sur leur mobilité est celui qui est le plus représentatif de la réalité industrielle.

La deuxième conférence a présenté l'influence d'une addition de niobium sur la taille de grains d'un acier inoxydable du type 304L après traitement thermomécanique simulé par essai de traction à chaud. L'addition de niobium doit être parfaitement maîtrisée dans ses conséquences sur les phénomènes de précipitation-dissolution, car l'interaction de cet élément

avec le carbone et l'azote de l'acier peut conduire à des résultats surprenants et inverses à ceux escomptés.

La troisième conférence a présenté la mise au point d'une méthode de contrôle ultrasonore des aciers inoxydables forgés à gros grains. Cette méthode consiste à disposer d'une seule sonde pour effectuer la totalité de l'inspection avec un ensemble multi-éléments concentriques de forme annulaire. Cet équipement est susceptible d'inspecter des épaisseurs de métal comprises entre 10 et 78mm avec un rapport signal/bruit inférieur à 6dB. Des lois focales ont été définies par un logiciel de simulation ultrasonore dans lequel l'ensemble du contrôle a été modélisé. Une procédure a été élaborée pour permettre la mise en œuvre de ce dispositif par des opérateurs spécialisés.

Ce colloque aura montré une nouvelle fois que les performances exigées des matériaux dans l'industrie nucléaire sont non seulement un moteur pour progresser dans les connaissances et l'amélioration en service de ces matériaux, mais encore, compte tenu de la taille des pièces rencontrées, une incitation puissante à l'innovation en matière de procédés de fabrication et de contrôle des pièces.