

Étude de l'effet géométrique des manchettes déformées de cannes chauffantes de Cruas 4 et Bugey 3 sur la propagation par fatigue

H.-M.-T. Ngo (EDF / DPN / UTO)

Contexte industriel et Ecart rencontré en Exploitation :

Le pressuriseur est un Équipement Sous Pression dont le rôle est de maintenir le Circuit Primaire à une pression constante au cours du fonctionnement du réacteur.

Lors d'une opération programmée de remplacement des cannes chauffantes défectueuses en 2012, il a été observé que 2 Manchettes centrales de Canne Chauffante du Pressuriseur (MCCP) de Cru4 et Bug3 ont été déformées. La conséquence directe est l'impossibilité d'introduire une nouvelle canne chauffante et la condamnation de la manchette. Les investigations complémentaires par examen des Rapports de Fin de Fabrication (RFF) concluent à une déformation d'origine fabrication.

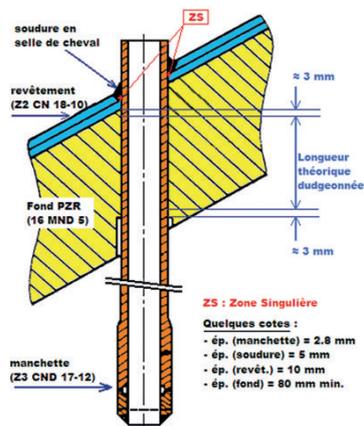


Figure 1 : Géométrie de la MCCP.

La démonstration de la robustesse du matériel, vis-à-vis de la fissuration par fatigue d'un défaut hypothétique amorcé dans la Zone Singulière (ZS) de la MCCP, a été démontrée par le constructeur AREVA sur une durée théorique de 40 ans, allant de la Mise en Service Industrielle (MSI) des tranches jusqu'à la fin de la quatrième Visite Décennale. Dans le cas d'une géométrie déformée de la manchette, donc hors des hypothèses initiales de conception, l'Autorité de Sécurité Nucléaire (ASN) s'interroge sur la validité de ces calculs et demande d'évaluer l'impact géométrique de la déformation des MCCP sur les résultats de propagation disponibles.

Démarche :

Le joint soudé en selle de cheval incliné de profondeur de 5 mm à pénétration partielle entre la MCCP (en Z3 CND 17-12) et la chemise inoxydable (en Z2 CN 18-10) du pressuriseur assure la fonction de résistance et d'étanchéité. Il n'y a pas continuité de matière entre la manchette et le fond du pressuriseur (en 16 MND 5). De par sa géométrie, la ZS est naturellement assimilable à un fond de fissure : elle est le siège de concentration de contraintes aigües. Il en découle que l'étude doit utiliser, de façon appropriée, le concept du taux de restitution de l'énergie $G(\theta)$ en Mécanique de la Rupture.

Cette fonction est disponible dans Code_Aster (commande CALC_G) :

$$G_{local} = \frac{-\partial W}{\partial \Omega}$$

Pour réaliser l'étude, deux maillages du modèle MCCP dans son environnement doivent être construits au préalable : l'un avec la géométrie saine, et l'autre avec la géométrie déformée de la MCCP. La comparaison du taux de restitution d'énergie élastique $G(\theta)_{local}$ pour chacun d'eux permet d'évaluer l'amplification due à la déformation géométrique de la MCCP. De cette amplification peut être déduite la nouvelle cinétique de propagation par fatigue par rapport à celle initiale du constructeur.

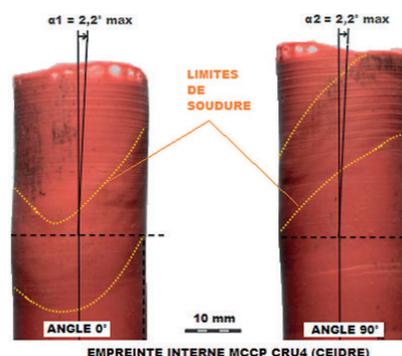


Figure 2 : Déviation géométrique de la tête des manchettes.

Étude de l'effet géométrique des manchettes déformées de cannes chauffantes de Cruas 4 et Bugey 3 sur la propagation par fatigue

H.-M.-T. Ngo (EDF / DPN / UTO)

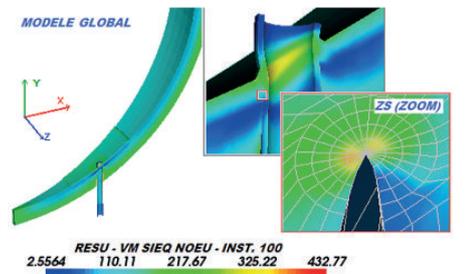


Figure 3 : Champ de contraintes de Von Mises sur le modèle sous chargement à la pression de calcul seule à 171.4 bar

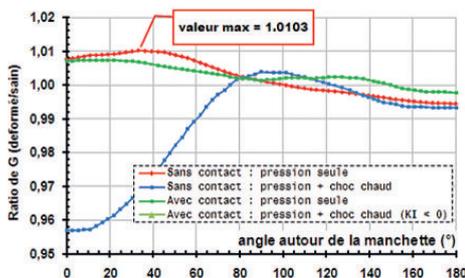


Figure 4 : Évolution des ratios de G élastique autour de la manchette pour les modèles avec et sans contact (MCCP / Fond)

Maillages et chargements associés :

Les DEUX maillages 3D sont construits sur un secteur du modèle, avec des éléments quadratiques volumiques et surfaciques. Les éléments 2D de type coques sont utiles pour l'application des chargements dimensionnants qui sont :

- une pression de calcul à 171.4 bar avec l'effet de fond sur la manchette (Figure 3),
- cumul d'une pression maximale à un transitoire thermique le plus pénalisant de 2^{ème} catégorie.

Afin de mieux représenter le champ de déplacement en \sqrt{r} , les éléments PENTA15 spécifiques de BARSOUM ont été introduits autour de la ZS

(commande MODI_MAJILLAGE, option 'NOEUD_QUART'). Le contact, sans frottement, est activé en formulation continue dans la zone du dud-geonnage (commande DEFL_CONTACT, option FORMULATION='CONTINUE'). Par ailleurs, pour conserver l'hypothèse (très) pénalisante du constructeur, il est prévu d'étudier le cas où le contact puisse être désactivé, ce qui autorise la manchette à s'interpénétrer dans le fond du pressuriseur et donc, à ouvrir d'avantage les lèvres de la ZS.

La mécanique de la rupture est post-traitée en mode POURSUITE des calculs thermo-élastiques linéaires en définissant le fond de fissure (commande DEFL_FOND_FISS) et en évaluant les taux de restitution d'énergie (commande CALC_G).

Résultats et post-traitement en mécanique de la rupture :

L'amplification en termes de G élastique due à la déformation des manchettes est donnée à la figure 4 :

■ Dans une configuration réaliste où le contact entre la manchette et le fond du pressuriseur est activé, le chargement de pression seul conduit à une augmentation négligeable du rapport des taux de restitution (moins de 0.08%) ; le chargement cumulé (pression + transitoire thermique), quant à lui, apporte une contribution bénéfique vis-à-vis du comportement de la ZS. En effet, la thermique engendre des contraintes de compression dans la manchette (Figure 5) refermant les lèvres de la ZS. On peut donc conclure que dans cette hypo-

thèse réaliste, la déformation géométrique des MCCP ne modifie donc pas la cinétique de propagation par fatigue d'un défaut amorcé dans la ZS.

■ Si on retient l'hypothèse du constructeur en omettant le contact entre la manchette et le fond du pressuriseur, l'augmentation maximale du ratio de G élastique due à la déformation des manchettes est de $\gamma = 1.03\%$. Traduit en Facteur d'Intensité de Contrainte K, la nouvelle cinétique de propagation avec la loi de Paris s'écrit :

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \left(\gamma^2 \cdot \Delta K_{eff} \right)^n$$

On constate alors (Figure 6) que cette hypothèse pénalisante conduit à une durée de propagation de 34 ans (au lieu de 40 ans initialement prévus) pour un défaut hypothétique initié dans le fond de la ZS, avant d'atteindre la hauteur maximale admissible de 1.17 mm dans la manchette.

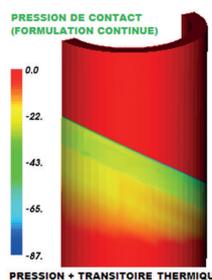


Figure 5 : Cartographie de la pression de contact autour de la MCCP sous l'effet prédominant de la thermique



Figure 6 : Évolution de la propagation par fatigue d'un défaut hypothétique dans la MCCP en fonction du temps