



Analysis of cracks in thermal barrier cover of 900 MW PWR primary pumps

Ribes F., Maupu V.
EDF, France

ABSTRACT

In 1990 cracks have been detected in thermal barrier covers of primary coolant pumps used in the french 900 MW series and since that time inspections have demonstrated that this problem affects 98% of the pumps. The Machines Branch and the National Hydraulics Laboratory of the EDF Research & Development Division have contributed to increasing knowledge of these cracks by carrying out site tests, thermohydraulical and thermomechanical calculation, with the two objectives of optimizing the inspection frequency and evaluating corrective solutions.

INTRODUCTION

Les pompes primaires des tranches 900 MWe possèdent un système de refroidissement appelé barrière thermique (BT). Celle-ci est située au-dessus de la roue de pompe et a pour fonction de réduire le flux de chaleur du circuit primaire vers les parties supérieures de la pompe, en particulier le palier de pompe et les joints d'arbre (cf. figure 1).

En 1991, les expertises après découpe de deux enveloppes de barrières thermiques ont montré le caractère générique de la fissuration en peau interne à partir du congé situé au bas de l'écran thermique (cf. figure 2). Les défauts transgranulaires présentent un faciès caractéristique d'un phénomène de fatigue.

Afin d'optimiser les procédures de contrôle et de contribuer à l'évaluation des modifications proposés par le constructeur, EDF a engagé un programme d'étude sur ce problème.

Le constructeur des pompes Jeumont Industrie (JI) a réalisé des études de nocivité de ces défauts d'enveloppe et cherché les chargements responsables de leur amorçage et de leur propagation. Ces études s'appuient sur une modélisation 2D axisymétrique et concluent sur la stabilité des défauts et une propagation inférieure à 1 mm/an.

Afin de mieux comprendre les chargements thermiques qui règnent dans la BT, des essais sur site et sur boucle ont été réalisés. Au vu des résultats, un recalage du modèle thermique de JI s'impose. De plus, les chargements fluctuants considérés dans les études de propagation n'ont pas été observés. Il est donc nécessaire de réétudier la propagation.

1. ESSAIS

Afin de comprendre et de quantifier les chargements réels des barrières thermiques, des essais sur des pompes primaires instrumentées ont été réalisés sur le site de Tricastin (07/95) et sur une boucle de Jeumont Industrie (03/96). Les résultats sont exploités pour recalculer les champs de température à l'intérieur de la BT.

1-1 - Instrumentation

Les mesures sont réalisées à partir de sondes de température implantées dans différents plans à l'intérieur et à l'extérieur de la barrière thermique (cf. figure 1). Les sondes utilisées à Jeumont sont plus importantes en nombre qu'à Tricastin. Elles sont complétées par des mesures d'exploitation (pression, débit, vitesse de rotation, puissance de la tranche), destinées à caractériser les conditions génératrices des sollicitations de la barrière thermique.

1-2 - Principaux résultats

Les phénomènes observés lors des essais Tricastin et Jeumont sont parfaitement comparables. Les principaux résultats sont :

- la distribution des températures est fortement dissymétrique pour tous les points éloignés de l'arbre et donc influencés par l'injection décentrée.
- la température dans la lame d'eau et la cavité arrière de roue est assez homogène. Ce sont des zones de forte convection.
- dès le démarrage de la pompe, en début du chauffage, une entrée d'eau froide s'effectue dans le bas de l'écran thermique, zone des fissures d'enveloppe. Au fur et à mesure du chauffage, des fluctuations de température apparaissent dans cette zone. Les durées de ces fluctuations sont assez difficiles à estimer, néanmoins elles semblent évoluer entre 10 et 80 secondes.

L'influence de différents transitoires a été quantifiée. On montre ainsi que :

- un changement de file du réfrigérant RRI ou une baisse de la température primaire influence très peu les températures à l'intérieur de l'enveloppe,
- un arrêt/redémarrage à chaud des pompes ne modifie pas énormément la température dans la cavité arrière roue,
- les pertes d'injection RCV ou de réfrigérant RRI conduisent à une augmentation globale des températures à l'intérieur de la barrière thermique.

2. ETUDE DE NOCIVITE DES FISSURES D'ENVELOPPE DE BT

2.1 Modélisations

Parmi les chargements que subit une enveloppe de BT, on distingue les transitoires issus des modifications de mode opératoire et les petites fluctuations autour d'un régime opératoire établi. Les essais sur le site de Tricastin ont mis en évidence les transitoires suivants :

- le chauffage/refroidissement de la tranche,

- le démarrage/arrêt de la pompe, circuit primaire chaud,
- des fluctuations thermiques notables dans la zone de fissuration des enveloppes durant le régime continu à chaud.

On développe deux modélisations thermomécaniques (2D et 3D) réalisées avec le code d'éléments finis Aster.

Le modèle 3D est un modèle sans fissure utilisé pour comprendre la non-axisymétrie des champs de température et évaluer son influence mécanique. Il prend les champs de température d'un autre calcul 3D couplant thermohydraulique et thermique solide (code N3S/Syrthes) [2]. La thermohydraulique concerne l'intérieur de l'enveloppe, serpentins inclus, et la thermique solide concerne l'enveloppe (cf. figure 2). Le modèle 2D axisymétrique permet, quant à lui, d'étudier la propagation et la stabilité des fissures d'enveloppe en modélisant celles-ci.

2.2 Chargement global

Le seul chargement mécaniquement significatif est le chargement d'origine thermique. Durant le régime continu à chaud, le fort gradient thermique que subit l'enveloppe de BT lui impose une déformation en flexion. Cet effort de flexion conduit à des contraintes élevées dans le congé de rayon 2 mm, celui-ci jouant le rôle de concentrateur de contrainte. La zone du congé est fortement plastifiée (cf. figures 3 et 4).

2.3 Amorçage

Le transitoire de chauffage-refroidissement de la tranche est principalement responsable de l'amorçage rapide des fissures. Par contre, le transitoire de démarrage à chaud de la pompe n'est pas aussi nocif que l'on pensait avant les essais. Le calcul 3D a mis en évidence une zone préférentielle d'amorçage dans le congé et sous le jet de l'injection (cf. point Q figures 3 et 4).

Tableau 1 : Facteur d'usage pour les grands transitoires au point Q.

	facteur d'usage unitaire	Nombre de transitoires sur		facteur d'usage sur	
		10 ans	30 ans	10 ans	30 ans
Chauffage-refroidissement	$6,87 \cdot 10^{-2}$	23	60	1,58	4,12
Démarrage-arrêt à chaud	$2,87 \cdot 10^{-3}$	90	204	0,26	0,59

2.3 Stabilité

La stabilité d'un défaut pénalisant 2D axi est étudiée pour le chargement le plus pénalisant constitué par le pic de contrainte lors d'un démarrage à chaud (~ 80 s après le démarrage). Le champ de température provient du calcul 3D couplé thermohydraulique/thermique solide dans le plan de l'injection qui est le plan le plus contraint.

Le facteur d'intensité de contrainte maximum est obtenue pour une fissure de 5 mm inclinée de -15° . Pour cette géométrie et en tenant compte de la plasticité, la stabilité est démontrée.

2.4 Propagation

La propagation est étudiée en considérant un comportement élastique linéaire et en utilisant une loi de Paris adaptée au matériau. Elle repose sur le phénomène des fluctuations de

température dans la zone de fissuration. La modélisation de ces fluctuations est réalisée en 2D axi par une condition limite : température extérieure imposée (eau de BT) et un coefficient d'échange variable $H(y, t)$ fonction de l'ordonnée sur la paroi de l'enveloppe et du temps.

$$H(y, t) = f(t) \Delta H(y) + H(y)$$

où $H(y)$ est le coefficient d'échange à affecter pour obtenir un champ thermique moyen en accord avec le champ thermique moyen des essais.

$\Delta H(y)$ est une fonction triangulaire, nulle à l'extérieur du segment ΔY et maximum au niveau du congé (cf. figure 5).

1ère étape :

Afin d'évaluer la sensibilité de la propagation à l'amplitude thermique d'une fluctuation, à sa durée et à la hauteur de paroi affectée par celle-ci, on réalise une étude paramétrique avec :

$f(t) = \sin(2\pi/T t)$	où	T =	15	30	60 s
amplitude thermique			20°	25°	30° C
hauteur affectée			40	100 mm	

Cette étude de sensibilité montre que les petites fluctuations conduisent à des chargements en fond de fissure (ΔK_I) proches du seuil de non propagation. Par contre, un faible nombre de grandes fluctuations (i.e. 60s 30°C 100mm) conduit à une propagation importante. Enfin, pour une fluctuation donnée, la vitesse de propagation décroît lorsque la fissure avance.

2ème étape :

$f(t)$ est directement tiré d'un enregistrement d'essai. On calcule alors l'évolution du facteur d'intensité de contrainte K_I . Sur cette durée de simulation (ici 1000s), on peut calculer la propagation en décomptant des cycles de K_I par une méthode Rainflow et en utilisant la loi de Paris. On cherche ensuite une propagation à un an de fonctionnement. Pour cela, on décompte les fluctuations thermiques sur une longue durée (plusieurs heures). Ensuite, on identifie les fluctuations thermiques et les fluctuations de K_I grâce au calcul sur 1000 s. On peut alors calculer la propagation sur une durée plus significative.

Tableau 2 : Identification entre les fluctuations therm. et celles de K_I par comptage Rainflow.

classes	ΔK_I (MPa \sqrt{m})	Cycles sur 1000 s	prop. (nm/1000s)	prop. (mm/an)	ΔT (°C)	Cycles sur 1000 s	prop. (mm/an)	Cycles sur 1 heure	prop. (mm/an)
1	11	0	0,00	0,00	44	0	0,00	0	0,00
2	9	0,5	5,90	0,15	36	0,5	0,15	1	0,08
3	7	0,5	2,16	0,05	28	1	0,11	2,5	0,08
4	5	4	4,50	0,11	20	5,5	0,16	2,5	0,17
5	3	15	2,19	0,06	12	24	0,09	76,5	0,08
6	1	50	0,09	0,00	4	114,5	0,00	395,5	0,00
				$\Sigma = 0,37$			$\Sigma = 0,51$		$\Sigma = 0,41$

Cette démarche nous permet d'évaluer plus précisément la vitesse de propagation. Elle est estimée ici au maximum à 0,5 mm/an.

CONCLUSION

Suite à des essais sur site et sur boucle, et des simulations numériques 2D et 3D, l'étude complète de nocivité des fissures d'enveloppe de BT des pompes 900 MWe a été réalisée. Les résultats sont en bon accord avec les données d'essais et le retour d'expérience.

L'amorçage de ces fissures est rapide : une quinzaine de cycles de chauffage-refroidissement peuvent suffire. L'étude thermohydraulique - thermomécanique chaînée a mis en évidence une zone préférentielle d'amorçage sous l'injection.

La stabilité est assurée vis à vis du transitoire de démarrage à chaud qui a été simulé de manière pénalisante en tenant compte localement de l'effet de l'injection.

La propagation repose sur le chargement dû aux fluctuations de température dans la zone de fissuration. L'étude paramétrique de ce chargement montre que les petites fluctuations rapides n'ont pas d'effet mécanique. Par contre, des fluctuations d'une trentaine de degrés propagent les défauts. Enfin, en utilisant directement un relevé d'essai comme chargement, la propagation est évaluée à moins de 0,5 mm/an ce qui est conforme au retour d'expérience. Cette étude permet ainsi de conforter l'exploitant dans sa politique de maintenance basée sur une propagation maximum des défauts de 1 mm/an.

Par contre, la génération des fluctuations de température dans la zone de fissuration qui est un phénomène de thermohydraulique locale, n'est pas élucidée pour l'instant. Des études pour comprendre ce phénomène et le minimiser sont lancées.

Enfin, les connaissances acquises pour cette étude ont servi à étudier, avec succès, la solution corrective d'enveloppe.

REFERENCES

1. Randrianarivo, L. 13-15.09.1994. The french 900 MWe nuclear power plant : shaft and thermal barrier cover cracks on main coolant pumps. EPRI - 7th International workshop on main coolant pumps.

MATERIAU

Propriétés thermomécaniques de l'acier Z3CN20-09M selon le RCC-M

T (°C)	20	50	100	150	200	250	300
E (GPa)	197	195	191,5	187,5	184	180	176,5
ρC_p ($10^6 J/m^3/^\circ C$)	3,60	3,74	3,90	4,10	4,16	4,27	4,30
λ (W/m/°C)	14,7	15,2	15,8	16,7	17,2	18,0	18,6
α ($10^{-6}/^\circ C$)	16,40	16,84	17,23	17,62	18,02	18,41	18,81

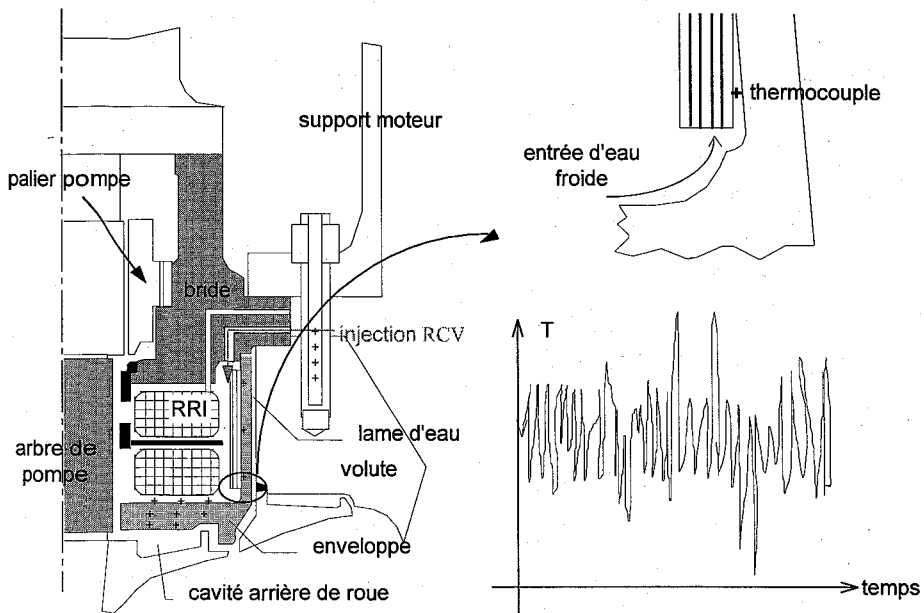


Figure 1 : Barrière thermique de GMPP 900 MWe et son environnement.

- Arrivées des circuits RCV (injection ponctuelle) et RRI (échangeur à serpents).
- Position des thermocouples (+). - Entrée d'eau froide sous écran thermique.
- Exemple de relevé de température dans la zone de fissuration.

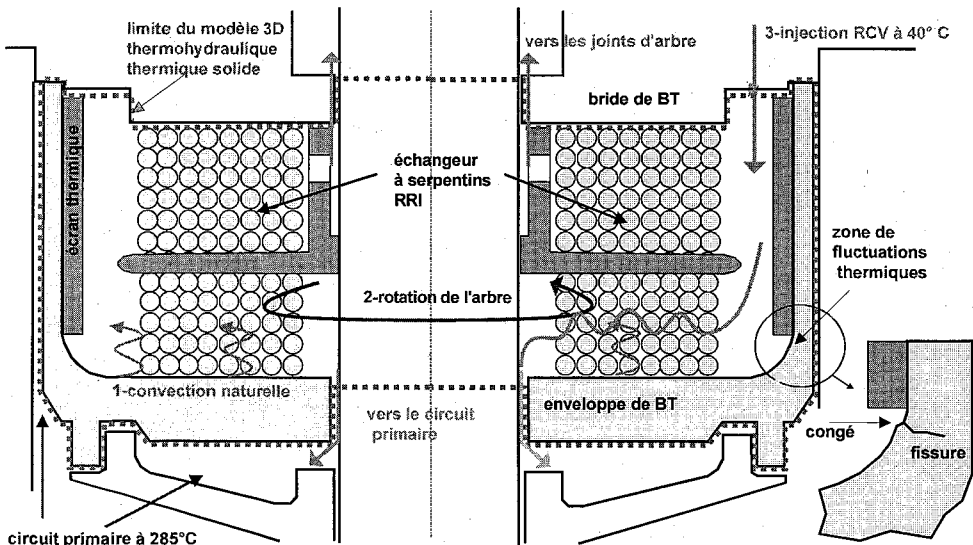


Figure 2 : Barrière thermique de GMPP 900 MWe.

- Différents composants : échangeur à serpents, enveloppe, écran thermique, bride.
- Zone de fissuration dans le congé de rayon 2 mm au bas de l'écran thermique.
- Limites du modèle 3D thermohydraulique/thermique solide.
- 3 écoulements : 1-convection naturelle, 2-entraînement de l'arbre, 3-injection RCV.

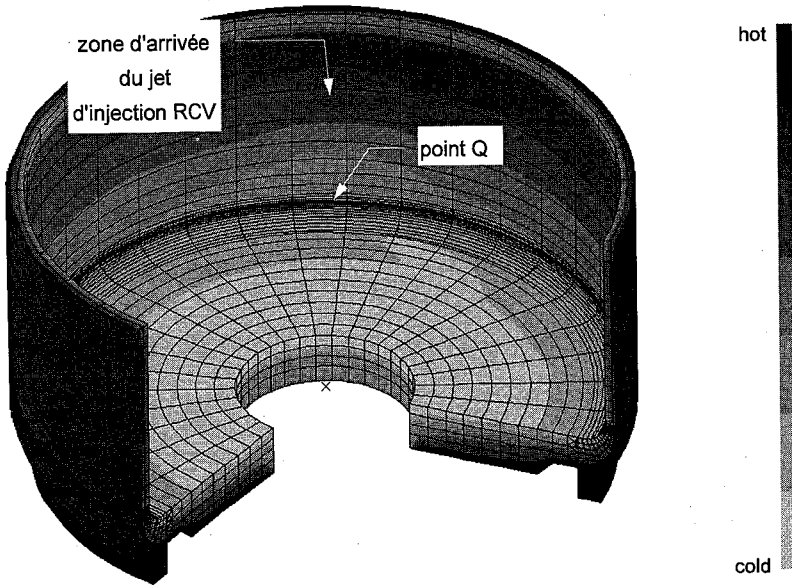


Figure 3 : Champ de température dans l'enveloppe de BT en régime nominal. Calcul 3D thermohydraulique / thermique solide N3S/Syrthes.

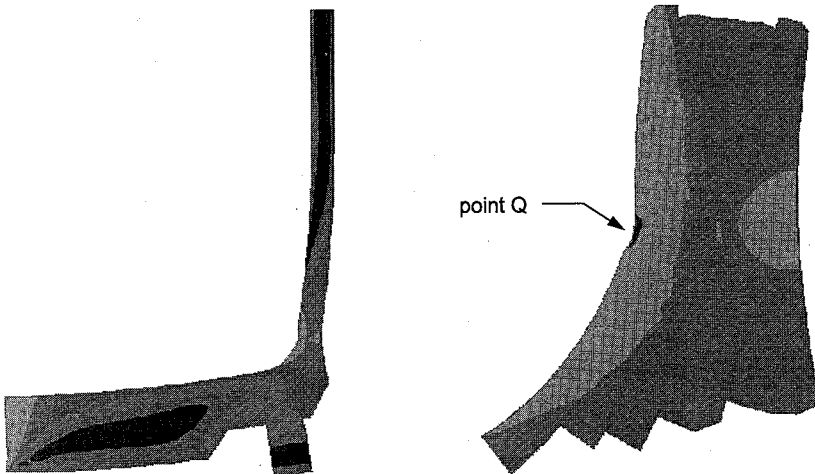


Figure 4 : Contraintes de Von Mises en régime continu. Concentration de contrainte dans le congé. Calcul 3D thermomécanique Aster. Coupe dans le plan de l'injection.

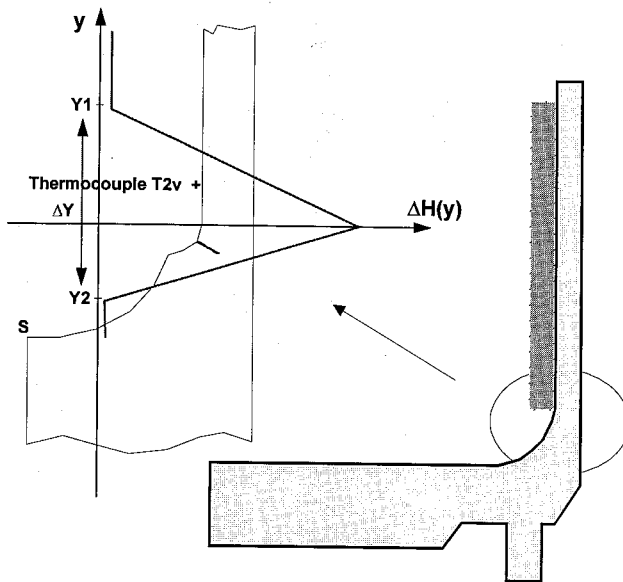


Figure 5 : Modélisation des fluctuations de température dans la zone de fissuration.

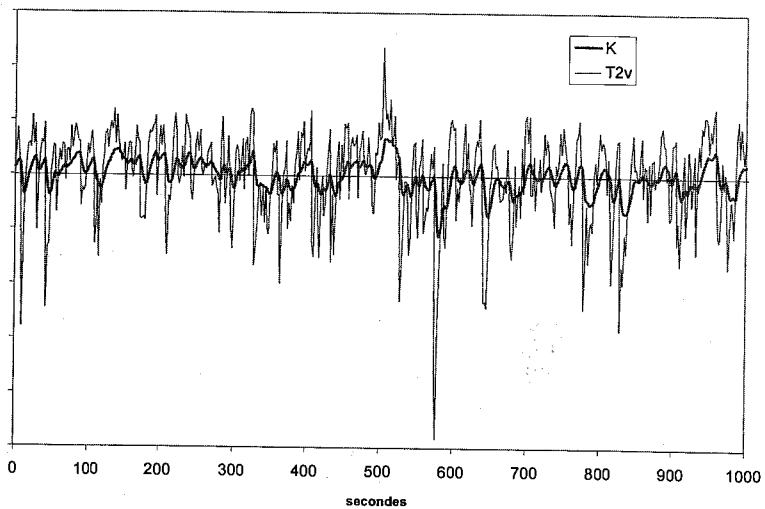


Figure 6 : Fluctuations de K_I pour un chargement déduit des fluctuations d'essais.