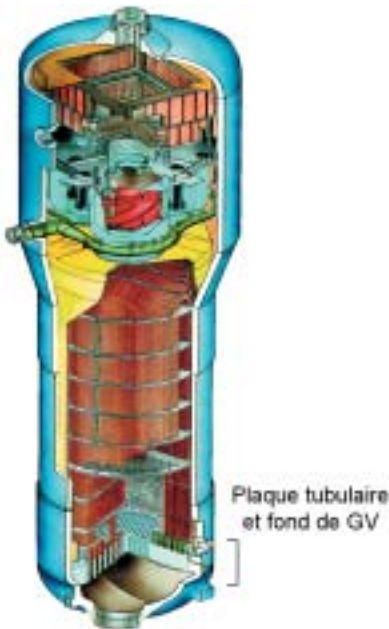


## Générateurs de vapeur : tenue des bouchons soudés aux extrémités des tubes d'échange

Dans les générateurs de vapeur (GV) d'une centrale nucléaire à eau pressurisée ①, la plaque tubulaire est percée par un réseau de plusieurs milliers de tubes dans lesquels l'eau en circulation du circuit primaire cède sa chaleur à celle du circuit secondaire.



① Emplacement de la plaque tubulaire dans le générateur de vapeur

Un programme de base de maintenance périodique de ces tubes (BPMP) planifie le contrôle de leur état et, le cas échéant, ils sont obstrués préventivement par la pose d'un bouchon à l'intérieur du tube en partie basse de la plaque tubulaire. Différents types de bouchons sont conçus pour cette obturation ; l'étude en objet s'intéresse uniquement au bouchon dit "soudé". Le dudgeonnage mécanique du bouchon est l'opération qui rattrape le jeu initial entre bouchon et plaque tubulaire et qui écrase ce dernier contre la plaque pour le maintenir en place. Auparavant, le bouchon est soudé dans sa partie inférieure à la plaque.

Afin de se conformer à l'Arrêté Exploitation du 10 novembre 1999, l'exploitant des centrales doit démontrer à l'Autorité de Sécurité Nucléaire que la soudure du bouchon est réduite à un rôle d'étanchéité et que le maintien en place des bouchons soudés dans les générateurs de vapeur des paliers 900 et 1300 MWe est assuré en toutes situations de fonctionnement (y compris accidentelles) sans prendre en compte la soudure.

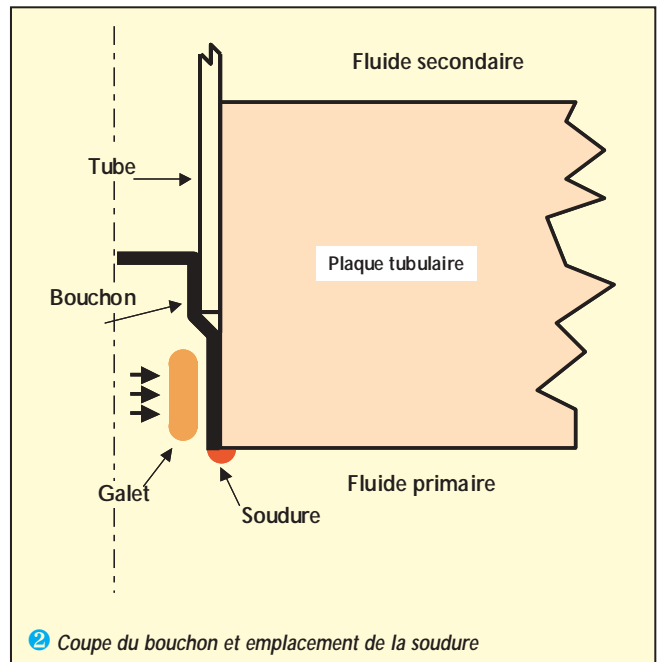
Cette démonstration, en déclassant l'opération de maintenance, permet d'alléger les conditions de qualification associées.

### Présentation de l'étude

L'analyse thermomécanique de l'assemblage bouchon-tube revêt des aspects complexes : géométrie tridimensionnelle de la plaque tubulaire aux chargements complexes, réseau de tubes, différentes non-linéarités (contact entre galets de dudgeonnage et bouchon, entre plaque et bouchons, comportement élastoplastique des matériaux). Cette étude illustre bien la souplesse des possibilités du *Code\_Aster*. La modélisation *Aster* de l'ensemble plaque tubulaire-bouchon soudé est bidimensionnelle axisymétrique centrée sur l'axe d'un tube qui a été obturé ②. Elle s'appuie sur les efforts de traction et flexion déterminés dans la plaque tubulaire au voisinage du tube considéré par un calcul tridimensionnel thermoélastique préliminaire du fond du GV, sous différents chargements

(différentiel de pression, choc thermique), réalisé par SOCOTEC INDUSTRIE avec le *Code\_Aster*.

La modélisation du dudgeonnage du bouchon et les calculs des situations de fonctionnement s'effectuent en 3 étapes : d'abord un calcul purement mécanique du dudgeonnage ; ensuite un calcul transitoire thermique décrivant l'une des deux situations enveloppes de 2ème et 4ème catégories de fonctionnement, prenant en compte l'évolution des températures primaires et secondaires de chaque situation et les échanges thermiques aux parois ; enfin, un calcul thermomécanique effectué à partir de l'état de contraintes résiduelles de dudgeonnage sur le transitoire utilisé pour le calcul thermique et intégrant les pressions primaires et secondaires de chaque situation.



Pour sa modélisation, la plaque tubulaire comprend 2 zones : autour du bouchon, un premier anneau au comportement élastoplastique à écrouissage isotrope puis un second, plus éloigné, en matériau élastique homogénéisé équivalent isotrope transverse à 5 coefficients prove-

# Générateurs de vapeur : tenue des bouchons soudés aux extrémités des tubes d'échange (suite)

nant d'un calcul d'homogénéisation antérieur. Le comportement du bouchon est élastoplastique avec écrouissage mixte à 40 % cinématique et 60 % isotrope.

Le dudgeonnage mécanique du bouchon est modélisé par le déplacement de 3 galets indéformables : le dudgeonnage d'accostage dans la partie basse du bouchon permet de rattraper le jeu initial entre le bouchon et la plaque puis le dudgeonnage intégral sur deux pas entraîne une réduction finale moyenne de paroi d'environ 3 %.

Pour l'étape de dudgeonnage, on allège les temps de calcul et on assure la continuité des contraintes à l'interface plaque-bouchon par le recours à un maillage quadratique sous-intégré. Pour le transitoire thermique, le principe du maximum n'est pas violé grâce à l'utilisation

d'éléments linéaires lumpés. Le champ de température obtenu par ce calcul est ensuite projeté sur le maillage mécanique quadratique pour la dernière étape de calcul.

## Résultats

La tenue du bouchon semble assurée pour les hypothèses de modélisation les plus réalistes qui ont été exploitées.

La pression d'interface résiduelle issue du calcul de dudgeonnage mécanique et celle déduite d'essais sont en bonne concordance pour le palier 900 MWe, moins pour le 1300 MWe. Une explication : le couple de dudgeonnage appliqué lors des essais du bouchon soudé du palier 1300 MWe a conduit à un taux de réduction de paroi inférieur aux 3 % spécifiés par la modélisation.

On compare la pression d'interface rési-

duelle calculée lors des transitoires des situations de fonctionnement contractuelles à la pression d'interface critique nécessaire à la tenue du bouchon soudé à tout instant pour compenser l'effet de fond. Le ratio minimal de ces deux pressions est de 7 pour le palier 900 MWe et de 2 pour palier 1300 MWe. Ces ratios, qui évoluent au cours du transitoire, ne conduisent à ces valeurs minimales que pendant les 10 à 20 premières secondes. Les situations de 4ème catégorie s'accompagnent d'une plastification du bouchon.

L'étude de sensibilité effectuée sur le bouchon 1300 MWe montre l'influence importante du modèle d'écrouissage du bouchon et du coefficient d'échange entre le fluide primaire et la paroi interne du bouchon.