

OPERATION DE CONFORTEMENT EN CHARGE D'UN CORPS DE VANNE PAPILLON ET DE DEUX PIQUAGES D'UN CIRCUIT DE BY-PASS

Operation of reinforcement in charge of a butterfly valve body and two nozzles of a bypass circuit

Arnaud GRANDPERRET, Thomas DONIAS, EDF CIH, 13290 AIX-EN-PROVENCE
arnaud.grandperret@edf.fr ; thomas.donias@edf.fr

Mathieu GEVODANT, EDF CIH, 19311 BRIVE LA GAILLARDE, mathieu.gevodant@edf.fr

Mathieu GEVODANT, EDF DTG, 38950 SAINT MARTIN LE VINOUX, jean-marc.oppe@edf.fr

Gilles JACQUES, EDF SEI Corse, 20000 AJACCIO, gilles.jacques@edf.fr

David GRAVELEINE, EDF CIH, 73290 LA MOTTE SERVOLEX, david.graveleine@edf.fr

MOTS CLEFS

Piquage, corrosion, percement, by-pass, vanne papillon, soudage en charge, confortement en charge, patch composite

KEY WORDS

Connections, by-pass, butterfly valve, corrosion, piercing, repairs, welding, composite patch

RÉSUMÉ

• Cet article présente les réparations en charge d'un corps d'une vanne papillon sur le circuit de la dérivation provisoire d'un barrage et des piquages amont et aval d'un circuit by-pass d'une autre vanne papillon en galerie. Sont exposés :

- Les enjeux et difficultés d'intervention,
- Les raisons qui ont conduit à l'aléa et la caractérisation des dégradations sur les deux équipements,
- La présentation des solutions mises en œuvre et la démarche de qualification retenue (maquette, modèle numérique de soudage, ...),
- Les chantiers de confortement sur site,
- Les résultats des opérations de confortement.

ABSTRACT

• This article describes the on-load repair of a butterfly valve body on the temporary bypass circuit of a dam and of the upstream and downstream tapings of a butterfly valve bypass circuit. This article outlines:

- The intervention issues and difficulties,
- The reasons which led to the hazard and the characterization of the damages to the 2 equipment pieces,
- The presentation of the solution implemented and the qualification approach adopted (model, digital welding model, etc.),
- On-site reinforcement projects,
- The results of the reinforcement operations.

1. PRESENTATION DE L'AMENAGEMENT

La retenue en question dispose d'un barrage de près de 90 m de haut permettant d'alimenter une usine hydroélectrique souterraine via une galerie d'amenée souterraine.

Outre la production d'électricité, cet aménagement dispose d'un fort enjeu en termes de ressource en eau potable.

Les équipements objets de cet article sont situés en pied du barrage : il s'agit de la prise usinière et de la dérivation provisoire utilisée lors de la construction. La ligne de vidange n'est pas concernée.



Figure 1- Photographie de l'aval du barrage

(VdT : Vanne de Tête de prise – VDF : Vannes De Fond de vidange – DP : Dérivation Provisoire)

1.1.Ancienne dérivation provisoire

La dérivation provisoire (DP), présente en rive gauche du barrage, comportait une vanne de réglage et une vanne de garde. Cette dérivation n'est pas isolable de l'eau de la retenue (hauteur statique : 80 mCE) sans un abaissement de la cote du plan d'eau et une vidange complète.

L'ancienne dérivation provisoire a fait l'objet d'une condamnation en 2019 consistant à :

- ✓ Supprimer la vanne à jet creux (vanne aval de réglage) et ses organes de commande,
- ✓ Supprimer le conduit entre cette vanne à jet creux et la vanne papillon (vanne amont de garde),
- ✓ Condamner la manœuvre de la vanne papillon de diamètre 1200 mm en position fermée (avec suppression de ses organes de commande),
- ✓ Étancher les fuites aux tourillons de la vanne papillon,
- ✓ Ajouter un fond plein à l'aval immédiat de la vanne papillon, fond plein équipé d'une vanne de vidange (Cf. Figure 2).

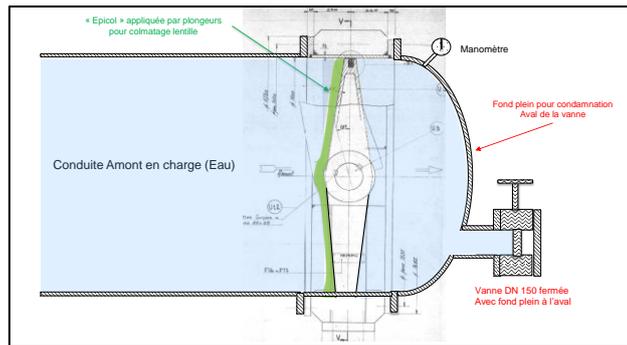


Figure 2 : Coupe de l'extrémité de la dérivation provisoire après les travaux de 2019

1.2. Conduite usinière

Sur la conduite usinière, la vanne de prise, appelée vanne de tête galerie (VdT), est une vanne de type papillon de 1600 mm de diamètre intérieur située dans un local à l'extrémité d'une galerie d'accès (cf. Figure 3). Elle est équipée d'un circuit de by-pass DN 250 muni de deux vannes à opercule à manœuvre manuelle par volant, installées aux extrémités du circuit de by-pass. Il n'y a pas de diaphragme sur le circuit. Les piquages sont constitués de tubes en acier noir. Ils sont soudés sur des selles de renfort de la conduite forcée.



Figure 3 - vue d'ensemble de la vanne de tête galerie et de son by-pass

La prise d'eau, sa vanne de tête et donc la ligne de by-pass ne sont pas isolables de la retenue (hauteur statique : 60 mCE); seul un abaissement de la cote du plan d'eau, en dessous de la CME – Cote Minimale d'Exploitation – peut permettre de les mettre hors d'eau, mais dans ce cas il faut lancer une procédure de vidange lourde de conséquences à tous niveaux pour l'ensemble des utilisateurs.

2. DESCRIPTION DES AVARIES ET DE LEURS CONSEQUENCES

2.1. Avarie sur le corps de la vanne papillon de la dérivation provisoire

En fin de travaux de condamnation de l'ancienne dérivation provisoire en 2019 (Cf. Figure 2), un suintement est constaté en plein corps de la vanne papillon qui bouche le conduit. Le suintement évolue ensuite en un petit jet bâton d'environ 1 à 2 mm de diamètre (Cf. Figure 4).

Suite à ce constat, la pression dans la partie aval du corps de la vanne papillon a été cassée par l'ouverture de la vanne de vidange située sur le fond plein de condamnation. Ceci a même permis de mettre à sec la zone de percement située en aval de l'obturateur/lentille de la vanne papillon (pression maintenue en amont), notamment grâce à un excellent niveau d'étanchéité obtenu par l'application d'une résine type Epicol sur le pourtour amont de la lentille par plongeurs (travaux préparatoires qui étaient nécessaires dans le cadre la condamnation).

Après une campagne d'expertise exhaustive depuis l'extérieur par EDF DTG, il s'avère que l'état réel du corps de vanne est bien plus dégradé qu'imaginé initialement et présente des dégradations localisées non détectées précédemment. Pour mémoire, l'épaisseur nominale du corps de la vanne est de 14 mm et celui-ci est réalisé en acier type S235. Les expertises ont relevé des épaisseurs résiduelles pouvant atteindre 3 mm sur certaines zones du corps de la vanne situées au niveau de la zone de siège fixe, en face de l'étanchéité de l'obturateur.

La difficulté majeure dans cette situation réside dans l'impossibilité d'isoler le conduit de la dérivation provisoire, en amont de la vanne papillon, de la charge d'eau du barrage, et les enjeux autour de la retenue.



Figure 4 : Fuite sur la perforation du corps de la vanne papillon

2.2. Avarie sur les piquages de la ligne by-pass

Sur la galerie d'amenée usinière, en fin de remplissage, une fuite (de la surface d'une tête d'épingle) sur le piquage amont du by-pass de la vanne de tête Galerie est apparue en 2019. Quelques jours après, une deuxième fuite est survenue sur le piquage aval de ce même circuit. Les deux piquages sont en DN 250. La pression d'eau résidant dans les deux piquages est celle de la retenue, soit un maximum de 6 bars.



Figure 5-Vue du piquage aval



Figure 6-Vue de la fuite du piquage amont

Des mesures d'épaisseur depuis l'extérieur ont été alors effectuées par EDF-DTG et les résultats ont mis en évidence un état de corrosion très avancé à l'intérieur des deux piquages (l'épaisseur résiduelle des piquages a été estimée à 2 mm au lieu de 6 mm valeur nominale).

Les deux piquages sont fortement dégradés, mais la tenue mécanique est assurée à court terme (sous l'effet de fond et le risque de déchirure longitudinale). Un renforcement doit néanmoins être mis en œuvre afin de pérenniser la tenue à long terme de la ligne by-pass, notamment sous l'effet de l'érosion lié à la circulation de l'eau lors de l'utilisation de la file by-pass durant les phases de remplissage de la galerie.

Par ailleurs, outre les sollicitations statiques (pression, effet de fond), la ligne by-pass est soumise à des vibrations importantes lors de son utilisation qui sont de nature à accélérer la dégradation des piquages.

2.3. Stratégie de résolution des deux aléas

Par suite de ces deux constats, le EDF-CIH et la EDF-DTG ont étudié, dans l'année 2020, des solutions de réparation pérennes à long terme (> 15 ans) avec les conditions d'exploitation du by-pass de la prise usinière et de la dérivation provisoire, du fait de l'incapacité de les isoler de la charge d'eau du barrage.

Le confortement des deux piquages et du corps de la vanne papillon s'est effectué en plusieurs étapes successives :

- Mise en œuvre d'un confortement provisoire en attendant de définir la solution pérenne,
- Engagement des études pour la définition d'une solution pérenne avec sa démarche de qualification (6 à 8 mois),
- Mise en œuvre des confortements pérennes (durée de vie > 15 ans).

3. PRESENTATION DES SOLUTIONS PROVISOIRES

3.1. Confortement provisoire pour le corps de la vanne papillon

En attendant la définition et la mise en œuvre de la solution de renforcement pérenne du corps de la vanne, une note de calcul de la vanne à l'état dégradé a été produite par EDF-CIH pour définir le niveau de risque d'une rupture de l'organe dans la situation actuelle. L'analyse a montré que le risque pouvait être écarté à court terme.

En parallèle, un patch composite a été installé au niveau du percement constaté une fois celui-ci mis à sec. L'objectif de ce patch était de redonner un caractère étanche à la vanne pour éviter toute aggravation du percement en cas de remise en pression du corps de la vanne.

La mise en œuvre du patch (*voir Figure 7*) a été réalisée après une préparation de surface du corps de la vanne, par application successive des composants suivants :

- Clôture du percement par une résine bi-composant à séchage rapide « Belzona 9611 »;
- Masticage avec un enduite époxy sans solvant (« Belzona 1212 ») sur les chancres de la zone de renforcement du patch afin de reconstruire la surface extérieure et assurer une bonne liaison;
- Renforcement par fibre de carbone BELZONA « SuperWrap II » composé de 4 couches de fibres de carbone liaisonnées par imprégnation d'une résine spécifique réf. « Belzona 1981 »;
- Application d'une peinture de finition époxy MAESTRIA (IM 209).



Figure 7 : Mise en place du patch composite sur la perforation

3.2. Confortement provisoire pour les piquages by-pass

La réparation provisoire repose sur l'enrubannage du piquage par de la résine céramique « Belzona 1212 » en présence de la fuite. Le principe est d'appliquer une résine d'une épaisseur d'au moins 5 mm sur toute la circonférence de la tubulure (Cf. Figure 8). Dès que la résine céramique a séché, une fibre de carbone est enroulée par-dessus la résine pour apporter de la rigidité à la structure (Cf. Figure 9).

Cette réparation a permis de colmater les fuites présentes et de renforcer provisoirement les 2 piquages en attendant que la solution pérenne soit définie. Cette solution a été mise en œuvre en 2019.



Figure 8- Application de la résine céramique sur le piquage aval



Figure 9- Application d'une fibre de carbone sur le piquage amont

4. ETUDES ET ESSAIS DES SOLUTIONS DE CONFORTEMENT DEFINITIVES

4.1. Solution pour le corps de la vanne

Cette solution a consisté à souder en charge sur la périphérie externe du corps de vanne, des « doublantes » en acier (épaisseur 12 mm) tout autour de la zone structurellement amoindrie, englobant le patch (Cf. Figure 10). Ces doublantes ont été conçues pour être structurellement auto-stables, c'est-à-dire être capables de reprendre les efforts circonférentiels (« gonflement » du corps de vanne sous l'action de la pression) et axiaux (effet de fond amont-aval dû à la pression) sans avoir besoin de la participation du corps de vanne d'origine sous les renforts et ce, quel que soit le niveau d'eau dans la retenue (Cf. Figure 11).

La mise en place de doublantes métalliques s'est faite par soudage en charge sur le corps de la vanne au niveau de ses zones de sous-épaisseurs.

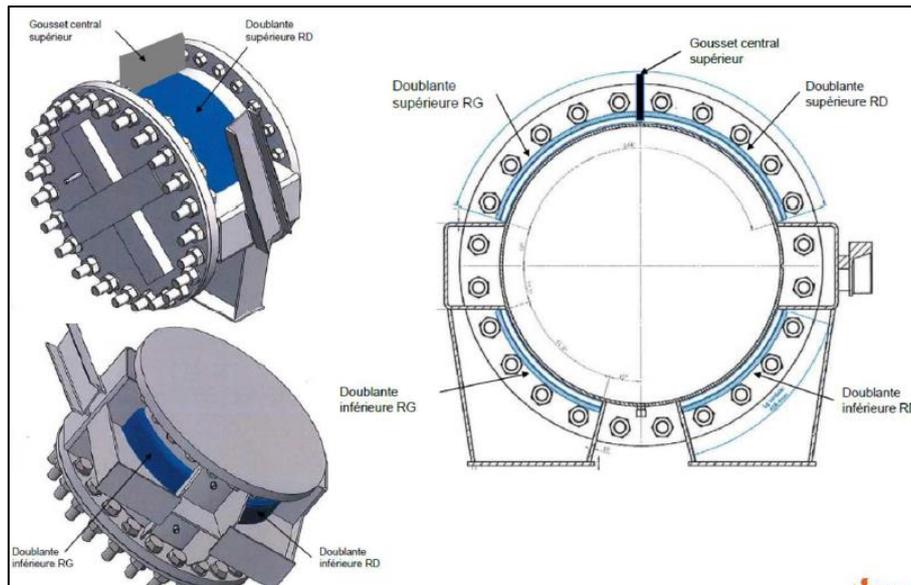


Figure 10 : Schéma de principe de renforcement du corps de la vanne papillon

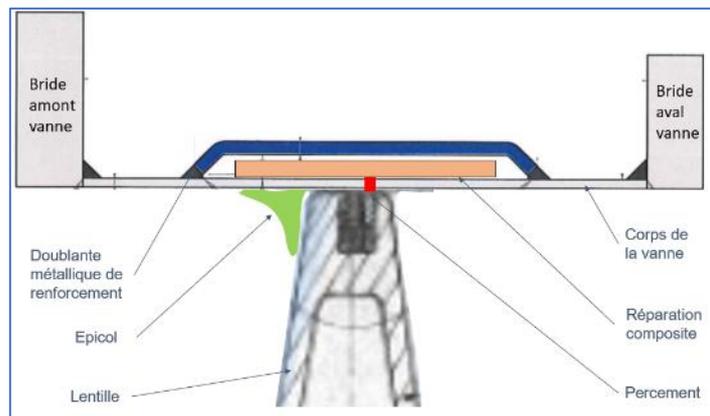


Figure 11 : Principe de la solution de doublante en partie supérieure (au niveau du patch composite)

4.2. Solution pour les piquages

La solution retenue consiste à reprendre les effets de fond par l'ajout de 2 brides en acier d'épaisseur 10 mm, type coque, avec également des soudures en charge au niveau des brides et des semelles en emprisonnant la boulonnerie (Cf. Figure 12 & Figure 13).

Le dimensionnement de la coque a été justifié par note de calcul. Au préalable, la boulonnerie existante a été remplacée une par une, sans fuite. Une résine est injectée par coulée gravitaire à l'intérieur de l'enceinte de la coque pour préserver la boulonnerie de la corrosion. Elle assure également l'étanchéité de la boulonnerie en cas d'éventuelle fuite à venir sur le piquage d'origine.

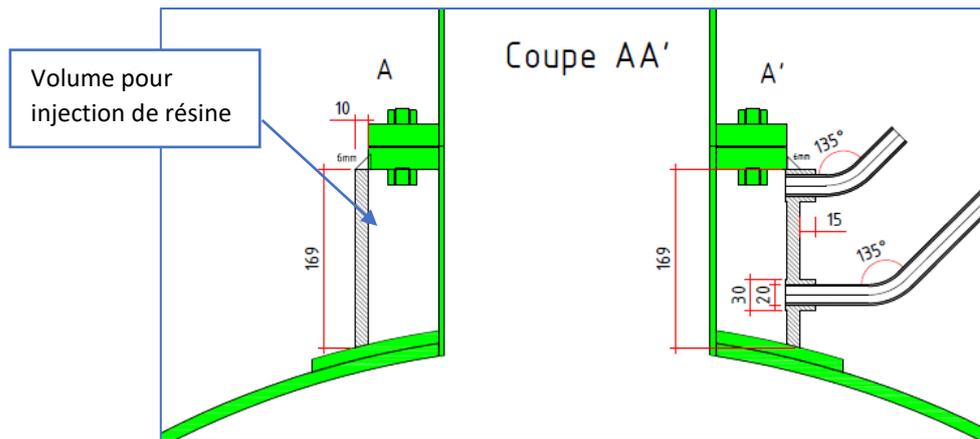


Figure 12- Vue en coupe de coque

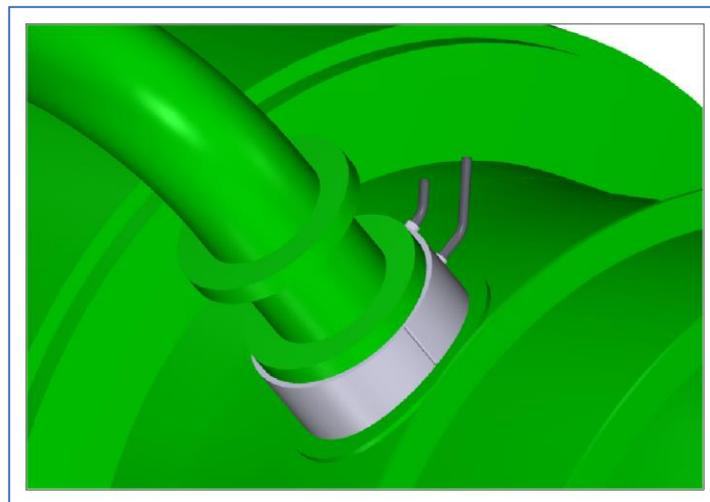


Figure 13- Vue d'implantation de la coque d'injection sur le piquage aval

4.3. Démarche de qualification de mise en œuvre des doublantes de renforcement sur le corps de la vanne

La qualification de la solution de confortement sur le corps de vanne en charge est passée par des analyses métallurgiques du métal de base de la vanne et par la réalisation d'une maquette à l'échelle 1. Cette dernière était nécessaire pour valider la Qualification de Mode Opérateur de Soudage (QMOS) et pour s'assurer de l'absence significative de risque d'un percement du corps de la vanne au moment des soudures en charge sur le corps de vanne.

Les essais sur maquette ont été faits dans des conditions les plus représentatives possibles des conditions du site : matière identique, conception identique, maquette mise à la même pression intérieure, mise en place de panneaux qui simulent les murs sur site assez proches, ..., voir *Figure 14*.

Dans l'optique de sécuriser les opérations de soudage en charge, des essais volontaires de percement « accidentels » ont été réalisés, maquette sous pression, avec un affinement successif de l'épaisseur du corps et des temps de chauffe ponctuels résultants d'une position figée de la torche TIG. Ces essais ont permis de mettre en avant des marges significatives vis-à-vis du risque de percement du corps lors du soudage en charge. Ces essais ont également permis de caler les paramètres de réglage du soudage, ne serait-ce que pour éviter le risque de refroidissement trop rapide des soudures du fait de la présence de l'eau (= puits à calories). Ces essais ont également permis de vérifier la non-dégradation des joints d'étanchéités des brides de la vanne lors du soudage.

De plus, ces essais sur maquette ont permis de valider l'accessibilité du soudeur pour la réalisation de l'ensemble des cordons de soudures des doublantes de renforcement.



Figure 14 : Essais de soudage d'une doublante inférieure sur la maquette et essais de percement

EDF a qualifié la solution de doublantes par la réalisation d'une note de calcul de la vanne papillon dans son état actuel dégradé et dans son état renforcé afin de définir le design exact des doublantes et des cordons de soudures, dans le respect des critères de dimensionnement et des coefficients de sécurité appliqués à EDF Hydro (voir Figure 15).

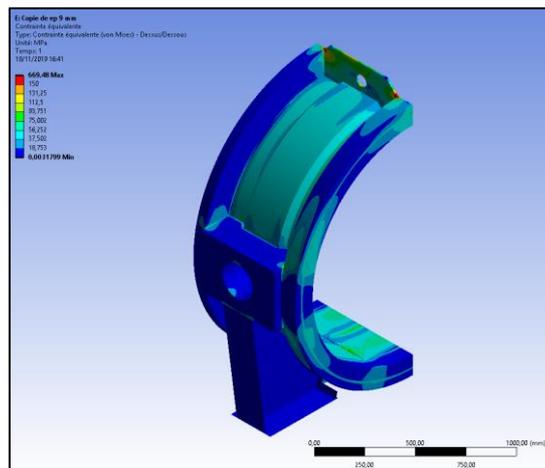


Figure 15 : Calculs par éléments finis des renforts

4.4. Démarche de qualification des piquages renforcée

Le risque de ruine du piquage d'origine en charge est possible (et redouté) lors de l'opération de soudure de fermeture en périphérie de la coque. Le risque a été évalué en passant par une note de calcul incluant une modélisation numérique des passes de soudure et une maquette d'essai dédiée reproduisant le principe de réparation à l'échelle 1.

La note de calcul a démontré que l'opération de soudage induit des sollicitations de contraintes localement élevées sur la tubulure d'origine, mais qu'elles restent acceptables à condition de respecter une procédure de soudage particulière (Cf. chapitre §5.2). Le risque de ruine du piquage est alors considéré comme écarté.

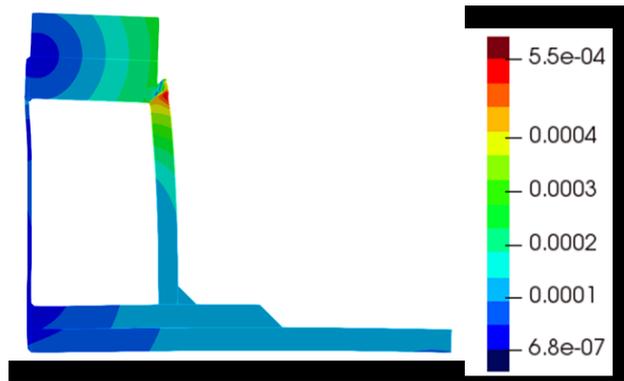


Figure 16- Valeurs de déformées résiduelles à la fin du soudage obtenue en mm

Le principe de confortement a été également été reproduit sur une maquette à échelle 1 en atelier. Ce banc d'essai a permis d'objectiver les résultats de la note de calcul et de valider la Qualification de Mode Opérateur de Soudage (QMOS), au bénéfice de la réparation à venir sur site.



Figure 17-Vue de la maquette d'essai, reproduisant le principe de réparation à l'échelle 1

L'analyse de risques a également mis en évidence un dénominateur commun : la fragilité du piquage amont du fait de l'impossibilité de l'isoler de la charge d'eau du barrage. Deux parades ont été définies afin de réaliser l'opération tout en préservant le piquage amont :

- ✓ La Chronologie de l'opération : Débuter l'opération de confortement par le piquage aval pour valider le mode opératoire « in-situ », au bénéfice du piquage amont, jugé « sensible » du fait de l'impossibilité de l'isoler de la charge d'eau du barrage ;
- ✓ Une disposition constructive en bridant la ligne du by-pass à l'aide d'un support en direct sur la vanne pour éviter toute dégradation du piquage amont par effet levier (Cf. Figure 25).

Les essais en atelier ont également contribué à caler les paramètres de soudage de manière à ne pas risquer de brûler le joint inter-bridés assurant l'étanchéité entre les piquages et les vannes by-pass.

Les essais sur maquette et le soudage sur les deux équipements (corps de vanne et piquages) ont été réalisés par l'entreprise MONTEIRO, retenue notamment pour son savoir-faire en soudage. EDF-DTG C2M et EDF-CIH ont supervisé l'ensemble des phases de l'opération, depuis la définition de la solution de réparation jusqu'au suivi de la réalisation sur site.

5. REALISATION DES SOLUTIONS DE CONFORTEMENT DEFINITIVES

5.1. Confortement in-situ du corps de la vanne

Les opérations de renforcement du corps de la vanne papillon ont donc été effectuées sans aucune contrainte de cote sur la retenue, restée proche de sa cote normale (charge à la vanne : env. 80 mCE).

Après une préparation de surface visant à blanchir les zones de soudage sur la vanne, les doublantes métalliques ont été positionnées puis pointées.

L'ensemble des soudures de pénétration et des soudures réalisées sur la partie du corps de la vanne en charge (voir Figure 18) a été réalisé par le même soudeur qui avait réalisé auparavant l'ensemble des essais en atelier sur la maquette et la QMOS.

Durant l'intégralité des opérations de soudage, des mesures de température ont été effectuées au voisinage des soudures pour maîtriser l'apport de chaleur et ainsi fiabiliser la tenue des joints d'étanchéité des brides de la vanne et la tenue de l'Epicol (Cf. Chapitre 2.1) appliquée en périphérie de la lentille.

Les contrôles suivants ont été réalisés pour réceptionner les travaux de soudage des doublantes (voir Figure 19).

- ✓ Contrôle par ressuage de l'ensemble des cordons de soudures de pénétration (1^{ère} passe) ;
- ✓ Contrôle par ressuage de l'ensemble des cordons de soudures en fin de soudage ;
- ✓ Réalisation d'un test en pression à l'air à 1 bar de chaque doublante avec un révélateur de type « milles bulles ».

Ces travaux se sont montrés parfaitement conformes :



Figure 18 : Soudage sur site des doublantes de renforcement



Figure 19 : Réalisation des contrôles par ressuages et des tests d'étanchéité des soudures

5.2. Confortement in-situ des piquages du by-pass

La mise en œuvre de la solution de confortement s'est déroulée en 2 étapes :

- L'installation du support sur le circuit by-pass et les travaux de confortement du piquage aval ;
- Les travaux de confortement sur le piquage amont.

La séquence des travaux de confortement du piquage s'est déroulée de la manière suivante :

- a) Le remplacement de la boulonnerie M16** de la bride de la vanne par des boulons M16 à injection (*conçu pour injecter une résine entre l'écrou et le boulon afin d'assurer l'étanchéité de l'assemblage*),
- b) Réalisation des soudures non-contraignantes sur le piquage :** Le soudeur procède aux soudures longitudinales qui assemblent les 2 brides. Ensuite, il s'attèle à la soudure inférieure entre la selle et la coque. Ces 2 soudures sont jugées « *non-contraignantes* » pour le piquage d'origine et ont été réalisées en 3 passes, sans aucune précaution particulière (*Cf. Figure 20*),
- c) Réalisation de la soudure de fermeture, contraignantes sur le piquage :** La soudure de fermeture a été identifiée dans les études comme l'action la plus contraignante en termes de sollicitations pour le piquage d'origine. En effet, la note de calcul a démontré que le retrait du soudage induit des sollicitations localement élevées dans le tube d'origine.

Donc, elle a fait l'objet d'une procédure particulière de soudage qui a été validée au préalable sur banc d'essai. La procédure de soudage a consisté à réaliser les cordons de soudure en discontinue (cordon de longueur de 3 cm) et par intermittence (temps de soudage de 20 s). Ce principe atténue les efforts induits par le retrait de soudage sur le piquage (*Cf. Figure 21*). Elle permet également de préserver le joint inter-brides de la vanne d'un éventuel échauffement provoqué par le soudage (le cycle thermique d'un joint ne doit pas excéder $> 50^{\circ}\text{C}$).



Figure 20-Résultat des soudures longitudinales et sur la selle non contraignantes



Figure 21- Le soudeur en action sur la soudure de fermeture, contraignante pour le piquage

Les coques soudées sur les deux piquages ont fait l'objet d'une qualification similaire à celle des doublantes sur le corps de la vanne :

- ✓ Un ressuage des soudures pour attester l'absence de défaut ;
- ✓ La mise en pression des coques de sorte à valider son étanchéité en redondance de l'enrubannage en résine.



Figure 22- Résultat final de la coque soudée sur le piquage amont

A l'issue de la qualification des coques, l'entreprise POLYRESINE s'est déplacée pour réaliser l'injection d'une résine époxy à l'intérieure des enceintes des coques. La résine a pour rôle de préserver la boulonnerie de la corrosion et d'assurer aussi leurs étanchéités.

L'intervenant a procédé à l'injection de la résine par coulée gravitaire à l'aide des deux cheminées conçues à cet effet sur la coque. Une cheminée sert de point d'injection, surélevée d'une hauteur d'environ de 50 cm de la coque, de manière à forcer la coulée. Et l'autre cheminée joue de rôle d'évent, chassant l'air emprisonnée dans l'enceinte. La coulée se termine dès que la résine sort de l'évent, signifiant que l'enceinte est entièrement remplie (Cf. Figure 23).

La polymérisation de la résine opère en 24h et termine son cycle au bout de 72h. Les résultats de contrôle sont concluants, la résine a correctement durci. L'opération s'est terminée par la fermeture des cheminées, puis la mise en peinture des coques.



Figure 23- Vue du dispositif d'injection de la résine avec le point d'injection à gauche et l'évent à droite

6. CONCLUSION

Les opérations de confortement du corps de la vanne papillon de la dérivation provisoire et des deux piquages du by-pass sur l'aménagement concerné se sont déroulées avec succès (voir Figure 24 & Figure 25). Les deux équipements sont désormais considérés comme structurellement renforcés **à long terme (> 15 ans)**. Le risque de ruine des piquages ou d'un quelconque percement du corps de la vanne est donc écarté.

Ces deux opérations nécessitant des soudures **en charge** comportaient des **risques** dont les conséquences auraient pu être irréversibles en cas de perforation du piquage ou du corps de la vanne. Les différentes analyses des risques, dispositions prises durant les études et les méthodes choisies, dont les mises au point sur banc d'essai, ont permis de minimiser la criticité de ces opérations in situ.

L'entreprise MONTEIRO en charge des deux opérations a parfaitement suivi le mode opératoire défini dans les études menées par EDF en maintenant une qualité de réalisation et un professionnalisme jusqu'au terme du chantier.



Figure 24- Vue d'amont du corps de la vanne renforcé et repeint



Figure 25-Vue d'ensemble du circuit by-pass renforcé

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier toutes les personnes de la maîtrise d'œuvre d'EDF Hydro, CIH et DTG (Mathieu GEVODANT, David GRAVELEINE et Jean-Marc OPPE) qui ont contribué au succès de ces deux opérations.

Nous voudrions exprimer notre reconnaissance envers notre collègue maître d'ouvrage, Gilles JACQUES qui a accordé sa confiance sur nos solutions et apporté de précieux conseils tout au long du projet.

La réalisation des opérations a été possible grâce au concours de plusieurs personnes de l'entreprise MONTEIRO à qui nous voudrions témoigner toute notre gratitude.