

UNE TECHNIQUE D'ASSEMBLAGE ANCIENNE-ACTUELLE : LE RIVETAGE A CHAUD

An old current assembly technical : Connection with hot rivets

Laurent GIRAUDON, David GRAVELEINE, Philippe LLUSIA

EDF CIH, 73290 La Motte Servolex

EDF CIH, 38950 Saint Martin le Vinoux

laurent.giraudon@edf.fr; david.graveleine@edf.fr; philippe.llusia@edf.fr

Philippe BRYLA,

EDF DTG, 38950 Saint Martin le Vinoux

philippe.bryla@edf.fr

Julien MALRIEU, Guillaume PIGNAULT

CETIM, 42952 Saint Etienne

CETIM, 38000 Grenoble

julien.malrieu@cetim.fr; guillaume.pignault@cetim.fr

MOTS CLEFS

Rivetage, Rivet à chaud, vanne, conduites forcées, simulations numériques, Essais

KEY WORDS

Riveting, Hot rivets, Gate, Penstock, Numerical simulation, Testing

RÉSUMÉ

Depuis 2020, EDF Hydro via ses ingénieries (le CIH et la DTG) travaille en collaboration avec le CETIM afin de mieux caractériser les assemblages structurels par rivetage à chaud présent sur les équipements qu'elle exploite.

Cet article présente la démarche suivie :

- l'étude bibliographique sur le rivetage à chaud,*
- les essais réalisés sur des échantillons prélevés sur de vieilles vanne et conduite forcée afin de caractériser la tenue mécanique des assemblages,*
- la corrélation entre les résultats d'essais et les simulations numériques.*

En complément, EDF a mis en œuvre le renforcement d'une structure de vanne, pour lequel il a été choisi de reconduire un assemblage riveté à chaud, conformément aux choix constructifs d'origine.

ABSTRACT

Since 2020, EDF Hydro works in collaboration with CETIM to better understand the connection with hot rivets.

This article presents this works :

- the bibliographic study about hot riveting,*
- the tests on gates and penstock sample to characterize the mechanical strength,*
- the correlation between test results and numerical simulations.*

In addition, EDF has reinforced a gate structure using initial assembly technics i.e. hot-riveted assembly technic

1. CONTEXTE

Certains équipements du parc hydroélectrique d'EDF ont des assemblages par rivetage à chaud, dont notamment les vannes de barrage, les conduites forcées et les superstructures métalliques (supportant les organes de manœuvre des vannes, pont roulant, voies d'accès notamment).

En effet, une grande partie du parc Hydroélectrique qu'exploite EDF a été construit entre 1890 et 1965, période durant laquelle la technique d'assemblage des structures métalliques par rivetage à chaud était bien présente. En fonction de la date de conception, ce type d'assemblage est : soit généralisé, soit courant, ou encore « hybride », c'est-à-dire en complément d'assemblages soudés et/ou boulonnés.

Dans le cadre du maintien en exploitation de ses équipements et ouvrages, EDF Hydro souhaite rationaliser et accroître ses connaissances sur ce type d'assemblage. Ainsi, il pourra faire un choix argumenté de maintenance adapté au contexte : maintien en état, remplacement à l'identique, remplacement par un autre type d'assemblage, reconception.

2. DEMARCHE ET OBJECTIFS

Afin de rationaliser et d'accroître ses connaissances sur les assemblages rivetés à chaud appliqués aux vannes de barrage et aux conduites forcées, les ingénieries d'EDF Hydro (le CIH et la DTG) se sont associées au CETIM (Centre Technique des Industries Mécaniques - Site de St-Etienne) en 2020, avec le programme suivant réparti sur plusieurs années :

- Réalisation d'une étude bibliographique sur l'état de l'art de cette technologie,
- Mise en œuvre d'essais de caractérisation de la tenue mécanique ultime d'assemblages rivetés prélevés sur des échantillons de vannes et de conduites forcées de presque 100 ans,
- Réalisation de simulations numériques afin d'illustrer les phénomènes de comportement de l'assemblage riveté et de faire une corrélation avec les essais et les abaques de dimensionnement « historiques »,
- Etudier et tester des solutions de remplacement des rivets à chaud.

L'objectif final étant à terme la réalisation d'un : « **Guide des bonnes pratiques pour le diagnostic et la réparation des assemblages rivetés à chaud** ».

3. BIBLIOGRAPHIE

L'étude bibliographique, basée sur 43 documents de référence, est riche et complète. On y retrouve :

- L'historique du rivetage à chaud via l'évolution des matériaux et des normes associées, de 1890 à nos jours,
- Les règles de l'art relatives à la mise en œuvre d'un assemblage riveté à chaud,
- Les particularités et caractéristiques liées à ce type d'assemblage,
- Les règles de conception : tel que le diamètre et la longueur du rivet ; le pas et la pince du motif d'assemblage ; le jeu nécessaire au montage.
NOTA : pour certains paramètres ce ne sont pas moins de 17 règles différentes qui ont été répertoriées.
- Les règles de calcul et de dimensionnement en fonction des modes de sollicitation, des motifs d'assemblage et les contraintes admissibles associées,
- Les règles actuelles de la surveillance des assemblages d'une structure métallique,
- Les pathologies principales rencontrées sur les assemblages rivetés à chaud.

Voici quelques morceaux choisis.

Technique d'assemblage

Photos et commentaires issus de la vidéo [1].



*Photo 1 : Chauffage à 950°C au rouge cerise.
Prise du rivet avec une pince. Taper le rivet au sol pour retirer la couche d'oxyde ou calamine.*



*Photo 2 : Mise en place dans le perçage.
Gauche contre Buterolle ; Droite Buterolle
/!\ : Ne pas se fier à la couleur de la photo qui n'est pas représentative de la réalité.*



Photo 3 : Deux tas pneumatiques en opposition servent à former la buterolle.



Photo 4 : Le rivet formé va refroidir et se contracter formant ainsi l'assemblage.

Tension résiduelle dans un assemblage riveté

Du fait de son mode de mise en œuvre, un assemblage riveté à chaud présente une tension résiduelle dans le rivet.

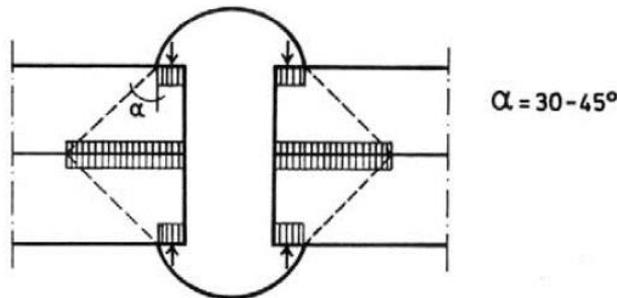


Figure 1 : Tension dans un assemblage avec rivet à chaud [3]

En effet, le rivet étant chaud, alors que la tôle est à température ambiante, son refroidissement va générer cette tension.

Un rapport de l'université de l'Illinois de 1930 [2] présente une étude sur la tension résiduelle dans les rivets en fonction de plusieurs paramètres :

- Les types de tête,
- L'épaisseur de l'assemblage,
- La température du rivet au moment de la pose (voir Figure 2),
- Le temps nécessaire pour former la bouterolle.

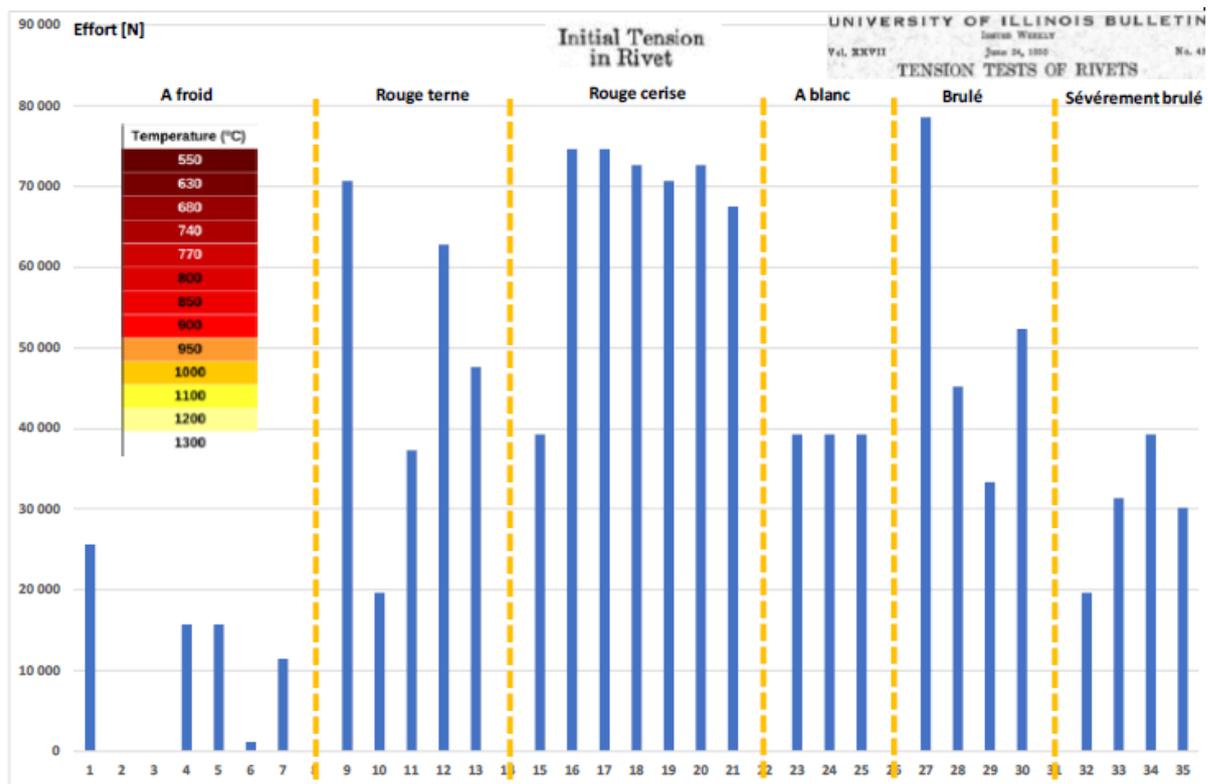


Figure 2 : Tensions résiduelles en fonction de la température de pose

Ces résultats montrent que la température optimale correspond à un chauffage **au rouge cerise** (comme c'est toujours la pratique actuellement). En effet, un rivet pas assez chaud donne une tension résiduelle très dispersive (soit une tension faible soit une tension équivalente au chauffage rouge cerise) et un rivet trop chaud donne une tension résiduelle globalement plus faible.

4. ESSAIS

4.1. Echantillons

Afin de réaliser des essais, EDF Hydro a prélevé des échantillons d'assemblages rivetés à chaud sur des équipements mise au rebut dans le cadre de leur remplacement :

- Trois échantillons sur une vanne évacuateur de crue du barrage de Beaumont Montoux, mise en service en 1921 (Photo 5),
- Deux échantillons sur une conduite forcée de l'aménagement de Pique Supérieur, mise en service en 1919 (Photo 6 et Photo 7).

Il s'agit d'échantillons ayant été sollicités en exploitation dans un milieu extérieur plus ou moins agressif pendant plusieurs dizaines années et ayant des dégradations liées à la corrosion.

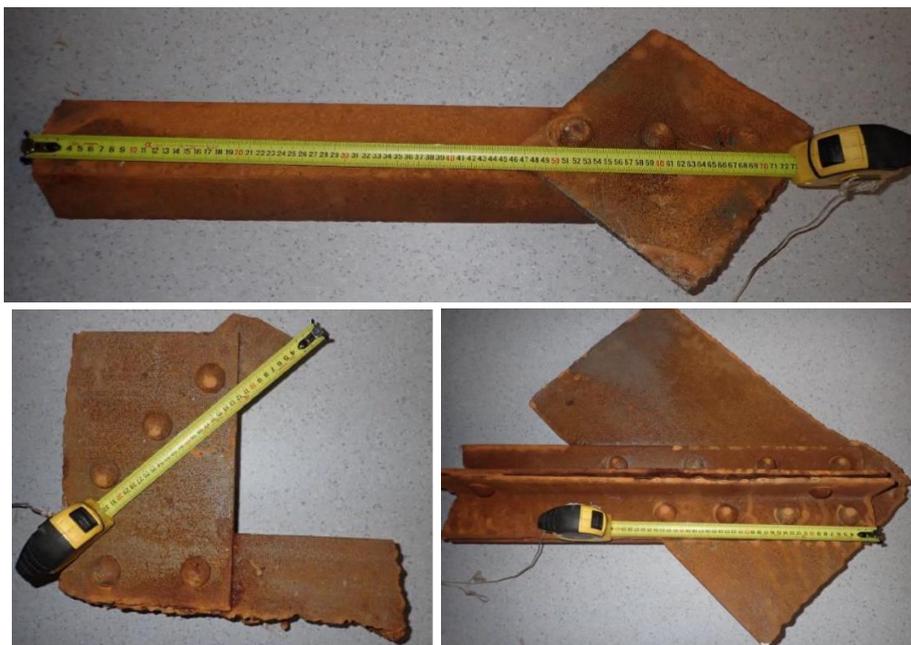


Photo 5 : Echantillons vanne
2 assemblages simple cisaillement ; 1 assemblage double cisaillement

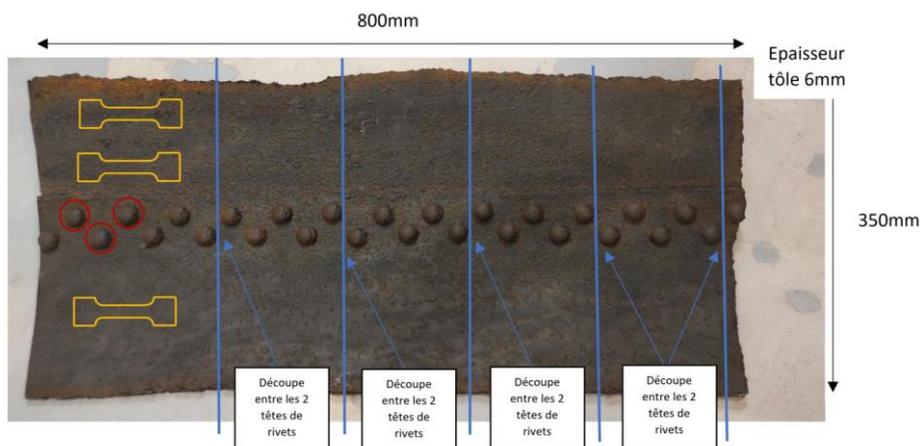


Photo 6 : Echantillons Conduite Forcée - assemblage longitudinal



Photo 7 : Echantillons Conduite Forcée - assemblage circonférentiel

4.2. Essais - tenue mécanique

Les essais consistent à solliciter des assemblages afin d'obtenir la courbe effort/déplacement et la tenue mécanique ultime de l'assemblage (ruine). La Figure 5 : Courbe effort-déplacement présente les résultats des essais.

Des essais par mouchetis sont également réalisés sur ces assemblages afin de cartographier de façon plus fine les déplacements et déformations en surface visible sur les échantillons lors de l'essai.

Des essais ont aussi été réalisés avec des têtes de rivet dégradées (50% et 90% du volume initial) afin de voir l'effet de cette dégradation sur le comportement de l'assemblage, et notamment sa charge ultime (avant ruine).

	R1	R2	R3	50% perte de tête de rivet	90% perte de tête de rivet
F_{ultime} [KN]	158	171	171	170	166
Delta [mm]	3,6	3,1	3,1	4,4	3.5

Tableau 1

La perte de volume de la tête de 50% ou 90% ne dégrade pas significativement la tenue en cisaillement, dans les conditions de nos essais.

En complément, les propriétés mécaniques des échantillons sont caractérisées au moyen d'éprouvettes de traction réalisées dans les tôles et les rivets des différents échantillons.

Au regard des capacités du banc d'essai du CETIM, des échantillons disponibles, du motif d'assemblage et du type de sollicitation de ces assemblages, les essais suivants ont été réalisés :

Pour la vanne :

- Deux essais avec trois rivets travaillant en simple cisaillement afin d'analyser la répétabilité des essais et valeurs, (Photo 8),
- Un essai avec deux rivets travaillant en double cisaillement (Photo 9).

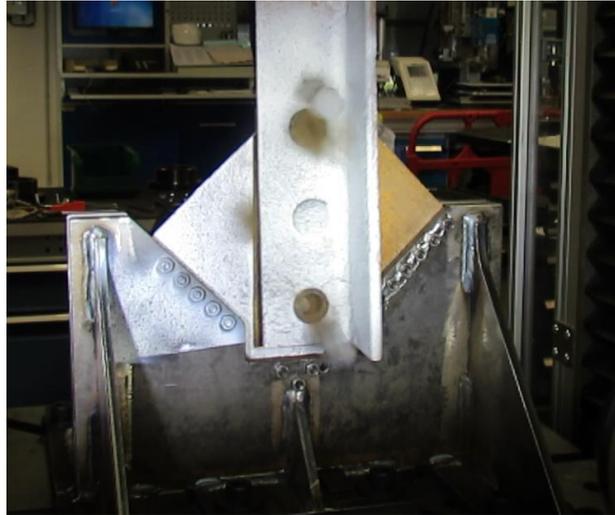


Photo 8 : Echantillon 3 rivets simple cisaillement (lors de la rupture)



Photo 9 : Echantillon 2 rivets double cisaillement

Pour la conduite forcée :

- Quatre essais avec cinq rivets travaillant en simple cisaillement sur l'assemblage longitudinal, afin de voir la répétabilité et les effets de bord du motif,
- Quatre essais avec trois rivets travaillant en simple cisaillement sur l'assemblage circonférentiel, afin de voir la répétabilité.

4.3. Essais - coupe à l'axe du rivet

En complément, des essais relatifs à la tenue mécanique, des coupes à l'axe du rivet ont été réalisées afin de vérifier la mise en œuvre. En dehors de la corrosion de la tête, les rivets sélectionnés ne présentent pas de signe de dégradation extérieur notable. On remarque par le fibrage que certains rivets sont dissymétriques dès la mise en œuvre : la partie côté bouterolle est déformée mais pas suivant l'axe du rivet.



Photo 10 : Coupe à l'axe d'un rivet de vanne



Photo 11 : Coupe à l'axe d'un rivet de Conduite Forcée

5. SIMULATIONS NUMERIQUES ET CORRELATIONS

Les simulations numériques réalisées permettent :

- D'illustrer le rivetage à chaud du rivet (Figure 3),
- D'illustrer les phénomènes de comportement de l'assemblage riveté (Figure 4),
- De comparer la capacité de charge d'un assemblage « numérique sain » à celle d'un assemblage « réel usagé » (Figure 5).

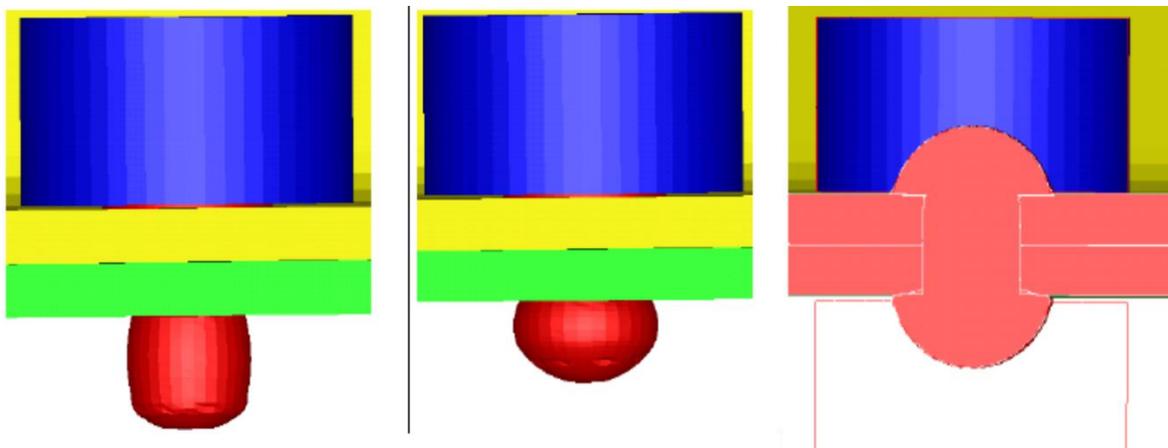


Figure 3 : Simulation du rivetage à chaud

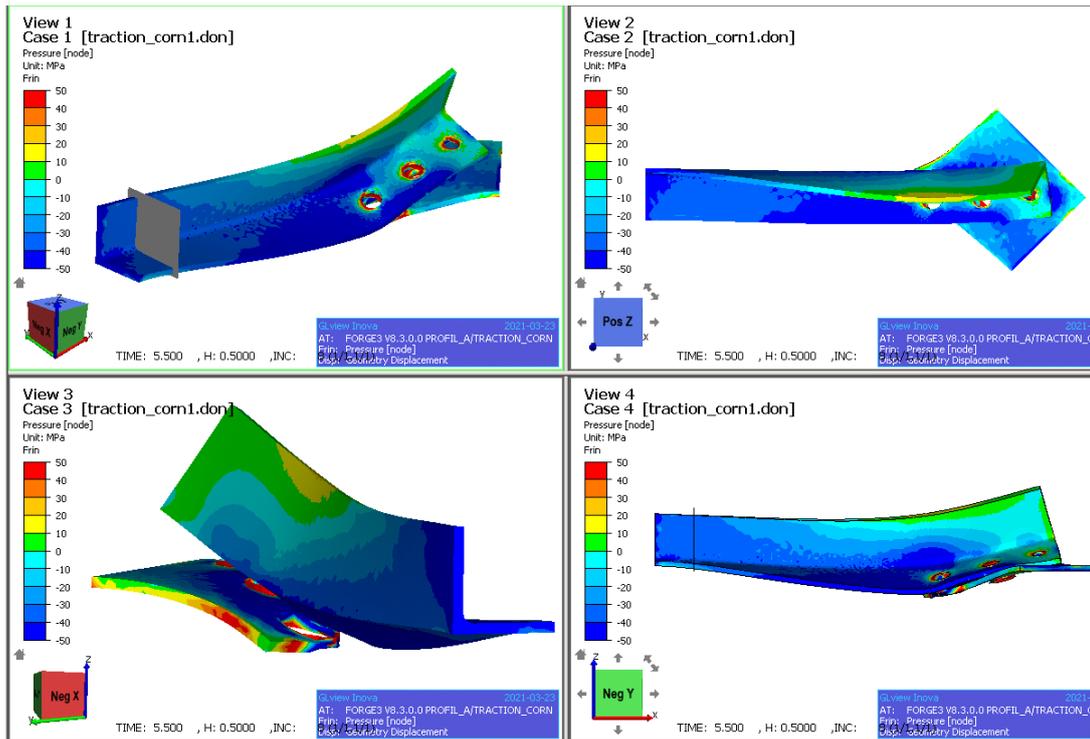


Figure 4 : Déformation et Contrainte

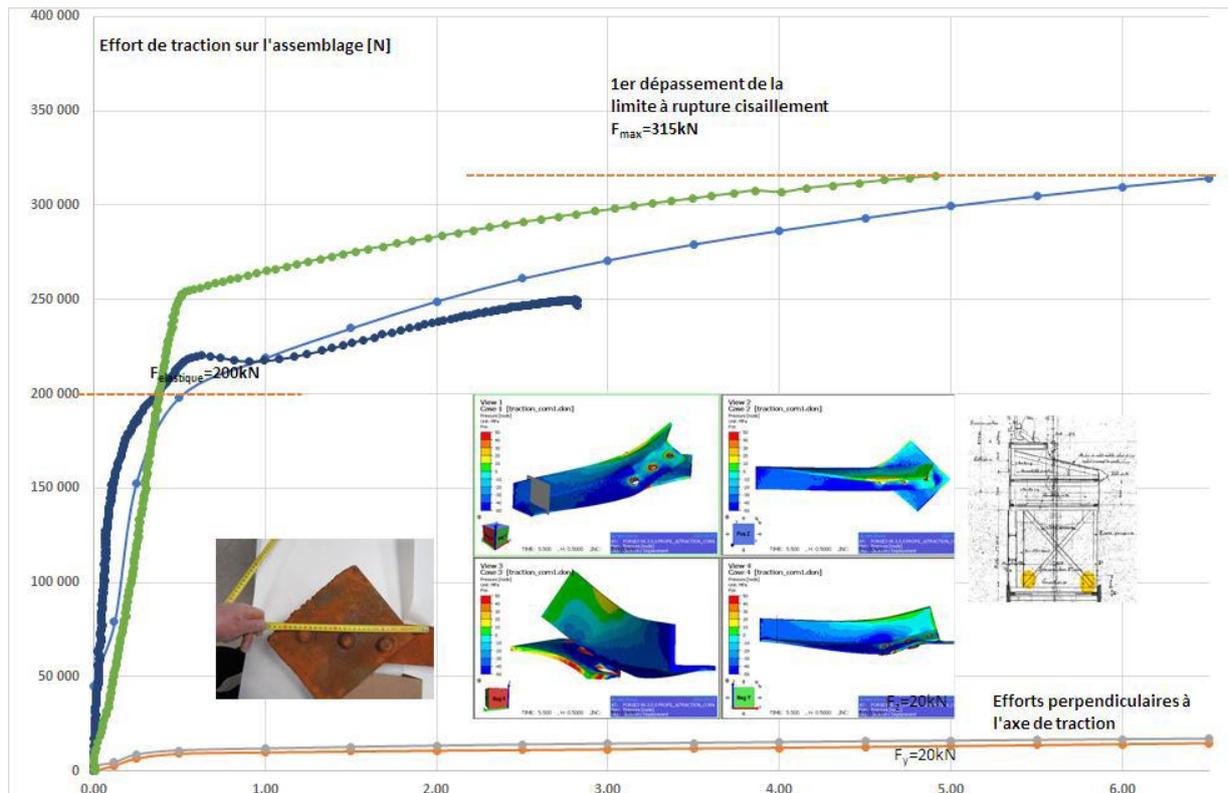


Figure 5 : Courbe effort-déplacement simulation numérique et essai

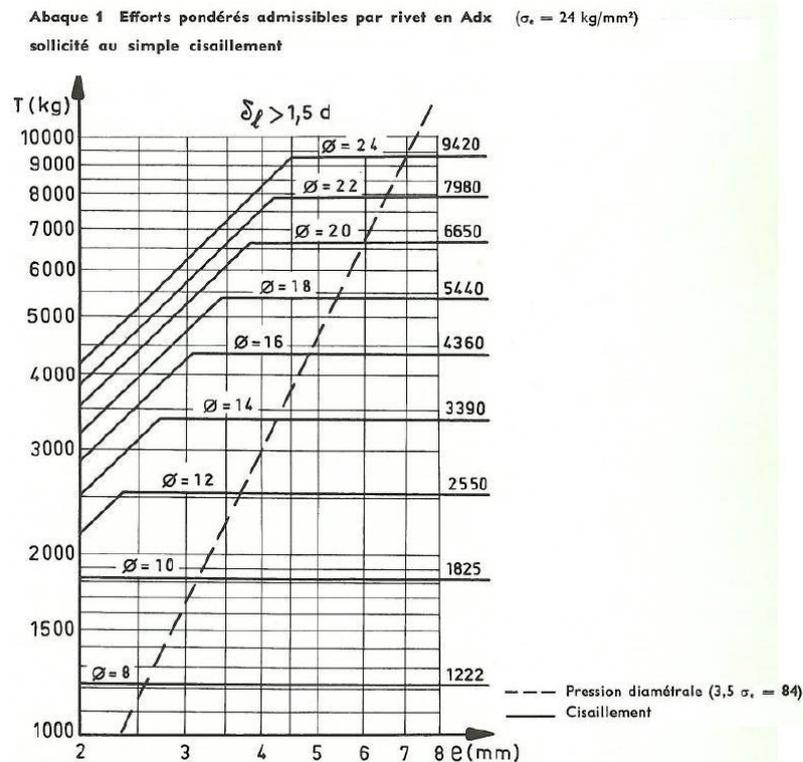
Sur la Figure 5 :

- La courbe **bleu clair** correspond à la simulation numérique,
- Les courbes **bleu foncée** et **verte** correspondent aux essais.
- En pointillé **orange** les valeurs limites de dimensionnement issues des abaques type Règles de Construction Métalliques de 1966. (Figure 6).

6. LES ENSEIGNEMENTS DE CES ESSAIS

Suites aux essais, nous avons les observations suivantes :

- La corrélation entre les courbes est importante : révélant une cohérence et un « bon vieillissement » des assemblages rivetés à chaud.
- La valeur de l'abaque (200kN, voir Figure 6) est légèrement inférieure à la limite d'élastique observée par la simulation numérique et les essais mais :
 - la charge ultime (de ruine) est bien au-delà (315kN),
 - la valeur de design de l'assemblage est de 133kN (200kN/1.5).



• Figure 6 : Abaque Construction Métalliques de 1966 (CM66)
Dans le cas d'un assemblage de 3 rivets diam 20 mm en simple cisaillement (cas de la Figure 5),
l'abaque donne un effort de 3x6650kg soit 200kN

7. LES ETAPES A VENIR

Comme évoqué dans le programme (voir § 2), dans la continuité des investigations déjà réalisées, les étapes suivantes restent à réaliser, au moment de la rédaction de cet article :

7.1. Etude des solutions de remplacement des rivets à chaud

En complément, des investigations déjà réalisées, il est envisagé de faire des essais de tenue mécanique avec des solutions de réparation/rénovation disponible actuellement, tel que :

- Rivet à chaud neuf
- Rivet Huck
- Boulons HR

Ainsi il pourra être évalué quel procédé est le mieux adapté en fonction des configurations (sans oublier que lors d'un remplacement d'un rivet à chaud détérioré, les contraintes d'accessibilité du site ou de la zone à réparer, peuvent aussi être déterminantes dans le choix de la technologie de réparation).

7.2. Guide des bonnes pratiques

C'est l'objectif opérationnel final de cette démarche.

Les attentes pour ce *guide des bonnes pratiques* sont de connaître la spécificité des assemblages rivetés appliqués aux conduites forcées et aux structures de vannes charpentées et ainsi :

- D'améliorer le diagnostic des ouvrages et notamment de ces assemblages,
- D'évaluer la nécessité d'une réparation ou pas, et le degré d'urgence de l'intervention,
- De présenter les solutions de réparation et leurs limites,
- De connaître les pratiques de dimensionnement des assemblages rivetés,
- De spécifier la mise en œuvre du rivetage à chaud, y compris en termes de contrôle,
- De présenter les spécifications de suivi et de surveillance.

8. RENFORCEMENT D'UNE STRUCTURE DE VANNE

Les inspections et expertises de la vanne 1 de Pizançon, réalisées en août et septembre 2018 et réalisées alors que la vanne était batardée, ont conclu à la nécessité de réparer la vanne (partie inférieure).

Afin de remettre l'équipement en exploitation, EDF-CIH a piloté une opération de maintenance de court terme consistant à réparer uniquement les parties les plus endommagées de cette vanne datant des années 30 (parties inférieures à l'aval soumises au marnage).

EDF-CIH et EDF-DTG ont proposé à la maîtrise d'ouvrage EDF Hydro Alpes de renforcer l'équipement en utilisant la technologie du rivetage à chaud pour réaliser les assemblages des nouveaux éléments sur les structures d'origine conservés (plutôt que le rivetage à froid ou le soudage ou le boulonnage), afin de rester dans l'esprit de la conception originelle de cette vanne.

Ce chantier a été fait dans le cadre d'une réflexion de « juste maintenance » en attendant le remplacement programmé de la vanne à l'horizon 2025.

Nous décrivons ici les renforcements mis en œuvre et les raisons ayant conduit à retenir ce type de technologie pour en tirer un retour d'expérience applicable, sur les plans techniques et financiers, pour d'éventuelles futures affaires de rénovation ou de réparation de vannes charpentées ou autres matériels anciens.

Le chantier de réparation s'est déroulé entre octobre 2019 et février 2020, dans le cadre d'un marché d'exécution. Les études d'exécution, la définition des renforcements y compris leur dimensionnement, et les modes opératoires ont été déterminés et imposés par EDF au Titulaire.

8.1. Description de Pizançon

Le barrage de Pizançon, situé sur l'Isère au niveau de Romans-sur-Isère, est constitué de 6 passes similaires. En 2018, deux vannes ont déjà été remplacées (V5 et V6). Les quatre vannes restantes (V1 à V4) sont identiques avec des dégradations plus importantes sur la V1.

Il s'agit d'une vanne charpentée double corps en acier riveté de 16,00 m de large et 14,15 m de hauteur. La vanne inférieure est de type Stoney et pèse environ 112 tonnes. La vanne supérieure est de type wagon et pèse environ 39 tonnes.

Sa mise en service date de 1931.

La vanne est présentée en Photo 12 vue depuis l'aval rive gauche.

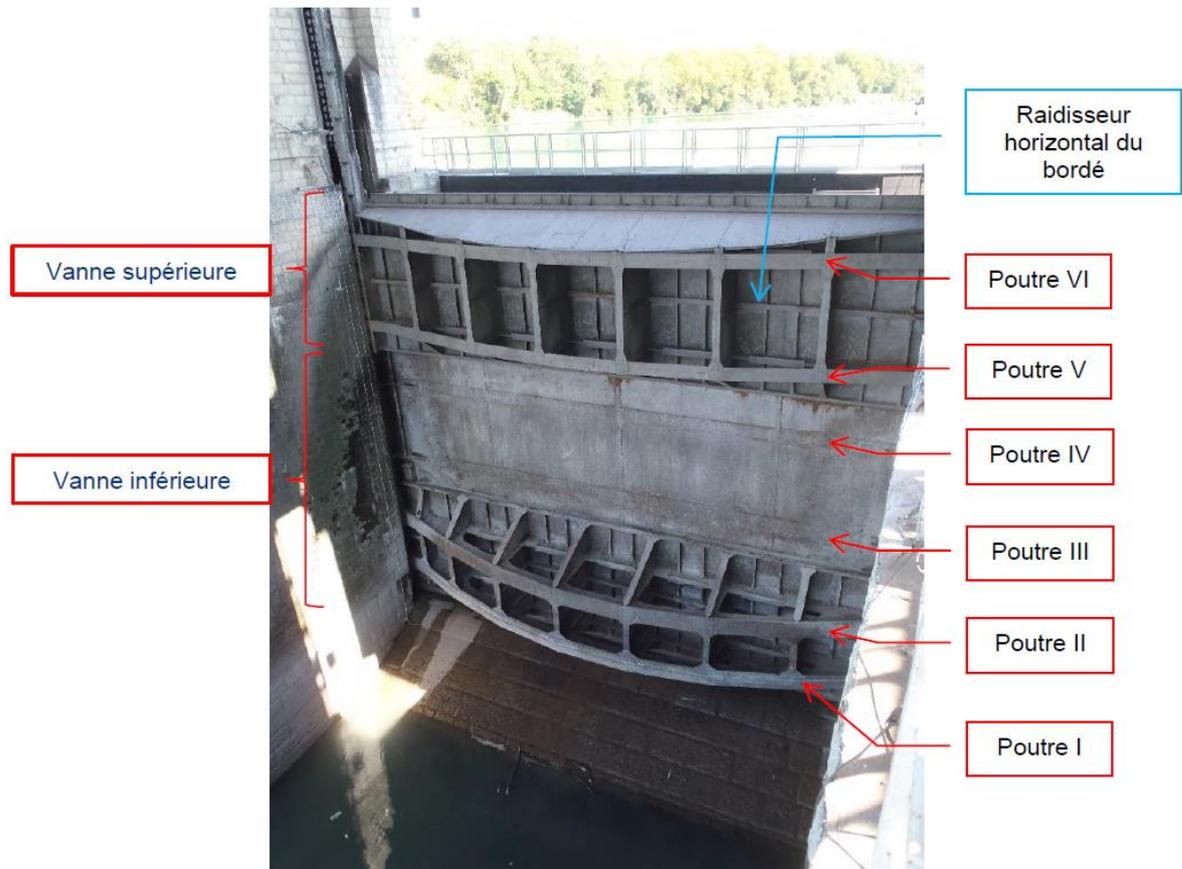


Photo 12 : vanne barrage n°1 vue de l'aval © Alain Prigent DTG

Les désordres sont de plusieurs type mais un désordre représentatif est repris ici pour illustration (Photo 13).



Photo 13 : Voile 4 vu depuis la RD (à gauche) et depuis la RG (à droite)

8.2. Renforcements et technologie retenus

8.2.1. Périmètre des renforcements

Le remplacement des 4 vannes d'origine (V1 à V4) du barrage de Pizançon était actée avec un horizon de démarrage en 2025 pour la V1.

L'expertise de l'été 2018 nous imposant des renforcements avant la remise en service de la vanne 1, le principe d'une juste maintenance a été appliqué en décidant de ne renforcer à court terme que les parties inférieures à l'aval voyant le marnage.

Pour ce faire, une cartographie des dégradations de la vanne a été réalisée par le bureau d'étude du service Electromécanique du site CIH de Grenoble conjointement avec la DTG et la Direction Technique du CIH.

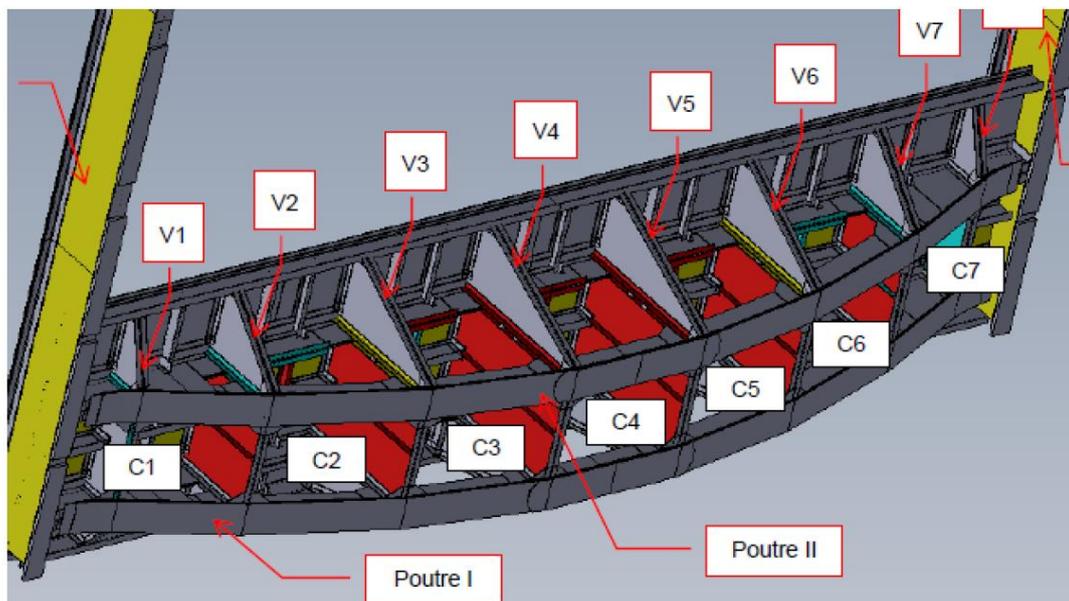


Figure 7 : cartographie de la V1 de Pizançon
(V pour voile et C pour caisson) © Rémy Brunella

Relativement à cette cartographie, les zones en rouge sont à renforcer impérativement, les zones en jaune selon opportunité, les zones en bleu ne nécessitent pas de renforcement et les zones en gris sont conservées.

8.2.2. Technologie des renforcements

8.2.2.1. Choix de la technologie

Les vannes de Pizançon étant anciennes (années 1930), la question s'est posée de comment les réparer.

En effet, la soudabilité n'était pas assurée intrinsèquement par les qualités d'acier mais aussi par les épaisseurs résiduelles trop faibles dans les zones d'attache des nouveaux renforts à ajouter.

Par ailleurs certains renforcements concernent le bordé et donc potentiellement l'étanchéité de la vanne (risque de fuite à travers l'assemblage sur le bordé).

Des rivets à froid ont été envisagés mais ne donnaient pas satisfaction pour les niveaux de serrage et les jeux restants après installation.

La technologie originelle de fixation par mise en place de rivets à chaud est donc venue se positionner face à une solution classique mécano soudée ou boulonnée.

Cette technologie du rivetage à chaud présente les avantages et inconvénients répertoriés dans le tableau ci-dessous.

Inconvénients	Avantages
Moyens humains : équipe de 3 personnes (chauffeur, teneur de tas, riveur)	Expansion du fut (étanchéité + anti-corrosion)
Travail par point chaud (risque brûlure + feu)	Pas de transmission de chaleur donc pas de déformation ou de fissuration à froid des tôles (comme pour le soudage)
Accessibilité (encombrement outils)	Encombrement (final)
Temps de préparation (pré-montage avec boulonnerie)	Temps de mise en place
Indémontable	Durabilité
	Efforts de sollicitation de l'assemblage transmissibles par simple et double cisaillement y compris dans des zones immergées, par butée mécanique donc sans faire intervenir la maîtrise d'un coefficient de frottement ou d'une précontrainte
	Facilité à peindre (formes douces, sans arêtes vives comme des écrous par exemple)

Tableau 2 : comparaison avantages/inconvénient du rivetage à chaud

Les avantages de cette solution de fixation des renforcements par rivets à chaud ont primé face aux inconvénients. Dans notre cas, les éléments prépondérants ont été l'étanchéité d'une part (pour le bordé) et l'encombrement des rivets qui est bien moindre que celui de boulons (vis +écrous) et qui permettaient de récupérer une plus grande partie de l'ancienne structure.

Pour les endroits inaccessibles aux outils de rivetage à chaud, de la boulonnerie HR ou de la boulonnerie injectée (injection d'une résine pour des questions d'étanchéité et de transmission d'effort par cisaillement) ont été utilisées après avoir vérifié par calculs (Direction Technique du CIH) la compatibilité de la solution retenue avec le niveau de sollicitation des zones (zone sollicitée : boulonnerie HR, zone peu sollicitée : boulonnerie injectée).

8.2.2.2. Principes de la technologie retenue

Pour changer les rivets sur site, il faut déposer les rivets existants, par burinage mécanique après les avoir percés à cœur, puis réaliser les trous.

Le rivet est ensuite chauffé et porté au rouge dans un four par le « chauffeur ».

A la sortie du four, le rivet est « tapé » pour le décalaminer (toujours par le chauffeur).

Il est ensuite mis en place par le teneur de tas (ou contre bouterolle).

Le rivet est alors bloqué coté bombé avec un tas (par le teneur de tas).

Il est enfin frappé à chaud avec une bouterolle (marteau pneumatique) par le riveur.

A noter : à Pizançon nous n'avons que des rivets à tête ronde mais il existe des rivets à tête fraisée.

8.2.3. Typologie des renforcements

La technologie d'assemblage des renforts étant choisie, les solutions de renforcements ont été mises en plan par le Bureau d'Etude du service Electromécanique du site CIH de Grenoble.

C'est d'abord la gamme de démontage qui a été définie (voir Figure 8). La modélisation de la vanne pour la cartographie (Figure 7) a grandement aidé à la compréhension du montage riveté initial de la vanne et a permis de concevoir cette gamme de démontage.

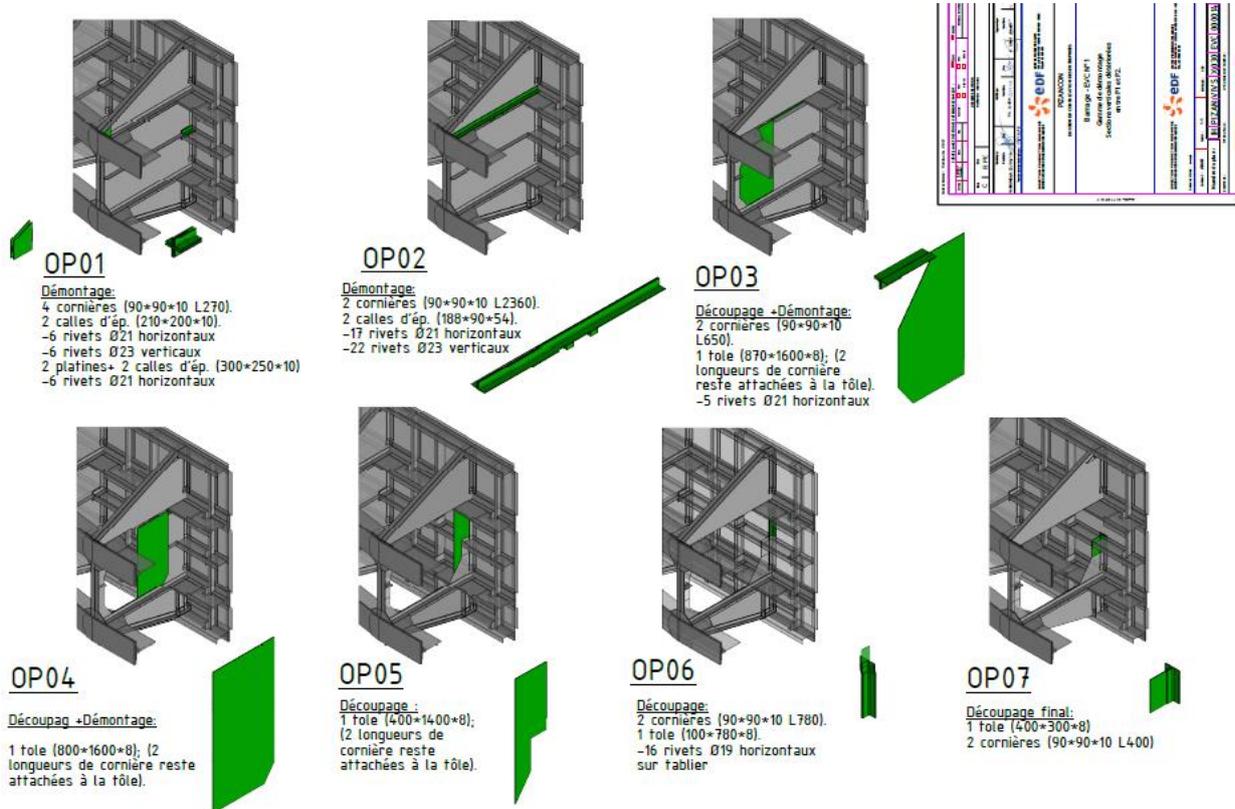


Figure 8 : gamme de démontage pour les renforcements de Pizçon V1

Ensuite, c'est le principe de renforcement qui a été défini en lien avec des vérifications par calculs (Direction Technique du CIH) et en réutilisant au maximum les emplacements des rivets existants, voir Figure 9 et Figure 10.

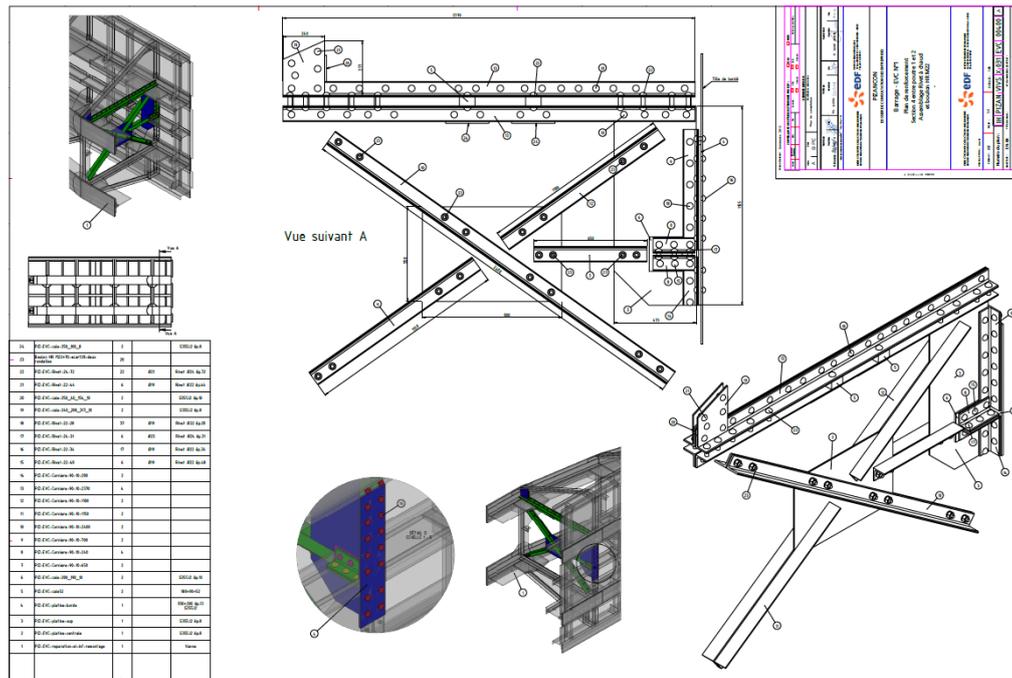


Figure 9 : principe de renforcements en utilisant des rivets à chaud.

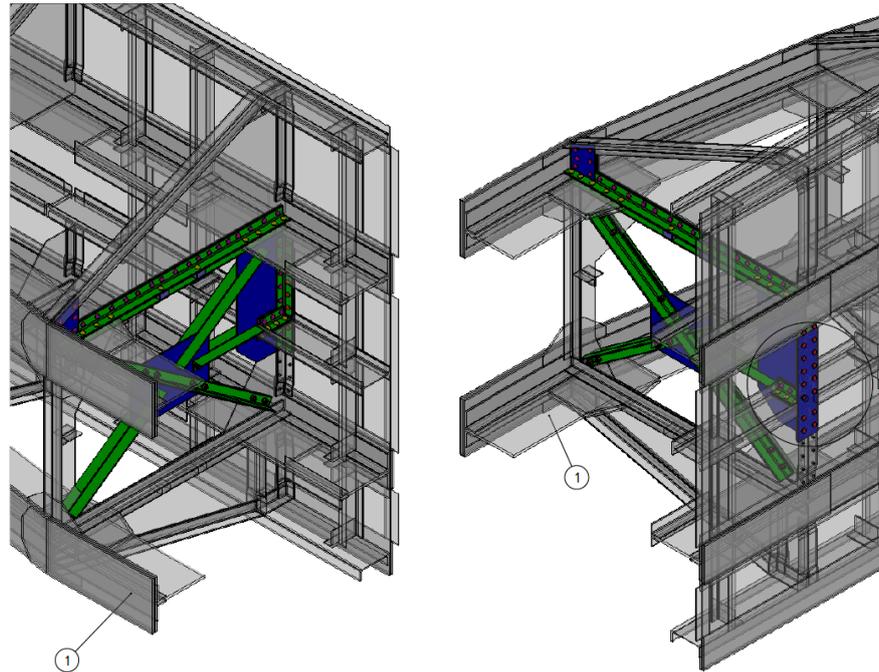


Figure 10 : principe de la réparation en 3D.

8.2.4. Réalisation

Le chantier de réalisation de ces renforcements a eu lieu d'octobre 2019 à janvier 2020.

Il est à noter que compte tenu de l'ensemble du travail d'étude réalisé précédemment, c'est un cahier des charges de moyens (et non de résultats) qui a été utilisé pour le contrat. Le chantier a permis le remplacement ou la mise en place de 450 rivets à chaud. (À titre de comparaison, la Tour Eiffel comporte deux millions de rivets et le paquebot Normandie onze millions de rivets !).

La Photo 14 illustre une réparation avant peinture et la Photo 15 après peinture.

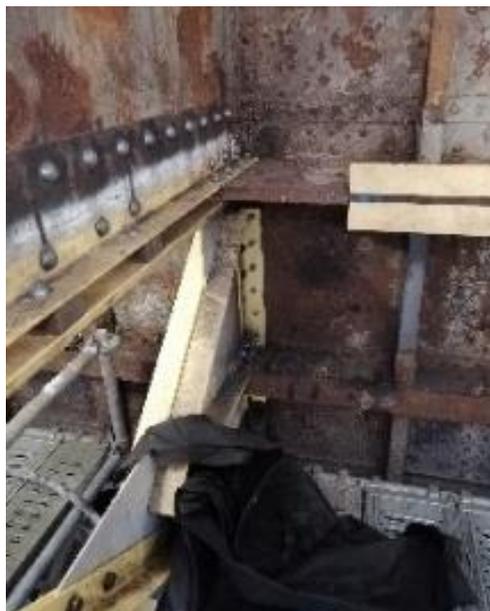


Photo 14 : renforcement du voile 4 de la V1 de Pizançon avant peinture



Photo 15 : renforcement d'un montant horizontal de la V1 de Pizançon après peinture

En février 2020 les essais de requalification ont permis de vérifier que la vanne renforcée avait retrouvé le comportement attendu, notamment en termes de déformation sous pleine charge (mesure des flèches par géomètre).

8.3. Conclusion

La réalisation de cette affaire a été un réel travail d'équipe entre les différentes parties prenantes (EDF-DTG + EDF-CIH + Titulaire).

La technique d'assemblage d'éléments d'une structure charpentée par rivets à chaud est une technique ancienne qui n'était plus utilisée au CIH mais qui peut encore l'être en fonction des circonstances particulières comme ce fut le cas pour la vanne 1 du barrage de Pizançon.

Elle ne peut en aucun cas remplacer des assemblages mécano-soudés pour une conception neuve mais peut être envisagée pour des solutions de réparation ponctuelle.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] BAUDIN CHATEAUNEUF - Le Rivetage à chaud, une spécialité DUMANOIS
<https://www.youtube.com/watch?v=g8Z1WTS9uQM>
- [2] Wilson-University of Illinois - Tension tests of rivets – 1930
- [3] SUSTAINABLE Bridges - Inspections rivetage et soudures - SB3.4 (002)