

## PROTECTION CATHODIQUE DES VANNES DE BARRAGE EN RIVIERE

### *Cathodic protection of dam gates in rivers*

**Stéphane TREVIN et Alain PRIGENT**

EDF-DTG, 134 chemin de l'étang - 38950 Saint-Martin le Vinoux

[stephane.trevin@edf.fr](mailto:stephane.trevin@edf.fr) ; [alain.prigent@edf.fr](mailto:alain.prigent@edf.fr)

**Sylvain DELALEZ et Emmanuel FRANCOIS**

EDF-CIH, 266 chemin de l'étang - 38950 Saint-Martin le Vinoux

[sylvain.delalez@edf.fr](mailto:sylvain.delalez@edf.fr) ; [emmanuel.francois@edf.fr](mailto:emmanuel.francois@edf.fr)

### MOTS CLEFS

Mots clefs en français (style Mots-clefs)

### KEY WORDS

Mots clefs en anglais (style Mots-clefs)

### RÉSUMÉ

*Dans le cadre d'un remplacement de vanne, après seulement une période de 15 mois en eau, il a été constaté une dégradation avancée de la boulonnerie galvanisée sur un des corps de vanne. Les différentes expertises menées par le Titulaire et EDF DTG concluent à un phénomène de corrosion galvanique entre le bordé en inox de la vanne wagon et les parties métalliques immergées non peintes de la vanne Stoney (principalement la boulonnerie). La solution proposée pour résoudre de ce problème est l'installation d'une protection cathodique par courant imposé. Cet article expose de manière synthétique l'analyse du problème, son traitement et le retour d'expérience après quelques années de fonctionnement de la protection active.*

### ABSTRACT

*As part of a valve replacement, after only a period of 15 months in water, it was noted that the galvanized bolts on one of the valve bodies had advanced degradation. The various expert reports carried out by the Licensee and EDF DTG concluded that there was a galvanic corrosion phenomenon between the stainless steel plating of the wagon valve and the unpainted submerged metal parts of the Stoney valve (mainly the bolts). The proposed solution to fix the problem is the installation of imposed current cathodic protection. This article summarizes the analysis of the problem, its treatment and the feedback after a few years of active protection.*

## 1. INTRODUCTION

Dans le cadre du programme Superhydro, l'UP Alpes a mandaté le CIH pour remplacer les 6 vannes du barrage de Pizançon. Ce barrage mobile est situé sur l'Isère à une vingtaine de kilomètres au Nord-Est de Valence. Les vannes double-corps sont composées d'une vanne inférieure Stoney et d'une vanne supérieure wagon. Mises en service en 1932, elles viennent obstruer les 6 passes du barrage faisant chacune 15 m de large et de 14 m de haut.

Les vannes wagon et Stoney coulissent l'une par rapport à l'autre. L'étanchéité entre-elles est assurée par un joint horizontal de type Omega et par des joints latéraux en note de musique. Ces joints sont montés sur la vanne Stoney et viennent en contact avec le bordé amont de la vanne wagon. Pour assurer une étanchéité sur toute la course, la totalité du bordé de la vanne wagon (14,7 m x 4,24 m soit environ 62 m<sup>2</sup>) est recouverte de tôles en acier inoxydable de type AISI 316 L de 8 mm d'épaisseur.

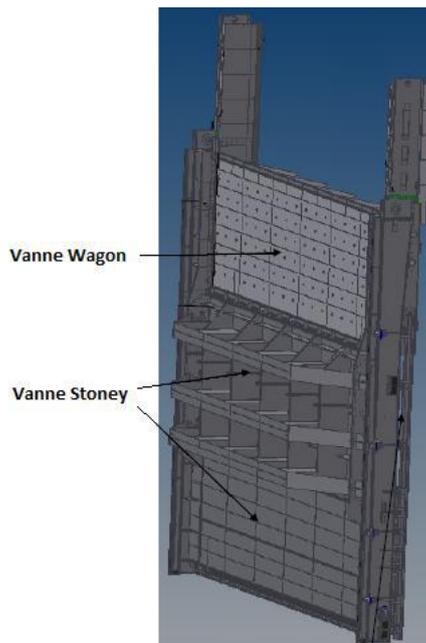


Figure 1 : vue en amont

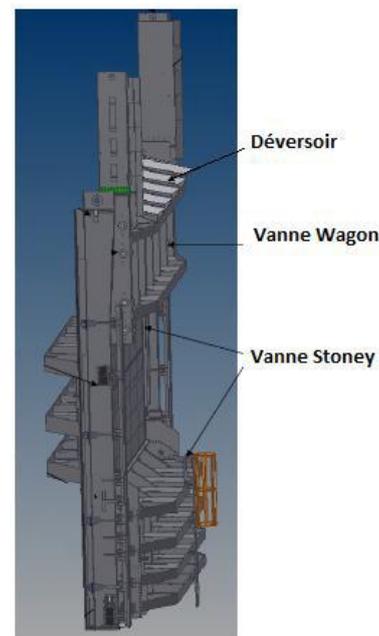


Figure 2 : vue latérale

Le chantier de remplacement des vannes a débuté en décembre 2013. La première vanne n°6 a été mise en eau en juin 2015. Afin de finaliser certains travaux mécaniques et contrôle commande, la passe n°6 a de nouveau été mise à sec en septembre 2016 (15 mois d'exploitation). Lors de la première visite de la vanne, il a été constaté des désordres de corrosion sur la boulonnerie en acier galvanisé et sur quelques zones de la vanne Stoney.

## 2. DESORDRES CONSTATES

L'ensemble des désordres constatés qui ont alertés l'exploitant se situe sur la vanne Stoney, sur des zones immergées avec absence de protection anticorrosion.

### 2.1 Boulonnerie en acier galvanisé

La plupart de la boulonnerie utilisée sur les vannes est en acier galvanisé à chaud. Cette boulonnerie est utilisée pour le réglage et la fixation des joints d'étanchéité. La boulonnerie présentant les faciès de dégradation les plus avancés se situe à proximité du bordé de la vanne wagon. La corrosion se traduit par une disparition de la galvanisation voire jusqu'à une perte de matière en acier significative. Les photos des Figure 3 et Figure 4 illustrent les dégradations constatées sur la boulonnerie de maintien du support du joint Omega. La boulonnerie du joint de seuil est aussi dégradée, avec la disparition de la couche de galvanisation (Figure 5).

Il est à noter aussi que les boulons Hautes Résistances, qui assurent l'assemblage mécanique entre les éléments de la vanne, présentent de légères traces de corrosion (Figure 6). Cet ensemble de boulonnerie en acier galvanisé a pourtant fait l'objet d'une mise en peinture sur site après montage. Un début de colonisation de ces ensembles boulonnés par des mélanges oxydes ferreux et ferriques mêlés à des anions de type carbonates et des bactéries ferrugineuses et même anaérobie est le signe d'une zone de corrosion active et intense.



Figure 3 : tête de vis (1/3 de la matière est perdue)



Figure 4 : vis de plaquage



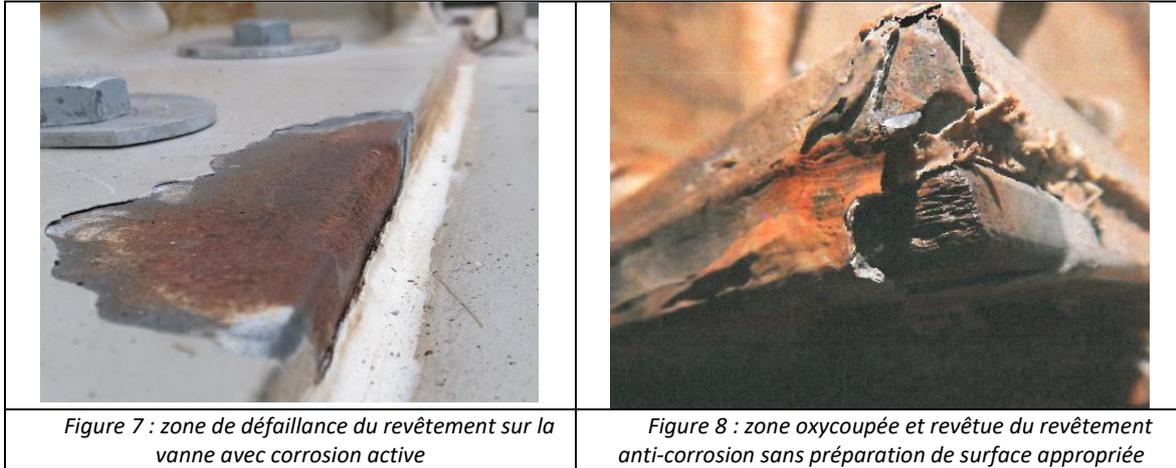
Figure 5 : boulonnerie de joint de seuil



Figure 6 : boulonnerie HR

## 2.2 Corps de la vanne avec une protection anti-corrosion défaillante

Lors de l'inspection, il a aussi été constaté des dégradations sur quelques points singuliers de la vanne Stoney. Ces zones, situées à proximité du bordé de la vanne wagon n'étaient plus protégées par le revêtement anticorrosion, entraînant une corrosion rapide de l'acier (Figure 7 et Figure 8). Elles sont mises en évidence car le revêtement n'a pas été suffisamment résistant dans ces zones singulières. En effet ces zones nécessitent une préparation de surface appliqué sur des zones correctement préparées ou qui n'ont pas été revêtue dans les règles de l'art (pointe de touche en amont de la pulvérisation au pistolet airless). La corrosion rapide sur ces zones met en exergue ces défauts en raison du processus de dégradation et de la formation d'oxydes de fer.

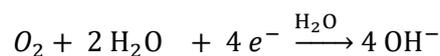
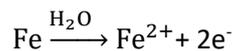


### 3. GENERALITES SUR LA CORROSION GALVANIQUE

#### 3.1 La corrosion électrolytique

La rouille, et donc la formation d'oxyde de fer, est une réaction d'oxydoréduction impliquant la molécule de fer (que ce soit dans du fer pur ou un alliage à base de fer), l'oxygène de l'air et de l'eau. Il faut donc que ces trois éléments soient en contact pour déclencher le processus de corrosion électrolytique.

Le fer solide au contact de l'eau aérée entre dans un processus d'oxydation qui libère deux électrons et donne l'ion ferreux  $Fe^{2+}$  (Potentiel d'oxydoréduction situé vers -0,44 V rapport à l'électrode normale à hydrogène). Ce processus est favorisé par la présence de la molécule de dioxygène qui avec deux molécules d'eau et quatre électrons se réduit en libérant quatre ions hydroxydes  $OH^-$  (Potentiel d'oxydoréduction situé vers +0,40 V par rapport à l'électrode normale à hydrogène). L'eau liquide favorisant la diffusion des espèces ioniques est le milieu idéal pour cette réaction et, sans sa présence, la réaction est rapidement limitée sur le plan cinétique. Cet ensemble forme une pile électrochimique où la molécule de dioxygène joue le rôle de cathode (potentiel le plus élevé) et l'atome de fer l'anode (potentiel le moins élevé).



Une goutte d'eau posée sur un morceau de fer ou d'acier à l'air libre est le lieu idéal pour que cette réaction ait lieu. Le fer ou l'acier joue à la fois le rôle d'anode et de cathode : la partie en contact avec l'eau est l'anode et l'autre partie la cathode.

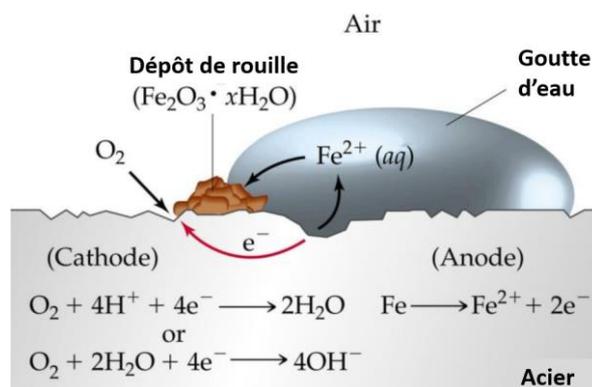


Figure 9 : schématisation du processus de corrosion électrolytique de l'acier sous une goutte d'eau. Oxydation dans les zones anodiques et réduction dans les zones cathodiques qui conduisent à la perte de matière et à l'apparition de dépôts d'oxydes.

Dans le cas où toute la pièce en acier est couverte par de l'eau, des défauts à la surface vont créer des différences de sensibilité à la corrosion initiale. Cela va conduire à la formation de petits trous (appelés piqures) qui vont créer des irrégularités de concentration en dioxygène et en acidité entre les différentes zones. La faible concentration en dioxygène au fond de la piqure facilite le processus d'oxydation du fer et par conséquent cette zone est l'anode, tandis que la zone de l'acier à la surface subit moins d'oxydation car le dioxygène s'y réduit et forme la cathode. La circulation des électrons se fera à travers l'acier. La réaction d'oxydoréduction va désagréger une partie de l'acier en ions ferreux qui vont se déposer plus loin sous forme d'oxyde (processus de précipitation). La Figure 9 est un schéma qui résume le phénomène de corrosion généralisée induit par cette présence d'eau à la surface de l'acier.

L'eau en contact avec l'air permet des échanges gazeux, notamment de dioxygène, facilitant la partie de la réaction libérant des ions hydroxydes. L'eau va permettre la circulation des ions et la précipitation des oxydes car les ions  $\text{Fe}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$  sont tous les deux en suspension et ils vont s'apparier pour former de l'hydroxyde de fer  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  et éventuellement d'autres combinaisons liées à un vieillissement chimique de l'oxyde. Cet ensemble forme la rouille. Ce processus de corrosion par piqures bascule en corrosion cavernreuse sur les aciers alliés et en corrosion généralisée ou en chancres de corrosion sur les aciers non alliés. Ce phénomène est souvent initié sur les vannes au niveau de la zone entre les écrous et les rondelles car il est plus difficile pour le dioxygène de diffuser dans zones confinées et cela entraîne une acidification locale du milieu qui accélère la corrosion.

### 3.2 Accélération de la cinétique de corrosion par un processus de couplage galvanique

Certaines circonstances peuvent favoriser une oxydation plus importante. Des conditions de concentration de dioxygène différentes entraînent des réactions menant à une pile électrochimique dite d'aération différentielle : en mer mais également en eau douce, l'eau en surface, aérée par les vagues et à l'interface avec l'air, sera plus oxygénée que le fond.

Ce processus de corrosion nécessite une circulation d'électrons entre une zone cathodique (réduction du dioxygène) et une zone anodique (oxydation du fer). Comme le dioxygène est plus disponible à la surface c'est l'acier situé en zone profonde qui est le plus sensible à la corrosion car c'est le seul qui puisse jouer le rôle d'anode en raison de la teneur différentielle en oxygène. C'est en raison de la nécessaire réaction de réduction du dioxygène que la zone d'acier en surface présente une activité cathodique. La partie la plus profonde s'oxyde et se corrode plus vite et cela se constate sur les structures plongées dans l'eau (bateau, pilier de ponton, etc.) car le taux d'oxygène dissout en surface est supérieur à celui vers le fond. Ce processus particulier d'oxydation en eau aérée mais présentant un gradient de concentration est appelé également phénomène d'Evans. Dans le cas d'un défaut de revêtement c'est aussi le même phénomène avec un processus anodique en fond de défaut et un processus cathodique en partie externe du défaut (traces de rouille plus ou moins adhérentes).

Mais le processus le plus défavorable est celui qui exalte la force électromotrice de la pile de corrosion en forçant l'acier ou le fer à se comporter comme une anode. La présence de métaux de potentiels électrochimiques supérieurs à celui de l'acier en contact électrique dans le même électrolyte favorise l'oxydation du métal le moins noble, c'est-à-dire l'acier non allié dans notre cas. C'est fréquemment le cas dans les structures complexes marines : Une plate-forme pétrolière a une architecture composée principalement d'acier, mais dont certaines parties sont faites de métaux différents. Les hélices des bateaux sont très souvent en bronze et les coques en acier.

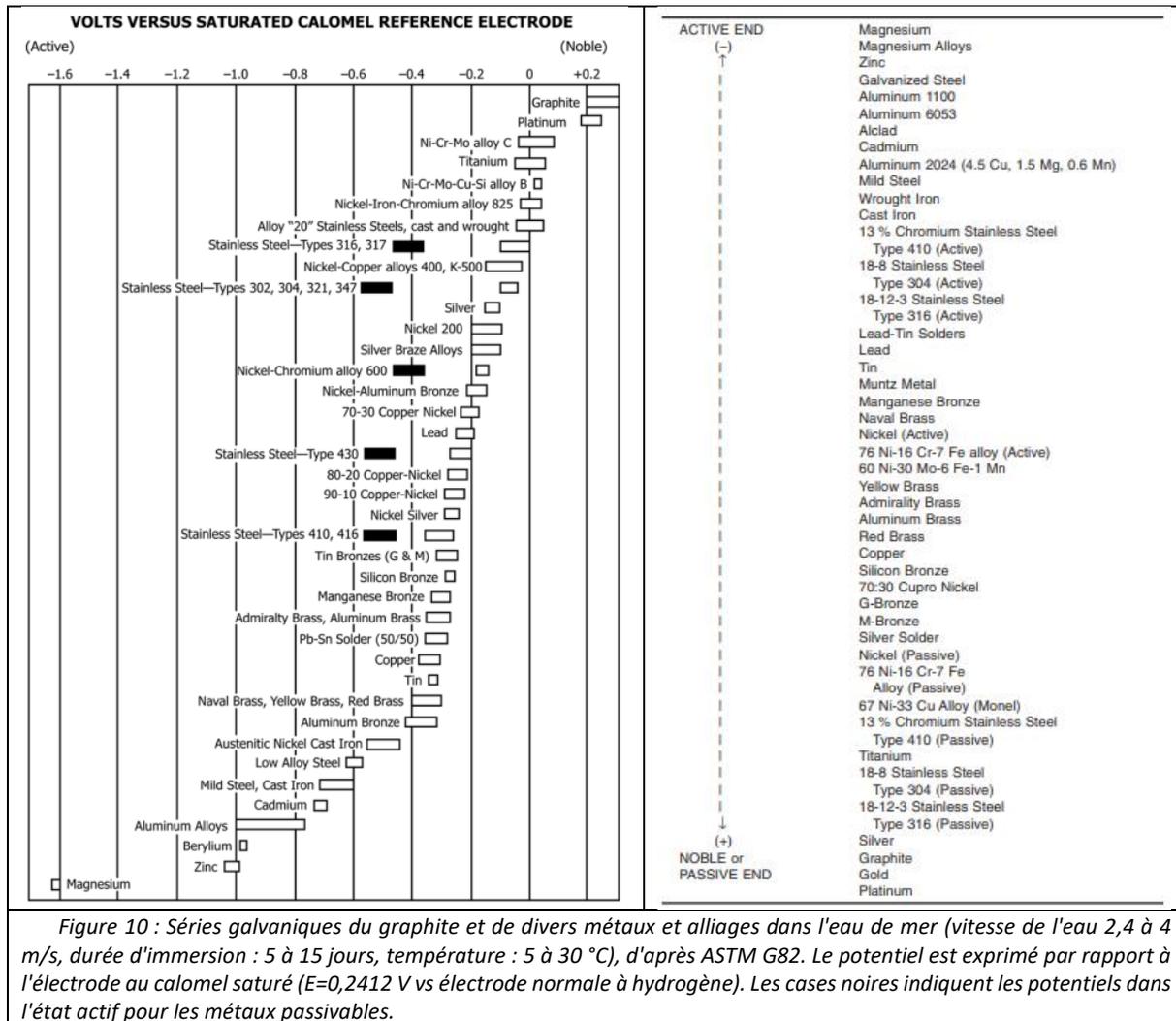


Figure 10 : Séries galvaniques du graphite et de divers métaux et alliages dans l'eau de mer (vitesse de l'eau 2,4 à 4 m/s, durée d'immersion : 5 à 15 jours, température : 5 à 30 °C), d'après ASTM G82. Le potentiel est exprimé par rapport à l'électrode au calomel saturé ( $E=0,2412$  V vs électrode normale à hydrogène). Les cases noires indiquent les potentiels dans l'état actif pour les métaux passivables.

Ainsi la mise en continuité électrique, même de qualité médiocre (soudure, boulonnerie, simple contact appuyé) d'acier non allié avec un acier inoxydable, du bronze, du cuivre, du titane ou des alliages cuproaluminium peut conduire à positionner l'acier non allié en tant qu'anode et à favoriser son oxydation dès qu'un défaut de surface mettra en continuité électrolytique le couple acier non allié et composant plus noble (au sens électrochimique). Un flux d'électrons est émis depuis l'anode d'acier vers la cathode plus noble et des réactions électrochimiques de surface viennent se produire pour compenser ce flux avec dissolution du fer en ions ferreux à l'anode et réduction des ions oxygène à la cathode. Ce flux d'électrons est d'autant plus intense que la surface de composé noble est importante au regard de l'acier non allié.

Sur l'échelle de noblesse indiquée sur la Figure 10, le platine, l'or et le carbone sont les éléments les plus nobles. L'acier inoxydable austénitique passivé (type 304, 316) est très noble par rapport à l'acier non allié et la différence de potentiel est proche de 600 mV. Avec l'échelle de noblesse il est aisé de remarquer que le zinc ou l'acier galvanisé présente une différence de potentiel de 1 V par rapport à l'acier inoxydable austénitique passivé. La pile électrochimique entre acier galvanisé et acier inoxydable présente une force électromotrice plus élevée que celle de l'acier non allié et explique que la boulonnerie en acier zingué est plus intensément attaquée que l'acier non allié lui-même et se comporte même comme un témoin de l'activité de corrosion accélérée par couplage galvanique. Plus la surface d'acier noble est importante, plus les défauts de revêtement ou les boulons galvanisés sont « rapidement attaqués » par la corrosion accélérée par le couplage galvanique.

## 4. MESURE SUR SITE (MISE EN EVIDENCE DU PHENOMENE)

### 4.1 Mise en évidence électrochimique de la corrosion des aciers

Tout solide plongé dans un environnement se voit imposer des propriétés électrochimiques par le milieu électrolytique dans lequel il baigne. Dans le cas d'un acier ou d'un métal, la surface est rapidement polarisée en fonction du milieu aqueux par exemple. Dans le cas de l'acier nu plongé dans l'eau douce ou saline de pH classiquement situé entre 5 et 9 et en présence d'oxygène son potentiel va se situer vers -200mV (vs électrode normale à hydrogène) pour un acier propre sans couche d'oxyde protectrice. Sur un plan thermodynamique seul un potentiel inférieur à -600 mV (vs électrode normale à hydrogène) garantit une immunité du fer et donc de l'acier dans l'eau douce ou marine. A ce potentiel la concentration en ions ferreux à l'interface acier/eau est de l'ordre de  $10^{-6}$  mol/L c'est-à-dire 56 µg/L eau ou environ 7 µg/kg d'acier ce qui est très faible et induit une vitesse de corrosion négligeable.

Un revêtement de peinture parfait sur un acier immergé ne permet pas de réaliser des mesures de potentiel fiable (valeur non stable et non significative) mais ce type de revêtement est impossible à réaliser sur les structures industrielles qui présentent toutes des micro-défauts et des porosités dans les peintures. Par conséquent le potentiel de l'acier de la structure peut être mesuré pour connaître son potentiel. Cette valeur de potentiel sera proche de -400 mV pour un acier non allié subissant un processus de corrosion en voie aqueuse et proche de -150 mV pour un acier inoxydable (les potentiels sont exprimés par rapport à une électrode Ag/AgCl ou Cu/CuSO<sub>4</sub> qui présentent peu de différence entre elles).

Dans le cas de la vanne n°5 de Pizançon, le potentiel mesuré sur le bordé en acier inoxydable était proche de -100 mV (vs Cu/CuSO<sub>4</sub>) et sur l'acier non allié proche de -370 mV (vs Cu/CuSO<sub>4</sub>) ce qui confirme les processus de corrosion et permet de calculer une force électromotrice de l'ordre de 0,3 volts.

### 4.2 Mise en évidence de la continuité électrique

Des mesures de continuité électrique sont réalisées pour s'assurer que le courant peut passer dans tous les conducteurs qui composent les deux vannes (structure en caisson, chaînes motrices, rails de guidage...). Si la résistance est négligeable (quelques Ohm) cela confirme que le courant de corrosion peut circuler depuis l'anode (acier non allié) vers la cathode (acier inoxydable)

Sur l'ensemble des deux vannes de la passe n°6, isolée de l'eau par batardage, les résistances mesurées n'ont pas dépassé 1 Ohm ce qui confirme la continuité électrique entre les vannes.

### 4.3 Observations visuelles complémentaires

Le processus de corrosion accélérée par couplage galvanique est également constaté visuellement avec la localisation des dégradations situées rapidement sur les aciers galvanisés avec des attaques en piqures profondes. Tous les défauts de peinture sont également marqués par une corrosion très active et très localisées en piqure profonde dans les premiers temps (quelques mois de mise en eau).

En cas de couplage galvanique avec un acier inoxydable, l'eau située à proximité de l'acier allié voit son pH augmenter par la formation des ions hydroxydes durant le processus de réduction du dioxygène ce qui provoque la précipitation des ions divalents de l'eau en fonction de leur concentration. Dans les eaux douces, a minima, moyennement minéralisées cela va provoquer l'apparition d'un dépôt blanchâtre sur la cathode c'est-à-dire à la surface de l'acier inoxydable.

Sur les bordés des vannes, des dépôts blancs sont visibles et confirment le pH localement basique et sur les parties en acier non allié anciennement galvanisé ou avec des défauts d'adhérence de peinture, l'attaque est profonde et en piqure avec une forte densité.

#### 4.4 Effet de la composition chimique ou biochimique de l'eau

La mesure de la composition chimique de l'eau avec la connaissance des ions magnésium, calcium, carbonates, hydrogénocarbonates, chlorures et sulfates ajoutés à la mesure du pH et de l'acide carbonique permet de calculer des indices dits de Langelier, Ryznar, Leroy, Larson et d'Agressivité qui aident à estimer les effets de l'environnement (eau) sur l'acier.

Les mesures de composition chimiques ont montré que l'eau n'avait pas de réelles caractéristiques agressive et corrosive ce qui confirme que seul un couplage galvanique peut expliquer une telle cinétique de corrosion sur les parties en acier non allié des vannes neuves.

Sur le plan biochimique, quelques investigations ont mis en évidence la présence de colonies bactériennes ferrugineuses et sulfato-réductrice dans les dépôts de boues au niveau de la boulonnerie (données non diffusées). Toutefois, l'absence d'autres cas de corrosion spécifiquement provoquée par une colonisation bactérienne sur les autres vannes non remplacées n'a pas permis de retenir cette hypothèse pour expliquer l'accélération du phénomène de corrosion.

## 5. SOLUTION RETENUE

Pour limiter le phénomène de corrosion accélérée par le couplage galvanique il est nécessaire :

- soit de réduire la surface nue d'acier allié en déposant un revêtement qui jouera le rôle d'interrupteur vis-à-vis de la circulation des charges ioniques et limitera les réactions électrochimiques de réduction de l'oxygène via les électrons disponibles.
- soit de mettre en place un système de protection cathodique qui permet de stabiliser thermodynamiquement l'ensemble des vannes et de diminuer le potentiel électrochimique de celles-ci dans le domaine dit d'immunité du fer vis-à-vis de son oxydation.

La solution du dépôt de revêtement n'a pas été retenue pour différentes raisons et notamment de devoir renouveler ce dépôt régulièrement et ceci sans doute sur un cycle périodique inférieur à 10 ans en première estimation. Seule la solution de la protection cathodique a été étudiée par la suite.

### 5.1 Principe de la protection cathodique

La protection cathodique est une technique de « protection active » contre la corrosion d'un matériau métallique au contact d'un électrolyte (milieu aqueux conducteur ionique comme les eaux, les sols, le béton). Il s'agit d'un système de prévention électrochimique basé sur la diminution du potentiel de corrosion jusqu'à un niveau où la vitesse de corrosion du métal est réduite de manière significative. La protection cathodique est obtenue par l'application d'une tension via des anodes galvaniques ou un générateur électrique capable d'engendrer une circulation de courant cathodique avec une intensité suffisante à la surface du métal à protéger pour diminuer son potentiel dans le milieu d'utilisation à un niveau correspondant à une vitesse de corrosion résiduelle suffisamment faible voir quasi nulle.

Pour cela on fait circuler un courant électrique continu entre une ou plusieurs anode(s) et le matériau à protéger (qui peut être une structure complexe faite de plusieurs aciers et métaux), qui constitue la cathode. L'efficacité de la méthode exige un contact de l'électrolyte avec le matériau à protéger en tout point de celui-ci. Le courant, qui circule dans l'électrolyte vers le métal, est ajusté de façon à fournir une densité de courant cathodique permettant d'atteindre une valeur de potentiel pour laquelle la vitesse de corrosion du métal devient très faible.

Il existe deux méthodes pour fournir le courant de protection afin de polariser la surface :

- les systèmes à anodes galvaniques (ou anodes sacrificielles) dans lesquels le courant de protection est issu de la corrosion d'un métal ou alliage dont le potentiel électrochimique est plus négatif dans le milieu considéré que celui de la ou les pièce(s) à protéger,
- les systèmes à courant imposé où le courant continu est fourni par une source alimentant des anodes plus ou moins inertes (dits aussi anodes stables en dimensions).

L'utilisation des anodes sacrificielles nécessite une conductivité d'eau suffisamment élevée et la possibilité de disposer plusieurs anodes sur toute la surface (risque de surpoids). La conductivité de l'eau douce limite considérablement l'usage des anodes consommables pour des structures ayant une surface à polariser importante. Dans le cas des vannes 5 et 6 de Pizançon, la surface du bordé représente une surface très importante et provoque une surconsommation des anodes sacrificielles.

## 5.2 Solution pour les vannes 5 et 6 de Pizançon

Après des essais de mise en œuvre préalable (non décrits ici) il a été établie une solution industrielle pour résoudre ce problème de corrosion accélérée.

La solution retenue pour le cas de Pizançon est l'installation d'une protection cathodique par courant imposé - PCCI (Figure 11). La solution par anodes galvaniques n'a pas été retenue car la masse nécessaire d'anodes sacrificielles montées sur la vanne Stony serait trop importante pour que cette dernière puisse fonctionner correctement.

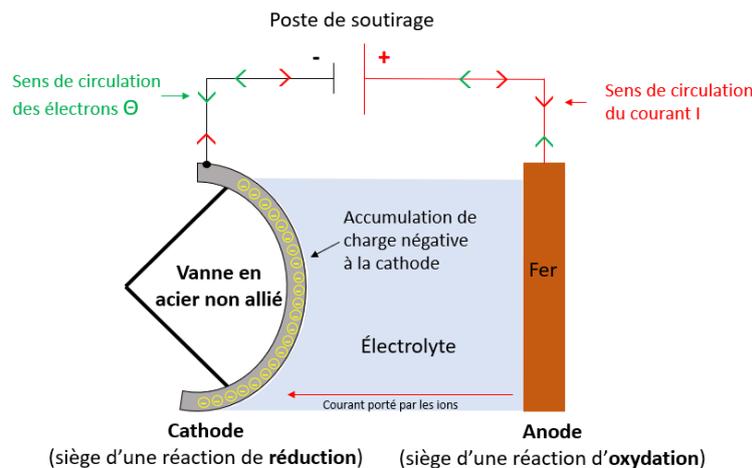


Figure 11 : Schéma de principe d'une protection cathodique à courant imposé d'une vanne

Les armoires des redresseurs qui composent le poste de soutirage sont alimentées par l'usine selon une tension de 400 V alternatif et de puissance courante. L'armoire d'acquisition est alimentée par une tension de 220 V via l'armoire des redresseurs.

Des câbles cheminent depuis la borne positive du redresseur vers les 2 anodes en acier en amont de chaque vanne. Un redresseur alimente en courant ces anodes. Les vannes double-corps des passes 5 et 6 sont reliées indépendamment par deux câbles sur enrouleur (pour suivre les translations des vannes selon le plan vertical en fonction du débit de l'Isère) depuis les bornes négatives de leurs redresseurs respectifs. Ainsi un courant électrique circule depuis la borne positive vers la borne négative au travers des câbles, des anodes et vannes et au travers de l'électrolyte dont la nature est l'eau de l'Isère avec des charges ioniques variables selon les saisons.

Le point de fonctionnement de la PCCI est déterminé selon un protocole et avec les outils suivants :

- Deux électrodes de mesure en zinc pur sont introduites par passe.
- La différence de potentiel entre les vannes de chaque passe et les électrodes de mesure en zinc doit s'inclure dans l'intervalle [-0,05 V ; +0,30 V] et idéalement [+0,05 V ; +0,20 V]. Cette mesure s'entend hors chute ohmique.

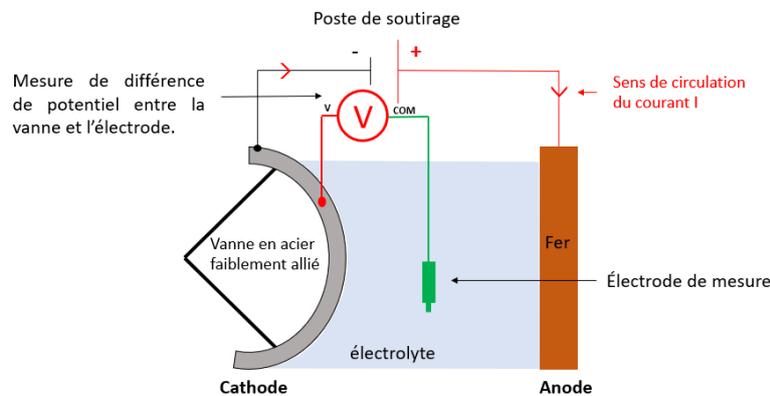


Figure 12 : Mesure de différence de potentiel entre la cathode et une électrode de mesure

Dans le cas d'une PCCI où l'électrolyte est de l'eau douce, pour confirmer le fonctionnement de la protection cathodique, certaines dispositions sont à prendre lors des mesures de potentiel électrochimique. En effet, l'eau douce a une conductivité bien moins élevée que l'eau de mer, ou l'eau saumâtre (cf. Tableau 1).

**Tableau 1 - Valeur de conductivité retenue pour classifier les différentes eaux.**

Différents électrolytes	Conductivité
Eau douce	50 à 1500 $\mu\text{s/cm}$
Eau saumâtre ou saline	10 à 50 $\text{ms/cm}$
Eau de mer	50 à 60 $\text{ms/cm}$

Le caractère moins conducteur de cet électrolyte nécessite d'adapter la méthode de mesure par rapport à un électrolyte conducteur (ex : eau de mer). Cette méthode consiste à faire disparaître le terme chute ohmique liée à la résistance de l'électrolyte et des anodes et à l'intensité du courant imposé. Ainsi, une mesure de la différence de potentiel entre la structure et une électrode de référence est effectuée instantanément après la coupure de courant. Cette méthode est dite mesure de différence de potentiel à courant coupé ou encore mesure « ON-OFF ».

Une méthode robuste pour réaliser la mesure et éliminer les chutes de tensions d'origines électriques consiste à supprimer l'intensité délivrée par le poste de soutirage et de réaliser l'échantillonnage dans le délai le plus court possible après la coupure. En réalisant cette mesure à potentiel coupé (ON-OFF) l'expression du potentiel électrochimique devient :

$$\Delta E = E_{\text{structure}} - E_{\text{électrode}} + \gamma t$$

Avec,  $\Delta E$  différence de potentiel (V),  $E_{\text{structure}}$  le potentiel électrochimique de la structure à protéger (V),  $E_{\text{électrode}}$  le potentiel de l'électrode de mesure (V),  $\gamma$  une constante de temps ( $\text{V}\cdot\text{s}^{-1}$ ) et  $t$  le temps (s)

$\gamma t$  est une fonction temporelle qui est induite par la dépolarisation de la structure. Cette dépolarisation assimilable à une décharge de multiples condensateurs électriques est assez lente pour être considérée négligeable sur les structures de grande taille en acier durant la seconde qui suit la coupure de courant.

La structure en acier offre de nombreux sites (défauts de peinture, boulonnerie nue) de circulation de courant et est considérée comme un grand ensemble de capacités électriques qui vont se décharger à des vitesses différentes.

Le retour d'expérience de EDF DTG/IDM et la recommandation PCRA 011 du CEFACOR permettent de justifier une mesure quasi-instantanée de la différence de potentiel de la structure par rapport à l'électrode de mesure 100 ms après la coupure du courant. L'opérateur a donc l'information directe sur le potentiel électrochimique de la structure lorsque la protection cathodique à courant imposé est en fonctionnement et que le courant est coupé transitoirement pour la mesure.

### 5.3 Plans et matériels utilisés

Les différents composants installés sont :

- Une alimentation électrique en 220 V par un câble issu d'une armoire dédiée et débouchant sur deux prises de courant type 2P+T. Les redresseurs sont alimentés via ces deux prises.
- Les anodes en acier non allié de 5 cm d'épaisseur (pour supporter les chocs des objets flottants lors des crues et augmenter la durée de vie du poste anodique), de 0,5 m de large et 5,3 m de haut disposées en tête de musoir. De telles dimensions associées à la résistivité moyenne de l'eau permettent de calculer une résistance électrique théorique par anode de 5,5 ohms. Il y a 2 anodes par passe et chaque anode pèse 616 kg.
- Les électrodes de mesures en zinc pur.
- Les enrouleurs de référence CAVOTEC R18-130.
- Les câbles de type U1000 R2V (isolant H07RN) de section 50 mm<sup>2</sup> spécialement conçus pour la protection cathodique. La liaison est directe avec les anodes et passe par des enrouleurs pour les vannes.
- Les redresseurs de référence Jacquet Dechaume 01-54815-00 (48V/15A) associés à un dispositif de mesure par sélecteur qui permet le suivi par e-monitoring.

## 6. METHODE DE MESURE MISE EN ŒUVRE

La mesure de la différence de potentiel permet de s'assurer que le système est efficace. La mesure peut être réalisée selon 3 modes distincts :

1. Mesure manuelle à lecture directe.
2. Mesure manuelle avec enregistrement du signal.
3. Mesure régulière en distancielle avec enregistrement du signal.

### 6.1 Mesure manuelle à lecture directe

Cette mesure nécessite de se rendre sur l'usine et de disposer d'un multimètre à rafraîchissement d'affichage rapide. Il est possible de descendre au niveau des musoirs pour mettre en place une électrode de mesure de type Ag/AgCl ou Cu/CuSO<sub>4</sub>(saturée) préalablement vérifiée au laboratoire. Cette électrode auxiliaire permet de recalibrer si nécessaire le potentiel des électrodes de mesure en zinc (pseudo-électrode de mesure).

Lors de la mesure, l'alimentation des deux redresseurs des vannes 5 et 6 est stoppée simultanément pour qu'aucune influence externe ne vienne perturber la mesure.

La première valeur de différence de potentiel lisible sur le multimètre immédiatement après la coupure est retenue comme différence de potentiel sans chute ohmique (délai de lecture de 100 à 300 ms). Cette valeur doit vérifier l'intervalle indiqué dans la Figure 13 c'est-à-dire l'intervalle [-0,05 V ; +0,30 V] et idéalement [+0,05 V ; +0,20 V]. Cette mesure est répétée 3 fois pour chaque vanne une fois par an.

$\Delta E$ vs Ag/AgCl	$\Delta E$ mesuré et comparé à la norme EN 12473 :2014	$\Delta E$ vs Zn/Zn <sup>2+</sup>
> - 0 ,750 V	$\Delta E$ non-conforme (2)	> + 0 ,300 V
- 0 ,750 V	$\Delta E$ toléré (1)	+ 0 ,300 V
- 0 ,850 V	$\Delta E$ conforme	+ 0 ,200 V
-1,000 V		+ 0 ,050 V
-1,100 V	$\Delta E$ toléré	- 0 ,050 V
< -1,100 V	$\Delta E$ non-conforme	< -0,050 V

Figure 13 : Valeurs de différence de potentiel électrochimique à respecter

## 6.2 Mesure manuelle avec enregistrement du signal

Cette fois ci le multimètre utilisé est muni d'un enregistreur de données afin de stocker les mesures de différence de potentiel. Là encore une électrode auxiliaire peut être installée. Ainsi les différences de potentiel ON et OFF sont enregistrées et les différentes caractéristiques de potentiel / temps sont tracées (cf. Figure 14). Arbitrairement sur la base du savoir-faire DTG, la différence de potentiel « OFF » retenue est enregistrée 100 millisecondes après la coupure de courant. Sur le graphe de la Figure 14, ce dernier est de +0,05 V vs électrode de mesure en zinc ce qui est conforme selon l'abaque de la Figure 4.

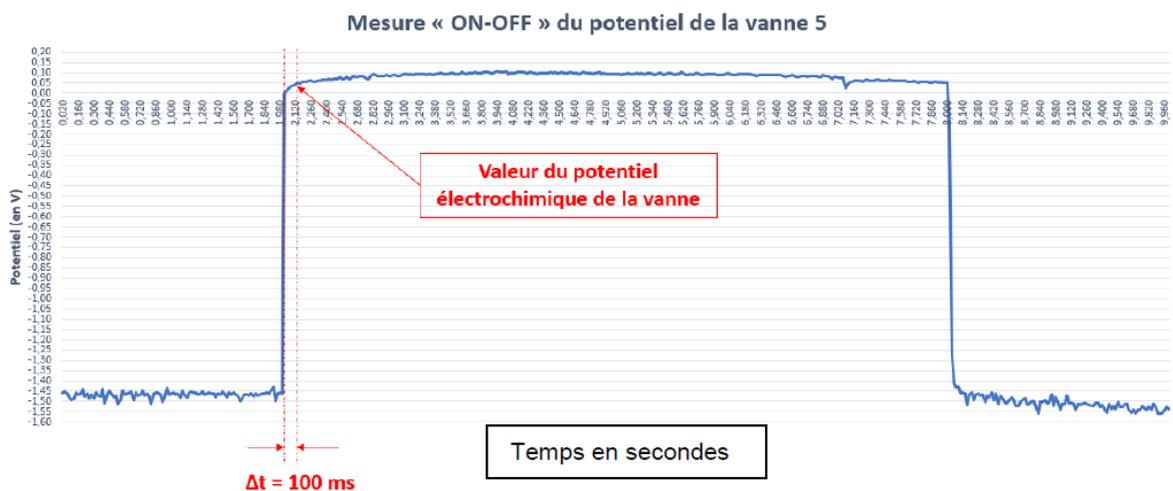


Figure 14 : Relevé du potentiel électrochimique de la structure lors d'une mesure "ON-OFF"

### 6.3 Mesure régulière en distanciel avec enregistrement du signal

L'installation originale a été modifiée par DTG pour permettre l'installation d'un automate et d'un enregistreur haute fréquence. Le système de télésurveillance ou e-monitoring a été installé sur le barrage de Pizançon en septembre 2021 pour la PCCI de la vanne 5 et en décembre 2021 pour la PCCI de la vanne 6. Ce dispositif de mesure et de surveillance à distance est constitué d'un coffret électrique à proximité de l'armoire électrique (cf. Figure 8). À l'intérieur de ce coffret se trouve une alimentation équipée d'un disjoncteur, un automate électrique permettant de sélectionner les différentes sorties (potentiel des vannes, électrodes) ainsi qu'un Raspberry- $\pi$ . Le Raspberry- $\pi$  réalise les mesures de différence de potentiel et également contient le programme de mesure.

Les caractéristiques de la mesure pour chaque vanne sont :

- Temps d'enregistrement : 10 secondes de  $t_0$  à  $t_{10}$ .
- Coupure du courant à  $t_0+2$  s pour une durée de 6 s soit jusqu'à  $t_8$ .
- Fermeture du circuit pour une circulation du courant à  $t_8$  s.

Cela permet d'enregistrer chaque séquence avec les différences de potentiel à courant circulant et coupé.

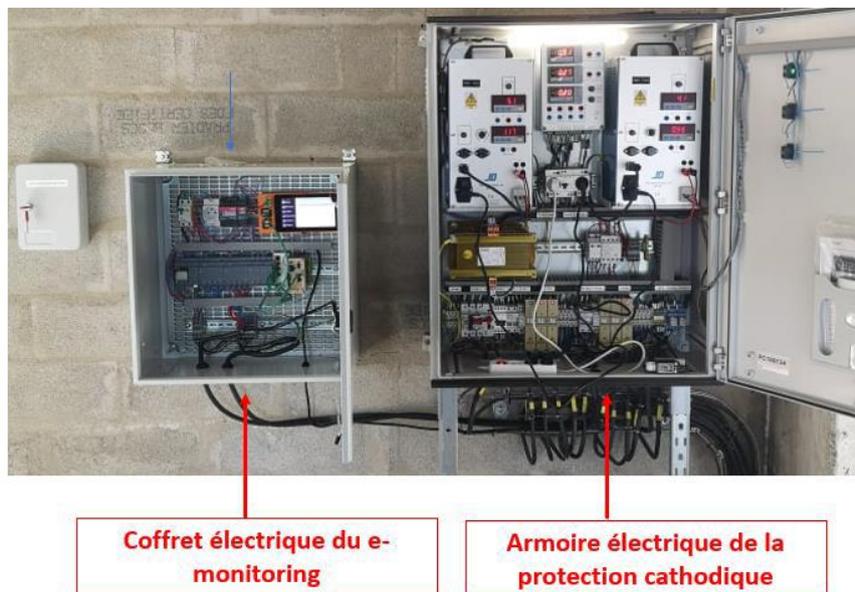


Figure 15 : Coffret électrique du système e-monitoring (droite) et armoire électrique du système de protection cathodique des vannes 5 et 6 (gauche)

Le système e-monitoring réalise 2 séquences de mesures de différence de potentiel électrochimique par jour sur chaque vanne afin de vérifier les critères de protection cathodique. Par rapport aux préconisations ce suivi est très fréquent. Ce suivi rapproché provient du fait que ce système est en cours de validation industrielle à EDF DTG et il est donc nécessaire d'acquérir le maximum de mesure pour obtenir un retour d'expérience vis-à-vis du fonctionnement de ce système. En ce qui concerne l'analyse des données, les mesures de différence de potentiel sont envoyées et enregistrées sur un serveur informatique au sein d'EDF DTG. Ces mesures sont ensuite traitées et sauvegardées par un programme informatique dans un fichier partagé entre l'exploitant et l'ingénierie. Ce fichier permet de visualiser l'évolution du potentiel électrochimique de chaque vanne. Cela permet de vérifier aisément si ces valeurs sont conformes vis-à-vis de l'abaque. Ce fichier est régulièrement mis à jour par un agent de DTG.

## 7. RESULTATS D'UNE INSPECTION APRES 5 ANNEES D'EXPLOITATION

En 2022, la vanne N°5 a été inspectée pour faire un état des lieux et confirmer le fonctionnement de la PCCI. Le bilan de cette inspection est le suivant :

- Les différents éléments des 2 vannes qui composent la passe 5 du barrage de Pizançon sont globalement protégées par le procédé PCCI.
- Les réglages permettent de ralentir la cinétique de corrosion sans provoquer de dégradation prématurée du revêtement. La méthode de mesure utilisée (Courant ON/OFF) permet de mesurer aisément la différence de potentiel avec les électrodes de mesures ou les électrodes de référence ajoutées lors des interventions *in-situ*.
- L'intégration du procédé au niveau de l'usine et vis-à-vis des agents d'exploitation s'est faite sans difficulté tant sur le plan technique qu'organisationnel. Quelques agents sont formés au suivi de l'installation.
- Une amélioration du suivi des performances par installation d'un système d'e-monitoring a été mise en place et permet à EDF DTG de suivre au jour le jour la différence de potentiel.
- Quelques éléments situés dans les zones de marnage laissent apparaître un peu de corrosion qui peut être traitée de manière classique (nettoyage, grattage et remise en peinture).
- Des sous-parties de la vanne Stoney en partie basse montrent aussi des traces ou des dégradations marquées par corrosion et cette corrosion s'explique par les faits suivants :
  - ✓ soit ces éléments sont masqués du champ électrique par le génie civil,
  - ✓ soit ces éléments sont situés en aval immédiat de la vanne,
  - ✓ soit ces éléments sont « écrantés » du champ électrique par une surface métallique appartenant à la vanne (galet de roulement...)

## 8. CONCLUSION

La conception des éléments métalliques des ouvrages nécessite de prendre en compte dès le départ les risques de dégradation par corrosion à plus ou moins long terme. Pour cela il existe des règles de conception géométrique facilitant les opérations de mise en peinture anti-corrosion mais il faut également porter attention aux matériaux et aux surfaces relatives utilisés de ces métaux ou alliages. Cela va de surface entière de matériaux nobles en passant par les préparations de surface avec des dépôts métalliques de compositions variées et variables. La diversité des matériaux disponible apporte des solutions mécaniques mais peut induire des risques de dégradation électrochimique importants.

Pour parer au risque corrosion accélérée ou pas par un couplage galvanique la stratégie qui consiste à s'appuyer sur la mise en œuvre d'un revêtement anti-corrosion couplée à une protection cathodique est efficace. La mise en œuvre et le suivi de la protection cathodique ne représente pas un surcoût important et l'acceptabilité par les exploitants est aisée si l'installation s'accompagne de la formation de quelques utilisateurs et d'un suivi annuel pour réaliser des mesures *in-situ*.

Après 3 années, le système a été amélioré avec un e-monitoring associé à un automate pour gérer la séquence de coupure du courant mais également avec un suivi annuel assuré par du personnel spécialisé (personnel certifié ou ayant une activité régulière en protection cathodique au sein des unités d'ingénierie). Ce système d'acquisition/transmission des données est généralisable sur les autres installations hydrauliques du groupe EDF. Ce système permettrait de pouvoir suivre la performance de la protection cathodique sur des sites difficilement accessibles en hiver ou des organes peu visités (vannes de vidange par ex.) et permettrait ainsi de repérer les dérives lentes au sein des mesures et anticiper ou justifier des reports d'opérations de maintenance. Cela nécessitera de changer quelques redresseurs et la plupart des fournisseurs de ces appareils proposent désormais cette option d'e-monitoring avec le respect des protocoles de transmission de données. Le coût associé à cette opération de rénovation des redresseurs est faible.

Le bilan est positif car la structure est protégée sur la quasi-totalité de la surface (cf. Figure 16 à Figure 18) à quelques exceptions spécifiques liées à des complications *géométriques* (cf. Figure 19 et Figure 20). Cette stratégie est répétable sur les autres vannes du barrage désormais. Le retour d'expérience des premières années confirme une durée de vie de l'installation de protection cathodique au-delà de 50 ans.

<p>Figure 16 : rive gauche de la vanne Stoney – bon état et dépôt calcomagnésien protecteur sur les composants</p>	<p>Figure 17 : rive gauche de la vanne Stoney étage 1 caisson 2 - cloquage sur renfort caisson face interne. bon état et dépôt calcomagnésien protecteur sur les zones de défauts de peinture</p>	<p>Figure 18 : rive droite de la vanne Stoney étage 1 caisson 6 – boulonnerie - bon état et dépôt calcomagnésien protecteur sur les composants</p>
<p>Figure 19 : rive gauche de la vanne Stoney étage 3 détail bas de la platine - bon état et dépôt calcomagnésien protecteur sur les composants inclus dans le champ électrique. Apparition de rouille sur les composants masqués du champ électrique par le génie civil ou en aval de la vanne</p>	<p>Figure 20 : rive gauche de la vanne Stoney étage 3 en aval de la platine - Apparition de rouille sur les composants masqués par la vanne</p>	<p>Figure 21 : allure du bordé en acier inoxydable recouvert de dépôt calcomagnésien.</p>

## RÉFÉRENCES ET CITATIONS

### Normes

ASTM G82-98 (réapprouvée en 2021) DÉCEMBRE 2020 « Standard Guide for Development and Use of a Galvanic Series for Predicting Galvanic Corrosion Performance »

NF EN 14505 – « Protection cathodique des structures complexes »

NF EN 12954 – « Protection cathodique des structures métalliques enterrées ou immergées - Principes généraux et application pour les canalisations »

### Rapports internes

H-44202529-2022-000105-A - « Compte-rendu d'intervention de l'inspection des vannes 5 de Pizançon suite à l'installation de la protection cathodique - 13 avril 2022 »

H-44202529-2023-000322 – « Évaluation technique du fonctionnement de la protection cathodique présente sur les vannes des passes 5 et 6 du barrage de Pizançon »

H-44201033-2019-000152-A – « Abaque pour le suivi de la protection cathodique par courant imposé sur les sites bord de mer ou eau saumâtre (CNPE) »

### Bibliographies externes

PCRA 011 – CEFRACOR – « Méthodes de mesures électriques pouvant être effectuées sur les ouvrages dans le domaine de la protection cathodique en complément des standards existants »