Bilan de la protection cathodique des ouvrages du barrage de la Rance

De la conception au résultat final

par M. Lambert

Ingénieur Conseil, Président de la Commission AFNOR
AOSL "Protection électrochimique des métaux"

I ■ INTRODUCTION

Avant d'arriver à l'examen de l'efficacité et de l'intérêt économique de la protection cathodique telle qu'elle a été appliquée aux ouvrages métalliques immergés du barrage marémoteur de la Rance, il nous a paru utile de retracer, du point de vue de la prévention de la corrosion, le parcours effectué depuis la conception de l'ouvrage jusqu'à l'exploitation actuelle avant d'en tirer les conclusions sur l'économie du système et sur son efficacité et les enseignements à tirer de l'expérience pour la construction d'ouvrages similaires.

II ■ HISTORIQUE DES TRAVAUX D'ÉTUDES ET DES ESSAIS

Le professeur Robert Gibrat, à la mémoire duquel nous devons rendre hommage, avait pressenti, dès l'origine du projet d'usine marémotrice, l'importance des phénomènes de corrosion.

Sous son conseil, un "Comité Corrosion" avait été créé en 1955 dans le cadre des activités du Service d'Études pour l'Utilisation des Marées de la Direction des Études et Recherches d'Électricité de France.

Ce comité réunissait les représentants qualifiés des services de l'équipement hydraulique, de la production hydraulique, des laboratoires de la production thermique, des constructeurs et d'un service de Gaz de France, créé en 1947 pour assurer le développement de la lutte contre la corrosion, et dont l'activité était principalement orientée vers l'application de la protection cathodique : le Service Essais et Protection des Ouvrages.

Quatre tâches furent dévolues au Comité Corrosion :

- apprécier la tenue des métaux mis en œuvre,
- fournir des éléments pour le choix des peintures à utiliser,
- évaluer la corrosion et définir, si nécessaire, un système de protection cathodique,
- suivre l'évolution d'un groupe expérimental installé dans une forme de radoub du port de Saint Malo et en tirer les conclusions à appliquer aux 24 groupes du barrage.

Les premières réunions de ce comité Corrosion ont montré que les exploitants des prototypes de groupes réversibles qui avaient fait fonctionner ces groupes avec les eaux pratiquement pures, donc faiblement corrosives, du Massif Central, étaient peu sensibilisés par l'importance des phénomènes de corrosion qu'ils n'avaient pas eu l'occasion de constater.

Par la suite, les essais en laboratoire puis les expérimentations sur un groupe prototype leur ont permis d'estimer l'ampleur des phénomènes de corrosion et la nécessité de s'en protéger.

En ce qui concerne le choix des métaux et alliages, le projet prévoyait des pièces métalliques au contact de l'eau de mer de composition variée :

- acier au carbone pour le bulbe, le bras d'accès et les avant-directrices,
- acier martensitique à durcissement structural pour certaines roues,
- bronze d'aluminium pour d'autres roues,
- acier austénitique plaqué pour la ceinture de roue et le moyeu,
- acier au carbone relié au ferrailage du béton armé pour les anneaux de scellement amont et aval.

Quant à la protection par revêtement elle ne semblait pas pouvoir être retenue seule comme unique moyen d'anticorrosion.

En effet les contraintes d'exploitation des groupes bulbes ne permettaient pas d'appliquer périodiquement un revêtement pour dissimuler les pièces en acier au carbone à l'action agressive de l'eau de mer ; d'autre part le rapport de surface entre les matériaux plus nobles que l'acier au carbone et ce dernier faisait présager une corrosion électrolytique rapide, en l'absence d'un système de protection électrochimique ; il fallait donc considérer le problème de la protection anticorrosion d'un ouvrage polymétallique en eau de mer, dans son ensemble.

III ■ ESSAIS ET MESURES EN LABORATOIRE ET SUR MAQUETTE

De 1955 à 1959, des campagnes d'essais furent effectuées pour répondre aux questions suivantes :

- 1 Quelles sont les intensités générées par l'association des différents métaux en eau de mer ?
- 2 Quel est le comportement des aciers inoxydables et des cupro-aluminiums en fonction de la polarisation cathodique appliquée ?
- 3 Quel est l'emplacement optimal des anodes pour assurer la suppression des couples électrochimiques et éventuellement la protection cathodique ?

Ces essais ont été poursuivis par l'application de la protection cathodique à un groupe expérimental qu'Electricité de France avait fait construire au port de Saint Malo.

3.1 Intensités générées par l'association des différents métaux en eau de mer.

Des essais ont été effectués sur 13 alliages différents, en eau de mer naturelle, à Saint Servan : 196 courbes de polarisation ont été tracées, la vitesse de l'eau de mer étant comprise entre 0 et 5 m.s⁻¹.

L'analyse des résultats montre que l'association des différents alliages entre eux, inox ou bronze, n'ont pas de conséquence dommageable et que les courants de couple sont très faibles.

Par contre leur couplage avec de l'acier au carbone, à surfaces égales, provoque une perte d'épaisseur d'environ 0,8 mm par an en supposant une répartition uniforme du courant, ce qui est une hypothèse d'école optimiste.

3.2 Comportement des aciers inoxydables et des cupro-aluminiums en fonction de la polarisation cathodique appliquée ?

Le problème posé était d'évaluer l'action de la polarisation cathodique sur les réactions électro-chimiques des métaux étudiés dans l'eau de mer.

3.2.1 Cas des aciers inoxydables

La résistance à la corrosion des aciers inoxydables n'est pas une propriété intrinsèque de ces alliages, elle est due à la formation à la surface de l'acier d'une couche de passivation très chargée en oxydes de chrome.

La stabilité de cette couche passive est liée à la présence d'oxygène dans le milieu environnant.

La polarisation cathodique crée des réactions de réduction à la surface du métal ; il n'était donc pas assuré qu'en présence d'une faible polarisation, n'atteignant pas le seuil de protection cathodique, un affaiblissement de la couche passive conduise à une augmentation des phénomènes de corrosion localisée des aciers inoxydables.

Des essais de polarisation de longue durée (six mois) ont été entrepris, en eau de mer naturelle, sous des densités de courant de 40 à 90 000 mA.m⁻².

Ces essais ont montré qu'une faible polarisation cathodique n'avait pas d'influence sur la tenue des aciers inoxydables et que tous les aciers essayés y compris l'acier au

carbone ne présentaient aucune trace d'attaque sous une densité de courant variant entre 150 et 220 mA.m⁻².

3.2.2 Cas des cupro-aluminiums.

Les mêmes essais ont été entrepris sur des éprouvettes en cupro-aluminium : ils ont mis en évidence, pour des densités de courant extrêmes (20 à 90 A.m²) une attaque par désaluminisation de l'alliage.

Dans les cas les plus difficiles de protection cathodique la densité de courant ne dépasse pas 2 à 3 A.m⁻² ; le phénomène de désaluminisation n'a donc pas été pris en compte dans les paramètres influant sur les choix d'alliages et sur la détermination de la protection cathodique.

3.3 Emplacement optimal des anodes

L'emplacement des anodes a été déterminé lors d'essais sur maquette dans les laboratoires de Neyrpic à Grenoble.

Ces anodes ponctuelles ont été insérées dans des tampons isolants d'un diamètre compatible avec les exigences des constructeurs et installées sur le groupe expérimental comme suit :

- 6 anodes sur l'anneau de scellement,
- 4 anodes sur le cône turbine,
- 12 anodes sur le distributeur,
- 8 anodes sur le corps du groupe,
- 6 anodes sur le bulbe amont,
- 4 anodes sur le bras d'accès.

IV ■ ESSAIS ET MESURES SUR LE GROUPE EXPÉRIMENTAL DE SAINT-MALO

La première série d'anodes installées sur le groupe expérimental ayant présenté des défaillances, ce groupe est resté sans protection cathodique pendant une année, le temps nécessaire pour mettre au point un nouveau type d'anodes.

De ce fait, les examens visuels effectués mensuellement ont révélé une forte corrosion généralisée au droit des défauts de revêtement des pièces en acier au carbone et la présence de corrosion localisée par piqûres sur les pièces en acier inoxydables bien que celles-ci aient été polarisées cathodiquement du fait de leur couplage avec l'acier au carbone.

Des mesures fines de potentiel ont été effectuées sur l'ensemble de l'ouvrage avec le concours d'un homme grenouille qui plaçait l'électrode de référence nécessaire pour de telles mesures à des emplacements définis.

Cette défaillance a présenté un aspect positif car elle a permis de fixer une référence de corrosion de l'état du groupe sans puits avec protection cathodique. Les figures 1 à 6 permettent la comparaison, il faut en particulier remarquer la disparition de l'attaque par piqûres sur la ceinture plaquée (figures 3 et 4) et l'arrêt de la corrosion au droit de défauts de fonderie (figures 5 et 6), la densité du courant de polarisation cathodique sur ces défauts étant considérablement plus élevée que sur les parties saines de la pièce il s'en suit la formation d'un épais dépôt calco-magnésien résultant de la transformation en carbonates peu solubles des bi-carbonates présents dans l'eau de mer sous l'action du courant de protection cathodique.

1. Etat des directrices du groupe expérimental avant application de la protection cathodique.

2. Etat des directrices et d'une avant directrice sans protection cathodique.

3. Défaut de fonderie sur pièce moulée en acier 17-4.

4. Défaut de fonderie sur pièce moulée après application de la protection cathodique.

5 Ceinture plaquée du groupe expérimental sans protection cathodique.

6. Ceinture plaquée du groupe expérimental avec protection cathodique.

L'examen de ces clichés pourrait se passer de commentaires, il démontre la totale efficacité de la protection cathodique.

Un mois après la mise en service de la protection cathodique, celle-ci était effective sur l'ensemble du groupe et les marques de corrosion disparaissaient.

V ■ APPLICATION DE LA PROTECTION CATHODIQUE AUX 24 GROUPES BULBES

Compte tenu des résultats des multiples essais effectués sur le groupe expérimental, les dispositions suivantes ont été adoptées :

Pour chaque groupe, équipement de 3 couronnes de 12 anodes sur :

- le manteau de roue côté mer,
- le distributeur,
- l'anneau à tirants (8) et le bras d'accès (4)

soit 864 anodes.

— Installation de 4 électrodes de référence argent-chlorure d'argent pour le contrôle du potentiel de chaque groupe

soit 96 électrodes.

Les asservissements et régulations hydrauliques étant construits et affectés à des tranches de quatre groupes, trois générateurs de courant pour la protection cathodique ont été affectés à quatre groupes en parallèle, soit

- un redresseur pour 4 couronnes d'anodes du manteau de roue,
- un redresseur pour 4 couronnes d'anodes du distributeur,
- un redresseur pour 4 couronnes d'anodes de l'anneau à tirants et du bras d'accès

soit 18 redresseurs.

Caractéristiques nominales des redresseurs : 24 V , 120 A.

A ces redresseurs il faut ajouter un pupitre de 3 redresseurs 24V, 30A qui est utilisé pour repolariser un groupe indépendamment des trois autres faisant partie de la même tranche après vidange.

Les anodes montées à l'origine sont en tantale platiné à 50 μm ; leur durée de vie estimée est à ce jour de 84 ans.

Le choix du métal de base (tantale) et de l'épaisseur de platine (50 μm) était dicté par les considérations suivantes :

— en cas d'avarie mécanique le métal support devait résister à la tension à vide du redresseur (polarisation anodique de 27 V) et maintenir l'étanchéité entre le conduit rempli d'eau de mer et l'intérieur du groupe, pour les anodes situées sur l'anneau à tirants et le bras d'accès.

— une épaisseur de platine de 5 μm aurait pu être considérée comme suffisante en eau de mer statique, mais, en l'absence de données pratiques sur le pouvoir abrasif de l'eau turbinée, un coût plus élevé des anodes a été préféré

à l'absence de protection cathodique due à une usure prématurée de la couche de platine, en portant cette épaisseur à 50 μm . L'expérience confirme qu'une épaisseur de 5 μm est suffisante.

Les figures 7 et 8 représentent une roue avant la mise en eau et la photographie d'une roue après 30 années de service.

La figure 9 montre l'aspect de l'acier au carbone du corps du groupe suite à un départ du revêtement.

La figure 10 est une macrophotographie prise sur le corps du groupe en septembre 1996 démontrant l'absence totale de perte de matière, les passes de tour lors de l'usinage dans les ateliers de Neyrpic à Grenoble, il y a plus de trente ans, sont toujours visibles, intactes !

VI ■ APPLICATION DE LA PROTECTION CATHODIQUE AUX VANNES.

Six vannes wagon de 10 x 15 m ont été implantées au début de la construction sur la rive droite de la Rance, côté Saint Malo en mars 1963.

La protection cathodique n'avait pas été retenue pour les vannes compte tenu, d'une part du soin apporté à l'application d'un système de peinture sélectionné, et d'autre part du caractère quasi monométallique de ces vannes.

7. Roue avant la mise en eau.

8. Roue après trente ans de service.

9. Aspect de l'acier au carbone (corps du groupe) après départ du revêtement.

10. Macrophotographie de la surface d'un groupe : les passes de tour sont toujours visibles.

Jusqu'en mars 1968 on a observé un bon comportement des rails de roulement en acier martensitique 17-4 mais une corrosion très importante des fusées en acier au carbone des galets de roulement. Par ailleurs les têtes des vis assurant la fixation des joints d'étanchéité des vannes se corrodèrent et de ce fait risquaient de présenter de grandes difficultés au démontage lors du changement des joints.

Le tablier n'a pas souffert tant que la peinture était en bon état mais il aurait fallu le repeindre fréquemment pour éviter de notables dégradations.

Vu les bons résultats obtenus par la protection cathodique des groupes, il a été décidé de l'appliquer aux vannes.

Chaque vanne a été équipée :

- de quatre anodes tubulaires en titane platiné à 5 μ m,
2 côté mer (rive droite et rive gauche)
2 côté bassin (rive droite et rive gauche)

soit 24 anodes.

- de deux électrodes de référence argent-chlorure d'argent (côté mer et côté bassin) pour le contrôle du potentiel de chaque face du tablier

soit 12 électrodes.

- de deux redresseurs 24V, 40 A alimentant chaque jeu d'anodes

soit 12 redresseurs.

La protection cathodique est effective même dans les parties hautes qui ne sont immergées que périodiquement, la formation sur l'acier d'un dépôt calco-magnésien basique, résultat de la polarisation électrochimique, assure du fait de son pH élevé une protection temporaire pendant les périodes d'émersion.

VII ■ PROTECTION CATHODIQUE DES OUVRAGES MÉTALLIQUES DE L'ÉCLUSE

De même que pour les vannes, l'application de la protection cathodique n'était pas prévue à l'origine sur les portes d'écluse et les ouvrages annexes (vannes de vidange, grilles).

Pendant la première période, avant mars 1978, sans protection cathodique, de nombreuses attaques par corrosion ont été observées :

- corrosion intense des membrures et des montants tubulaires des vannes de vidange allant jusqu'au percement,
- corrosion des grilles d'acqueducs,
- disparition intégrale des cuves remplies de mercure assurant l'étanchéité des pivots de portes d'écluse ; après réparation le mercure à l'origine du couple électrochimique destructeur de la cuve a été remplacé par un compound lourd ce qui a réglé ce dernier problème.

Après mars 1978 une protection cathodique a été appliquée :

- sur les vannes d'acqueduc au moyen d'anodes galvaniques en zinc
- sur chaque porte d'écluse :
 - pour la protection interne dans le sas au moyen de 6 anodes tubulaires en titane platiné 5 μ m fixées sur le radier (3 côté rive droite et 3 côté rive gauche)
 - pour la protection à l'extérieur du sas au moyen de 2 anodes

soit 16 anodes

- pour le contrôle du potentiel 2 électrodes de référence argent-chlorure d'argent par porte

soit 4 électrodes

- pour chaque porte 1 redresseur 20V, 120A côté sas et 1 redresseur 20V, 40A côté mer ou bassin

soit 4 redresseurs.

Depuis la mise en service de la protection cathodique, l'attaque de l'acier a été supprimée ; les portes ont été déposées et repeintes, à l'occasion d'intervention mécanique sur les pivots, en 1985. L'examen de celles-ci a montré le parfait état des tôles hormis quelques attaques situées en partie basse aux points où l'extrémité inférieure de la porte pivote dans une rainure du seuil en granit, ce seuil constituant un écran qui empêche le courant de protection d'atteindre le métal en cet endroit.

VIII ■ CONTRÔLE ET ENTRETIEN DE LA PROTECTION CATHODIQUE

La protection cathodique étant une méthode active d'anti-corrosion, il convient de s'assurer de son bon fonctionnement et du réglage correct de l'installation.

Le service électrique de l'usine effectue 9 500 mesures de courant, de tension et de potentiel électrochimique par an.

Les contrôles de la protection cathodique des groupes sont :

- bi-hebdomadaires (1 point test sur chaque couronne et sur chaque groupe)
- trimestriels (tous les points de mesures de potentiel ainsi que le courant de chaque anode)
- semestriel pour les redresseurs.

Depuis 1988 le calculateur mis en place pour la conduite des groupes a pris en charge une partie des 9 500 mesures.

Dans ces conditions le nombre d'heures de maintenance de la protection cathodique est de 750 h/an.

Le service mécanique effectue 2 contrôles semestriels des anodes galvaniques de l'écluse et procède à leur remplacement éventuel, le temps consacré à cette tâche est de 64 h/an.

Le contrôle et le changement des anodes et des électrodes de référence défectueuses (5 à 10 par an) est effectué par le service exploitation et occupe 60 h/an.

Le temps total consacré à la maintenance de la protection cathodique est de 874 h/an soit 0,6 agent par an.

Depuis la mise en place, une douzaine d'anodes ont perdu leur disque de tantale platiné ; deux anodes tubulaires placées dans les vannes ont été tordues par choc avec un corps étranger ; quelques électrodes de référence placées sur les groupes sont remplacées. Le problème le plus important a été la fissuration de l'isolant des tampons anode d'origine. Cette fissuration était liée aux conditions de moulage des dites anodes et aux contraintes résiduelles dans l'isolant. Le cahier des charges de fabrication de ces pièces a été modifié et les pièces nouvelles ne présentent plus ce défaut.

IX ■ ASPECT ÉCONOMIQUE DE LA PROTECTION CATHODIQUE DES OUVRAGES DU BARRAGE MARÉMOTEUR DE LA RANCE

9.1 Investissements

Les dépenses d'investissement de la protection cathodique représentent 1,3 % du matériel électromécanique soit environ 24 MF (en francs 1995).

En l'absence de protection cathodique, une réfection triennale de la peinture des groupes aurait été nécessaire a minima, ce qui correspond à une dépense annuelle de 2,65 MF par an.

A cette dépense devrait s'ajouter la perte de production due à l'indisponibilité des groupes soit environ 2,6 MF.

Le temps de retour de l'investissement est donc de 4,6 ans, ce qui est très favorable.

Ce temps serait encore plus court si l'on devait prendre en compte le rechargement de pièces corrodées du fait des couples électrochimiques importants entre les différentes parties du groupe.

9.2 Exploitation

La puissance électrique nécessaire pour l'alimentation des installations de protection cathodique est de 20 kW soit une consommation annuelle de 150 000 kWh.

Le coût d'exploitation ressort à :

- consommation d'énergie 150 000 kWh à 0,20 F : 30 000 F
- main d'œuvre 0,6 agent/an : 200 000 F
- fournitures (anodes, électrodes de référence etc.) : 24 000 F
- soit un total de : 254 000 F

Avec une production annuelle brute de 600 000 000 kWh, le coût de la protection cathodique revient à : 0,04 c/kWh

Mais l'économie des frais d'entretien s'élève à : 0,87 c/kWh

La protection cathodique assure donc une réduction de 4,1% du prix de l'énergie fournie par le barrage de la Rance.

X ■ CONCLUSIONS

L'application de la protection cathodique après des études poussées et des essais expérimentaux a supprimé de manière très efficace les phénomènes de corrosion habituellement constatés en milieu marin.

La parfaite tenue à la corrosion, dans ces conditions, de l'acier au carbone comme d'ailleurs de l'ensemble des métaux et alliages, conduit à préconiser pour des installations futures de groupes marémoteurs un choix de métaux identique à celui effectué pour les groupes au fil de l'eau et donc à remplacer l'acier martensitique des directrices et du cône turbine par de l'acier au carbone avec les économies qui s'en suivent.

Les conclusions de l'analyse effectuée, après 5 années de fonctionnement, par Monsieur Marolleau, responsable de l'exploitation de l'usine de la Rance en 1971, restent toujours valables :

" On peut dire que la protection cathodique joue un rôle essentiel dans la bonne marche de l'Usine Marémotrice, protégeant efficacement l'acier au carbone et supprimant les phénomènes de «pitting» constatés en eau de mer sur certains aciers inoxydables d'un ensemble de quelque 12 000 tonnes immergé dans l'eau de mer.

Cette protection permet d'espacer sensiblement ("et même de supprimer", note de l'auteur) les reprises des revêtements de peinture, ce qui contribue à la réduction des indisponibilités de machines et se traduit par un gain d'énergie produite par l'usine Marémotrice de la Rance."