

# Bilan de la protection cathodique à l'usine marémotrice de la Rance

par R. Legrand et M. Lambert

Gaz de France : Direction Production-Transport  
Département Essais et Protection des Ouvrages.

*Cet exposé analyse le fonctionnement de la protection cathodique, la tenue du matériel et l'incidence de la polarisation sur les matériaux immergés. Il compare les résultats obtenus en exploitation aux prévisions établies lors du projet de l'Usine Marémotrice et explicite certaines particularités technologiques.*

\*\*

Lors de l'exposé que nous avons eu l'honneur de présenter devant les membres de votre Société, le 17 novembre 1961, nous avons particulièrement insisté sur les essais expérimentaux qui nous conduisaient à préconiser la protection cathodique. Nous allons, aujourd'hui, parler brièvement de l'aspect technologique de cette protection, puis nous examinerons les résultats des mesures effectuées, les constatations faites *in situ*, l'évolution :

- des métaux soumis à la polarisation;
- des anodes;
- et des électrodes mises au point spécialement pour la Rance et utilisées depuis plus de cinq ans.

M. Faral vous a indiqué, précédemment, que les résultats favorables, observés sur les premiers groupes immergés, protégés cathodiquement, conjointement à l'insuffisance de la protection passive apportée par la peinture, ont incité E.D.F. à étendre ce système de protection électrochimique à l'ensemble des ouvrages métalliques immergés : vannes, puis portes d'écluses et vannes d'acqueducs.

Avant d'aborder le sujet proprement dit de cet exposé, et m'adressant à des physiciens, je voudrais appeler leur attention sur le contraste qu'il peut y avoir entre le niveau des grandeurs électriques utilisées par les électriciens d'un côté et les électrochimistes de l'autre. Si nos collègues parlent

de kilovolts et de mégawatts, le spécialiste d'anticorrosion parlera de volts, le plus souvent de millivolts et de fractions d'ampères.

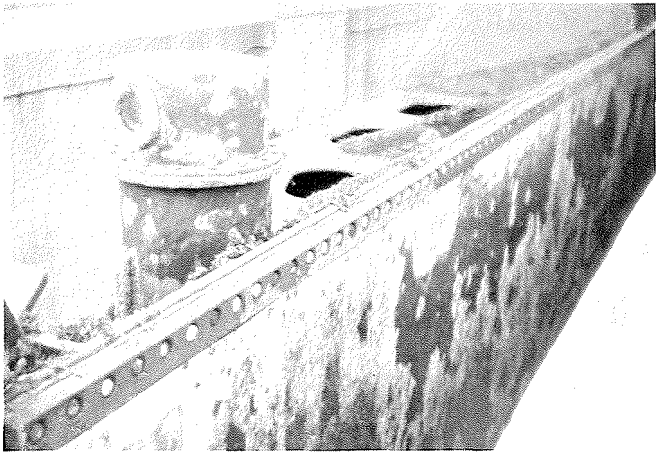
*A priori*, nous pouvons être étonnés des effets notables obtenus à partir des puissances aussi faibles; mais il faut observer que ces puissances minimales sont mises en jeu dans des champs électriques considérables. En effet, les tensions mesurées par l'électrochimiste prennent naissance à l'interface métal-électrolyte et la distance séparant les charges positives des charges négatives est de l'ordre de l'épaisseur d'une couche moléculaire. Les forces d'extraction ou de dépôt des ions s'exercent, alors, dans un champ électrique d'un mégavolt par centimètre.

Ceci est d'ailleurs confirmé par les mesures d'impédance d'électrodes qui conduisent à attribuer au métal plongé dans un électrolyte une propriété capacitive de quelques 20 à 50  $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ ; un calcul simple en déduit une épaisseur de diélectrique de  $10^{-6}$  mm auquel correspond le champ électrique précité.

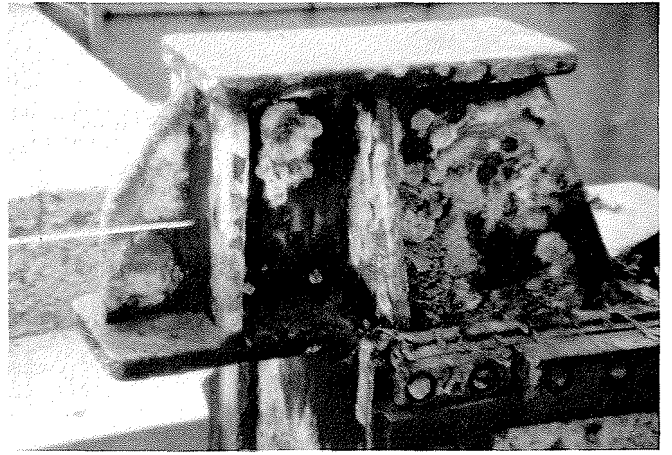
Ceci dit, rappelons la technologie de la protection cathodique retenue pour la Rance.

## Technologie de la protection cathodique

La polarisation y est obtenue à partir de redresseurs à diodes classiques, alors que les anodes, destinées à évacuer le courant dans l'eau de mer, présentaient des particularités inhérentes aux servitudes imposées par les groupes bulbes.



1/



2/



3/



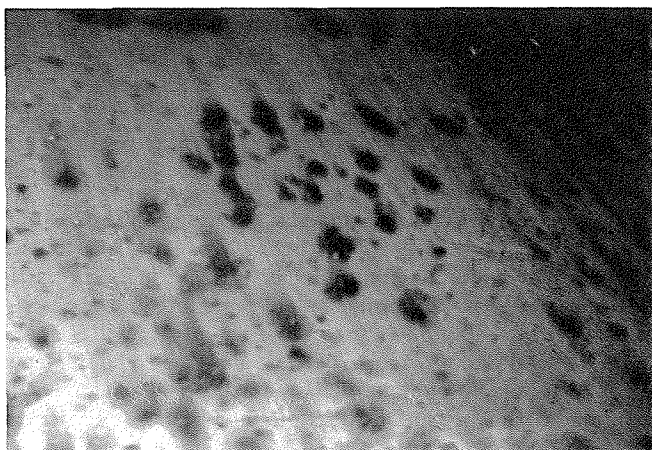
4/



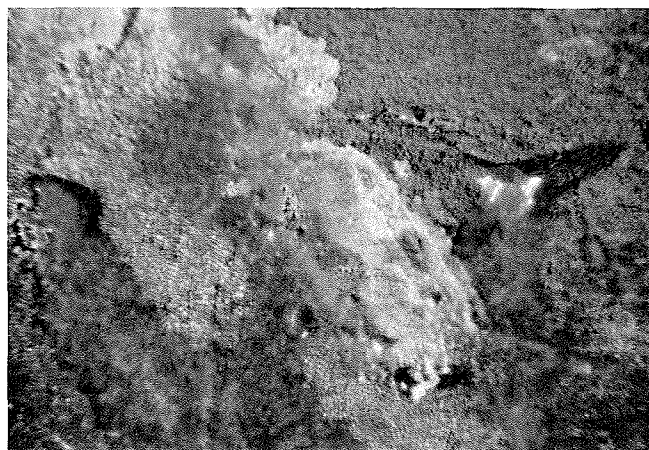
5/



6/



7/



8/

Ces anodes devaient être construites en tenant compte des impératifs suivants :

- en premier lieu, s'intégrer dans la paroi du groupe sans en modifier le profil hydraulique et en réduisant au maximum la dimension des pièces à loger dans le conduit et dans le bulbe;
- en second lieu, assurer une étanchéité en toutes circonstances; certaines anodes étant placées à proximité immédiate de l'alternateur, aucune fuite ne pouvait être admise;
- par ailleurs, avoir une tenue suffisante, pour éviter les interventions lors de l'exploitation.

Ces critères, associés aux résultats d'essais effectués dans notre laboratoire, ont donné naissance à des anodes de forme cylindrique encastrées dans des cuvettes soudées sur le manteau de roue, le bulbe et l'anneau extérieur du distributeur.

Le dégagement de chlore et d'ozone résultant de l'électrolyse anodique de l'eau de mer, nous imposait de prévoir, pour les anodes, un métal provenant de la mine du platine. Toutefois, étant donné le prix très élevé de ces métaux (450 F le  $\text{cm}^3$  de platine à ce jour), il fallait utiliser un subjectile différent, afin de réduire le poids de platine.

Nous avons pensé utiliser le titane; les anodes en titane platiné commençaient alors à apparaître sur le marché, elles présentaient la propriété de ne pas se détériorer sous l'action de tensions inférieures à + 10 V, ce qui était le cas en exploitation courante. Toutefois, si le platine recouvrant la surface de titane venait à disparaître, par usure ou défaut d'adhérence, le courant débité par l'anode diminuait et, la résistance électrique de l'anode augmentant, une tension dangereuse risquait d'apparaître, provoquant la destruction quasi instantanée de la pièce et, corrélativement, une fuite à l'intérieur du bulbe. Aussi, avons-nous choisi de réaliser les anodes en tantale platiné; le tantale ayant la propriété de se recouvrir, même en eau de mer, d'une couche d'oxyde dont la rigidité diélectrique dépasse 100 V, tension bien supérieure à la tension de crête des redresseurs utilisés pour la polarisation.

En l'absence d'informations précises sur le pouvoir abrasif de l'eau turbinée sur les bulbes et de l'usure prévisible du platine, nous avons fait recouvrir les disques de tantale

d'une couche de platine plâqué de 50  $\mu$ . Dans un but expérimental, nous avons fait exécuter vingt anodes avec revêtement électrolytique de 5  $\mu$ .

Les électrodes de référence étaient du type Argent/Chlorure d'Argent; chaque groupe étant équipé de trois électrodes placées aux points où la protection serait la plus faible : sur la calotte, sur l'avant distributeur et sur le manteau de roue, au voisinage du plan des pales.

Les vannes et les portes d'écluses n'étant pas soumises aux impératifs d'étanchéité et de tenue du métal supportant le platine, en cas d'usure de ce dernier, ont été protégées au moyen d'anodes tubulaires en titane platiné électrolytiquement.

Chaque groupe comporte 3 couronnes de 12 anodes :

- une couronne sur le manteau de roue côté mer;
- une couronne sur le distributeur;
- une couronne sur l'anneau à tirants et le bras d'accès.

Par souci d'homogénéité avec les dispositions prises pour les commandes des groupes, les redresseurs alimentent quatre groupes en parallèle. Chaque tranche de quatre groupes est donc équipée de trois redresseurs à réglage manuel par autotransformateur annulaire (un pour chaque couronne d'anodes).

Chaque anode était alimentée par un fil distinct, partant d'un bornier, permettant un contrôle individuel de son débit.

## Exploitation de la protection cathodique

La correction de l'intensité, effectuée lors du contrôle mensuel du potentiel, permet de maintenir les potentiels entre métal et eau de mer à une valeur comprise entre — 1 100 et — 850 mV Ag/Cl Ag.

A l'heure actuelle, la protection des bulbes est assurée avec une intensité totale moyenne de 44 A par groupe, sous une densité de courant de  $170 \text{ mA/m}^2 \pm 15 \%$ . Ceci confirme les essais effectués antérieurement à Saint-Malo, l'influence de la vitesse de l'eau de mer sur la dépolarisation est annulée par la formation d'un dépôt calco-magnésien, formé sous l'action de la polarisation cathodique.

Bien que la différence de résistance ohmique des câbles, alimentant les anodes des quatre différents groupes de chaque tranche, soit compensée, la répartition du courant est délicate à ajuster. En effet, l'expérience montre que le potentiel des groupes n'évolue pas de manière strictement identique. Il est alors nécessaire de jouer sur les résistances d'équilibrage de la filerie pour ajuster le courant en fonction de la polarisation individuelle des groupes.

Le contrôle de l'intensité, débitée par chaque anode, permet de s'assurer de leur bon fonctionnement et de leur tenue. Depuis la mise en service du barrage, la mise hors service d'une dizaine d'anodes, sur un total de 864 pièces en service, a ainsi été détectée. Dans tous les cas, il s'agissait d'une rupture du disque de tantale résultant, soit d'un défaut de soudure, soit d'un choc avec un corps étranger.

Le plaquage de platine n'a présenté, à ce jour, aucune défaillance. Nous avons tenté de procéder à une évaluation de la durée de vie de ce dépôt comme nous l'indiquons ci-après.

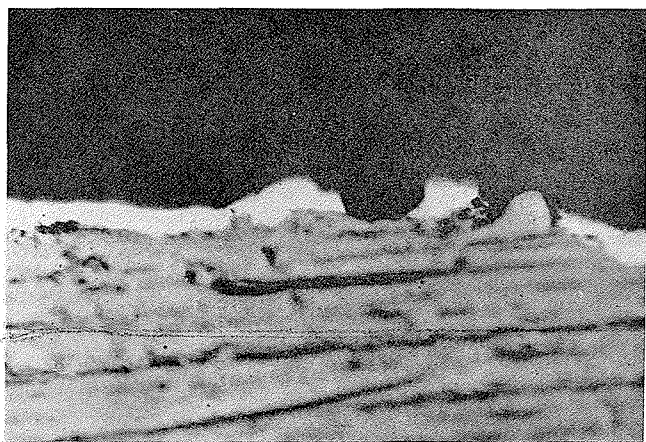
La protection des vannes est assurée sous des intensités qui, fonction de l'état du revêtement de peinture, s'étagent entre 4 et 61 A.

Ces vannes, à l'origine, étaient isolées électriquement du béton armé et des rails de roulement et galets en acier inoxydable. Les fusées, portant ces galets, étant l'objet d'une corrosion intense, nous avons pensé que la bonne qualité du béton armé, gage d'une faible densité de courant sur les armatures, nous permettrait d'espérer, dans ce domaine, un appel supplémentaire de courant assez faible, si l'on supprimait l'isolement entre le tablier des vannes et les rails de guidage, et ferait disparaître l'attaque des fusées.

L'expérience a confirmé notre propos et l'ensemble des rails et galets a été protégé en augmentant le débit des redresseurs des vannes, sans installations supplémentaires.

La figure 1 vous donne l'aspect d'une vanne au revêtement particulièrement dégradé. Vous pouvez observer le dépôt calco-magnésien blanchâtre qui a pris la place de la peinture. Avantage secondaire de ce dépôt basique, il supprime l'oxydation dans les filets des vis maintenant les étanchéités des vannes, qui ne présentent plus de difficultés de démontage.

Le cliché 2 représente la partie haute du tablier, celle-ci est soumise à l'effet très agressif du marnage.



9/

Vous remarquerez, sur la photographie 3 prise au même endroit, après avoir retiré le dépôt calco-magnésien que vous pouviez observer précédemment, que le métal ne porte aucune trace d'oxydation. La photo n° 4, prise au même endroit 92 jours plus tard, montre la parfaite tenue de l'acier. Il en est de même dans les groupes.

Figure 5 : à droite, anneau de scellement (acier au carbone); à gauche, manteau de roue en acier 18-11-3.

Figure 6 : distributeur en acier 17-4-1.

Figure 7 : pour mémoire, aspect de la ceinture moulée du groupe expérimental de Saint-Malo sans protection cathodique (acier 17-4).

Figure 8 : aspect du bulbe (acier au carbone). La partie photographiée est dépourvue de revêtement. Le dépôt calco-magnésien a pris une teinte beige sous l'influence des impuretés de l'eau de mer. La partie centrale dépourvue de dépôt (à l'échelle macroscopique), laisse apparaître l'acier dans sa teinte grisâtre d'origine (cette photo, comme les précédentes, fut prise après quarante mille heures d'immersion).

## Comportement des anodes et des électrodes

Deux anodes, revêtues électrolytiquement de  $5\mu$  de platine, ont été prélevées afin de déterminer l'usure du platine, consécutif à quarante mille heures de fonctionnement.

Une analyse quantitative du platine d'une anode a fait apparaître une épaisseur résiduelle moyenne de platine de  $3,7\mu$ , soit une perte de poids de 70 mg, correspondant à un taux de dissolution anodique de  $5,8\mu\text{g}/\text{Ah}$  et à une durée de vie prévisible de dix-sept ans.

La seconde anode a été tronçonnée et polie pour examen micrographique.

La photographie 9 donne l'aspect partiel d'une coupe effectuée au voisinage d'un plan diamétral.

L'examen de la totalité de la coupe montre que l'épaisseur de platine varie entre 1 et  $5\mu$  et qu'il subsiste sur 89 % du trajet examiné.

Au vu des micrographies, il y a lieu de penser que les actions mécaniques d'abrasion sont prépondérantes par rapport à la dissolution anodique, celle-ci se produisant uniformément.

La tenue du support isolant, réalisé en polyéthylène à haut poids moléculaire, donne lieu à deux séries de remarques : les produits de l'électrolyse agissent lors des périodes d'arrêt de la machine et donnent naissance à des pustules dans la partie du tampon porte-anode léchée par le chlore et l'ozone. Apparues après trois années de fonctionnement, ces pustules évoluent peu et ne semblent pas mettre en cause la durée de vie des tampons.

Par contre, on a observé depuis juin 1972, des fissures du polyéthylène; ces fissures résulteraient de contraintes thermiques. Des essais vont être entrepris, sur des tampons stockés en magasin et des tampons ayant servi, afin de déterminer l'origine de ces contraintes.

Par ailleurs, le chlore léchant le groupe, lorsque l'eau est immobile, dégrade la peinture au voisinage des anodes. L'acier, fortement protégé à cet endroit, n'est pas attaqué, sauf à la limite du tampon quand, du fait de l'inclinaison de ce dernier, le chlore peut s'accumuler sous forme de bulle. L'attaque chimique par le chlore forme, alors, une

cavité d'environ 2 à 3 cm<sup>3</sup>. Ces cavités ont été obturées au moyen d'un mastic araldite.

Les anodes tubulaires, destinées aux vannes, ont été placées en partie basse à 1,5 m du radier et protégées par un berceau en cupro-aluminium épais. Quelques-unes ont été tordues au passage d'un corps étranger.

Les électrodes au chlorure d'argent ont été placées à poste fixe sur les groupes. Afin de réduire les erreurs de mesure par suite du développement de microorganismes sur la surface de l'électrode, nous avons placé le fil d'argent chloruré dans un tube rempli de chlorure d'argent, faisant office de filtre, et communiquant avec l'eau de mer par une pièce de verre fritté.

Cette disposition a donné satisfaction puisque, sur une centaine d'électrodes en service depuis sept ans, seules dix pièces ont dû être changées par suite de détérioration mécanique.

### Influence de la polarisation sur les matériaux immergés

Il peut être utile de rappeler, ici, les craintes que pouvait faire naître la protection cathodique à l'origine du projet de la Rance et de les confronter à l'expérience *in situ*.

Vis à vis des aciers inoxydables, on pouvait craindre que la polarisation cathodique, agissant comme un réducteur, ne détruise la couche de passivité avant d'assurer l'immunité du métal, en provoquant une aggravation de la corrosion.

Cette crainte, confirmée par les essais sur éprouvettes en acier à 13 % Cr, 1 % Ni, avait montré que ce phénomène était limité aux très faibles densités de courant (40 mA/m<sup>2</sup>) pour les aciers plus riches en nickel et en chrome.

De fait, aucune altération, s'apparentant au *pitting* ou à la corrosion généralisée, n'est perceptible, tant sur les pales que sur la ceinture et le distributeur.

Quant à la fragilisation, nous n'avons pas observé de fissures, même sur les pièces les plus sollicitées (collet de pales par exemple).

— Vis à vis des *bronzes*, on redoutait l'influence caustifiante de la polarisation, provoquant une désaluminisation des cupro-aluminiums. Sur éprouvette, celle-ci apparaissait sous très forte densité (20 A/m<sup>2</sup>) pour le bronze choisi par E.D.F.

Les roues en cupro-aluminium, récemment examinées, laissent apparaître un léger voile rougeâtre; ce voile apparaît seulement à l'observateur proche de la pièce.

— Vis à vis des *peintures*, le phénomène de cloquage pouvait être accéléré par la polarisation. Les essais de laboratoire avaient montré que cette accélération se manifestait particulièrement au-dessous de — 1 200 mV.

Les ouvrages protégés sont maintenus entre — 850 et — 1 100 mV, et l'examen de l'évolution du revêtement de peinture des vannes, avant la mise en service de la protection cathodique, ne permet pas de conclure à une influence majeure de la polarisation sur le développement des cloques, sauf au voisinage des anodes.

Bien que ne disposant pas d'ensemble non protégé pour porter un jugement comparatif, la tenue de la peinture sur les groupes protégés dès la première heure d'immersion, n'a pas été inférieure à celle des vannes qui n'étaient pas polarisées.

Il faut signaler le grand intérêt que l'on a trouvé à peindre les groupes bulbes avant leur première immersion. En effet, la polarisation des aciers inoxydables et des bronzes, non revêtus de dépôt calco-magnésien dans l'eau de mer agitée, nécessite une densité de courant trois à quatre fois plus élevée qu'en eau de mer calme, soit 600 à 1 200 mA/m<sup>2</sup>. Nous avons vu précédemment, qu'après formation du dépôt calco-magnésien, cette densité est de l'ordre de 170 mA/m<sup>2</sup>.

En l'absence d'une première peinture, il aurait été nécessaire de dimensionner excessivement l'installation, alors que sa présence a permis la formation du dépôt calcaire, au fur et à mesure de la disparition de la peinture.

A l'heure actuelle, on peut dire que l'ensemble des pièces en cupro-aluminium et en acier inoxydable, manteau de roue, pales et distributeur, est dépourvu de revêtement.

Les avant-directrices, en acier au carbone, possèdent encore 40 à 50 % de leur surface revêtue et le bulbe proprement dit, 70 % environ.

— Vis à vis des *bétons*, certains auteurs avaient signalé des gonflements au niveau des armatures, avec éclatement du béton. La qualité des liants hydrauliques mis en œuvre, et le soin apporté lors de la coulée, ont été le garant d'une parfaite tenue dans ce domaine.

Avant de conclure, signalons que l'application de la protection cathodique a représenté un investissement supplémentaire de 1,3 % du coût de l'électromécanique et une consommation d'énergie de 10 kW au total pour l'ensemble des ouvrages.

### Conclusion

L'examen des ouvrages protégés cathodiquement, et les résultats des mesures faites pendant plus de six années, apportent une confirmation des choix opérés lors de la rédaction du projet de la Rance.

En effet, les expériences de laboratoire, destinées à fixer la densité minimale de protection, sont confirmées par la pratique.

La tenue des métaux soumis à la polarisation est excellente.

Le titane platiné à 5 μ résiste suffisamment pour la protection des vannes, hormis les dégradations par chocs résultant de l'installation en saillie des supports d'anodes.

Aussi, pouvons-nous recommander de prévoir *a priori*, la protection cathodique des ouvrages en eau de mer, les dispositions à mettre en œuvre : passage de câble, niche pour le logement des anodes sont peu coûteuses lors de l'installation; par contre, leur réalisation, en reprise, est parfois délicate et onéreuse (emploi d'hommes-grenouilles).

Les phénomènes d'usure par abrasion sur les bulbes sont faibles et l'épaisseur de platine plaqué pourrait, sans inconvénient, être réduite au tiers de sa valeur actuelle.

Les conditions d'injection de matière plastique, autour des tampons porte-anodes, devraient être modifiées afin d'éviter la fissuration ultérieure de polyéthylène.

Si un projet de protection électrochimique de groupe bulbe devait voir le jour maintenant, nous pouvons dire, qu'à la lumière des enseignements apportés par l'exploitation de l'Usine Marémotrice, la définition des moyens à mettre en œuvre, pour assurer la protection cathodique, serait peu différente de celle qui a été retenue pour la Rance.

Toutefois, nous pouvons affirmer que l'on tirerait une économie conséquente à substituer l'acier au carbone à l'acier 17-4 au molybdène pour la construction du distributeur.

Une autre économie, moins importante celle-là, pourrait être obtenue en reportant les anodes du manteau de roue et du bulbe dans le conduit béton. Par contre, nous pensons qu'une alimentation individuelle de chaque couronne d'anodes par redresseur séparé, faciliterait les opérations de réglage du courant de polarisation, en particulier dans les périodes suivant la remise en eau des bulbes après les opérations d'entretien.

Nous nous en voudrions de nous décerner un brevet d'autosatisfaction, les bons résultats obtenus étant dus, en majeure partie, à la préparation soigneuse et aux nombreux essais qu'Electricité de France a consacrés au projet de la

Rance, et aux excellentes relations de travail qui se sont développées entre tous les intéressés, tant au stade des études qu'à celui de la réalisation ou de l'exploitation.

Aussi, nous nous permettons de reprendre la conclusion d'une note interne rédigée par M. Marolleau, Chef de l'Usine de la Rance de 1966 à 1972 :

« Après cinq années d'exploitation, 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 d'attaques par piqûres, constatées sur certains aciers inoxydables d'un ensemble de quelques 12 000 t immergées dans l'eau de mer. Cette protection permet d'espacer sensiblement les reprises des revêtements de peinture, ce qui contribue à la réduction des indisponibilités des machines et se traduit par un gain d'énergie produite par l'Usine Marémotrice de la Rance. »

## Discussion

Président : M. P. CABANIOLS

M. le Président remercie M. LAMBERT et ouvre la discussion.

Pour la protection cathodique des groupes bulbes de la Rance, observe M. AUROY, l'emploi d'anodes pratiquement inconsommables avec injection de courant s'imposait. Mais pour de grandes surfaces, par exemple dans le cas de grandes vannes, ne pourrait-on se contenter d'anodes consommables, sans injection de courant, utilisant simplement l'effet de pile ?

M. LAMBERT pense que pour les vannes de la Rance par exemple, avec un revêtement meilleur que celui qui existe à l'heure actuelle (peintures époxy très bien appliquées), on pourrait obtenir des intensités de courant relativement faibles qui ne justifieraient pas l'installation d'une protection cathodique avec anodes en titane platiné.

L'étude économique montrerait peut-être qu'il est préférable d'employer des anodes consommables. Cela dépend des cas d'espèces.

Le zinc, métal peu coûteux, est utilisé pour la constitution des anodes consommables; compte tenu des intensités de courant en jeu, il faudrait immobiliser, à cet effet, pour les vannes de la Rance, quelques dizaines de tonnes de zinc à renouveler périodiquement.

Sur une question de M. AUROY, M. LAMBERT indique que les anodes en titane platiné, utilisées à la Rance, sont pratiquement « inconsommables ». Pour une épaisseur de platine de 50  $\mu$ , leur durée de vie est « plus proche du siècle que de dix ans ».

M. le Président remercie M. LAMBERT.