CORROSION ET PROTECTION CATHODIQUE

ASPECTS TECHNICO-ECONOMIQUES

1. Introduction

2. Perte de métal

3. Moyens de prévention

4. Protection cathodique

5. Etude et contrôles de protection cathodique

1. Introduction:

Toute construction métallique qui est enterrée, immergée et même bétonnée subit inévitablement les phénomènes de corrosion électrochimique dès sa mise en contact avec un électrolyte. Sauf précaution volontaire lorsqu'il est neuf, leur action demeure dissimulée mais impose une dégradation plus ou moins rapide de l'ouvrage.

L'observateur ne peut pas manquer de le constater sur des poteaux en béton où le ferraillage est mis à nu, sur des rideaux de quai ou des pieux dans les ports lorsque la mer se retire et aussi sur des conduites lors d'excavation. Ce dégradé de couleurs allant de l'ocre, passant par le rouge au brun foncé n'est que la manifestation d'une oxydation associée à une perte de métal qui entraîne à terme:

- la non conformité aux normes techniques
- une tenue mécanique inférieure à celle définie par calculs
- un risque de fuite (canalisations, réservoirs) ou de déformation (appontements, murs de soutènement)
- un incident grave (pollution, explosion, affaissement, effondrement)
- une réhabilitation coûteuse

La protection cathodique appliquée dès l'origine constitue le moyen économique et efficace de soustraire l'ouvrage de ces phénomènes, ainsi d'assurer sa pérennité et sa sécurité.

2. Perte de métal:

L'ouvrage métallique au contact d'un électrolyte prend spontanément un état électrique qui n'est ni constant ni uniforme même si le milieu est apparemment homogène. Les mesures, lorsqu'elles sont possibles, montrent en effet des variations d'un point à un autre bien que la continuité électrique devrait procurer l'équipotentialité.

En fait la surface ou la nature irrégulière de l'ouvrage, un contact avec l'électrolyte plus ou moins intime, un électrolyte plus ou moins humide et variable font, entre autres facteurs, qu'il n'en est rien. La surface exposée présente une succession de zones dont la polarité, les unes par rapport aux autres, est positive (cathode) ou négative (anode) et auxquelles elle sert de shunt. Des échanges de courant continu s'instaurent à travers ces piles naturelles plus ou moins intenses selon :

-que l'ouvrage est nu (majorité des structures immergées), revêtu (majorité des conduites), mixte (nu et revêtu) ou composé de matériaux différents (couple galvanique) ;
-que l'électrolyte est plus ou moins conducteur (résistivité), oxygéné (O2 dissous), composé (chlorures, sulfures), habité (bactéries) et électriquement instable (influence de source continue externe).

Les zones anodiques sont le siège d'une consommation de métal plus ou moins importante selon sa nature et l'intensité du courant.

Pour l'acier, la consommation massique est de 9 à 10 kg/A.an (Loi de Faraday) soit un volume de 1 270 cm3/A.an. Ainsi un courant continu de 10^{-4}A (100 µA) sortant d'une surface de 10 cm^2 entraîne une perte d'épaisseur de 0,127 mm/an. Une canalisation de gaz en tubes acier de 9,3 mm enterrée, prévue pour fonctionner à la pression de 80 bar pendant 30 ans, dont l'épaisseur minimale est de 8,7 mm selon la norme et 6,35 mm selon les calculs, serait ainsi:

-déclarée non conforme à la norme après 4,7 ans
-en deçà de la tenue mécanique requise après 23,2 ans
-avec une épaisseur résiduelle de 3,81 mm à 30 ans

pour un seul point.

Cette dégradation, rarement unique, affecte généralement 0,1 à 20 % de la surface exposée en fonction de la durée, est d'autant plus forte que le rapport des surfaces cathode/anode est grand et que le résistance de contact de l'anode est faible (résistivité de l'électrolyte), s'accélère sous l'influence de source continue externe (entrée/sortie de courants empruntant l'ouvrage).

Cette dissolution de métal a d'évidentes répercutions techniques et économiques, les désordres engendrés entraînant un coût important (100 KF à plusieurs MF) auquel peuvent s'ajouter une perte d'exploitation liée à l'arrêt de l'ouvrage et des dommages causés à des tiers.

3. Moyens de prévention:

La prévention des risques techniques et économiques fait normalement l'objet d'une étude avant réalisation et, selon le type d'ouvrage, d'un réactualisation pendant l'exploitation. Soustraire un ouvrage métallique enterré, immergé ou bétonné de la corrosion s'intègre dans cette démarche d'autant plus que la durée de vie prévue représente plusieurs décennies.

La protection cathodique, technique souvent considérée banale par une simplicité toute apparente, utilise le courant continu pour stopper la corrosion dès sa mise en service tant sur un ouvrage neuf qu'ancien et son application correcte a fait ses preuves depuis plus de 50 ans.

Elle est la seule technique offrant une réelle garantie à long terme:

-ajustable dans le temps en fonction de l'évolution des caractéristiques de l'ouvrage et de l'environnement
-efficacité mesurable à tout moment par des moyens appropriés
-renouvelable dans le temps

pour un investissement et un coût d'exploitation minimes comparés à ceux de l'ouvrage, d'un incident majeur et d'un déclassement des conditions opératoires.

La sur-épaisseur de corrosion, souvent recommandée pour des structures nues, suppose en effet que la totalité de la surface soit affectée par la corrosion, ce qui n'est jamais le cas même si l'électrolyte apparaît homogène (eau de mer, plage, rivière, lac...) et que les échanges de courant soient constants pendant toute la durée de vie. Il est vrai que des essais et des mesures in situ ont conduit à des valeurs de perte d'épaisseur. Cependant elles témoignent d'une corrosion ponctuelle dans des conditions définies et sont moyennes.
Ce n'est qu'un palliatif impliquant toutefois un surcoût important tant sur le plan de la fourniture (7,85 kg d'acier par m2 pour 1mm supplémentaire, soit environ 30 à 35 F/m2.mm), que de la mise en oeuvre (moyens de transport, de manutention et d'installation). Par ailleurs la durée de vie présidant la conception de l'ouvrage est rarement sa durée réelle.

Isoler la surface exposée de l'électrolyte par un revêtement ou une peinture ne constitue qu'une protection passive réduisant globalement le risque sans le supprimer :

-la porosité et l'absorption d'eau ne procurent pas une résistance de contact avec l'électrolyte infinie ce qui permet le passage d'un courant même très faible ;
-les propriétés mécaniques et diélectriques se réduisent dans le temps (vieillissement) ;
-des blessures existent dès l'origine (le contrôle au balai électrique est effectué avant mise en place ou remblaiement) ;
-des mises à nu se génèrent au fil des années sous l'effet conjugué de contraintes thermiques (nappes et saisons), chimiques (composition de l'électrolyte) et mécaniques (vibrations et dilatation de l'ouvrage, pression ou abrasion de l'électrolyte, racines).

Il peut même l'accentuer, en l'absence de protection cathodique, en raison d'un plus fort déséquilibre entre zones anodiques (surfaces nues) et cathodiques (surface revêtue). Le seul avantage important d'une telle protection est de rendre la protection cathodique de l'ouvrage moins puissante et de plus grande portée (prises en compte des seules surfaces nues) en réduisant de 3 à 10 l'investissement initial (moins d'équipements de caractéristiques plus faibles) et le coût d'exploitation (dépenses d'énergie, maintenance).

Les autres procédés tels que le choix de matériaux et le traitement de surface (anodisation, passivation, galvanisation) sont plutôt destinés à une protection interne ou contre la corrosion atmosphérique.

4. Protection cathodique:

La protection cathodique doit fonctionner pendant la durée de vie de l'ouvrage et maintenir la totalité de la surface exposée à l'électrolyte au delà d'un seuil d'immunité dépendant de la nature du métal. Par ailleurs le niveau de potentiel doit demeurer en deçà d'une limite pour éviter une dégradation des propriétés mécaniques (fragilisation par l'hydrogène d'un acier à haute résistance) ou du revêtement (décollement/alcalinisation).

L'analyse préalable des paramètres de l'électrolyte et de l'ouvrage est essentielle pour sa conception.

La sélection entre systèmes par anodes galvaniques et courant imposé s'opère à partir de critères technico-économiques:

-techniques: besoins en courant, durée de vie, nature et conductivité de l'électrolyte, types et configuration de l'ouvrage, présence d'énergie basse tension et d'influence continue externe.
-économiques: investissement (équipements et travaux), coût d'exploitation (énergie, surveillance, entretien, renouvellement) .

L'absence d'énergie électrique basse tension (ouvrages en mer, dans une zone peu habitée ou désertique) conduit naturellement à envisager une système de protection cathodique par anodes galvaniques. Ces dernières, en alliage plus électronégatif que le métal de l'ouvrage, sont connectées à celui-ci pour constituer une pile naturelle de faible tension dont la capacité en courant dépend de l'alliage et de leur poids. Cependant il ne suffit pas que la masse anodique installée corresponde à la capacité voulue, il faut également que l'intensité débitée, liée aux dimensions et à la résistivité, réponde aux besoins en courant de l'ouvrage. L'utilisation économique d'un tel système se limite généralement à une faible surface, à un électrolyte très conducteur (eau de mer) ou à une protection provisoire de quelques mois.

Dans les autres cas, un système par courant imposé est plus adapté bien qu'il nécessite une source d'énergie, alimentation électrique (réseau basse tension disponible dans la majorité des cas) ou autonome (panneaux solaires + batteries, groupes diesel, thermo-générateurs à gaz). L'ouvrage est alors connecté au pôle négatif du circuit continu du redresseur, une masse anodique étant reliée au pôle positif.

La comparaison financière entre les deux systèmes, souvent limitée au seul investissement initial, révèle d'une part un coût faible par rapport à celui de l'ouvrage et d'autre part des écarts significatifs.

A titre d'exemples :

Ouvrage	Protection cathodique	Investissement %	Coût moyen (F/A.an)
Plate-forme en mer: .acier nu .durée de vie = 25 ans .besoins en courant = 700A	Anodes galvaniques: .alliage Al-Zn-In .250 unités / masse = 65 t .répartition uniforme	< 3	250
	Courant imposé: .énergie consommée = 15 KVA .contrôle et entretien fréquents	< 2	310
Canalisation enterrée: .acier revêtu type C .longueur = 70 km .durée de vie = 25ans .besoins en courant = 60 A .résistivité = 30-60 Ω.m	Anodes galvaniques: .alliage magnésium .80 groupes de 25 anodes	< 6	4 800
	Courant imposé: .alimentation disponible .3 sources de courant	< 1,2	3 100
	.énergie solaire .3 sources de courant	< 1,6	3 400

5. Etude et contrôles de protection cathodique:

5.1 Etude:

Quelque soit l'ouvrage, la protection cathodique doit faire l'objet d'une étude par un personnel expérimenté évitant ainsi une contre-performance lors de la mise en service (niveau de protection insuffisant, portée limitée...) ou pendant la durée de vie (consommation des anodes plus rapide que prévue, débit réel des sources inférieur aux besoins de l'ouvrage...).

Les règles générales ou normes en la matière y invitent, même dans le cas de petites structures, car la protection cathodique s'intéresse à beaucoup de paramètres:

- ceux de l'ouvrage (dimensions, tracé ou emplacement, configuration, caractéristiques du métal, type et application de revêtement ou peinture, produit stocké ou véhiculé, conditions d'exploitation, degré de maintenance ...).
- ceux de l'électrolyte (conductivité, température, composition, variation, agitation, débit...).
- ceux de l'environnement (structure voisine existante ou future, lignes haute et basse tension, présence de sources continues, nappes phréatique et alluviale, conditions climatiques...).

Le coût de cette étude, qui définit les conditions de son application, les paramètres de dimensionnement, les équipements nécessaires et leur installation, est négligeable compte tenu de son objet, à savoir assurer la pérennité et la sécurité d'un ouvrage sur de nombreuses années. Pour les exemples ci-dessus, elle ne représente en effet que 1,5 (plate-forme) à 4 % (canalisation enterrée) du coût moyen.

5.2 Contrôles:

Les contrôles n'ont malheureusement pas toujours le budget qu'ils méritent sous l'effet de la séparation entre l'investisseur, responsable jusqu'à la mise en route, et l'exploitant. Par ailleurs on observe depuis plusieurs années une réduction de la maintenance se traduisant par une surveillance routinière minimale de la protection cathodique.

a) Installation:

L'installation doit répondre aux exigences du dossier d'étude et aux normes en vigueur. L'intervention d'un technicien spécialiste, au moins au démarrage et à la fin des travaux, permet de s'en assurer.

Par ailleurs pendant la pose, des mesures (résistivité, circulation de courants vagabonds, influence continue, absence de contact entre structures voisines) mais aussi des essais de protection confirment les paramètres de l'étude. Notamment un tel essai sur des tronçons de faible longueur d'une canalisation revêtue avant raccordements constitue une vérification de la qualité d'isolement et de l'absence de défauts majeurs (mises à nu suite au remblaiement, omission de joint de soudure).

Ces contrôles, pendant que l'entreprise est mobilisée, rendent peu onéreuses les réparations ou les modifications nécessaires et plus fiable la mise en service.

b) Mise en service:

Mettre en service la protection cathodique par un personnel qualifié et expérimenté est une opération importante car elle permet de vérifier:

-le bon fonctionnement du système et sa capacité réelle en courant.
-l'état électrique global de l'ouvrage par rapport à l'électrolyte avant sa modification par le courant de protection.
-la réaction initiale de l'ouvrage par la (les) courbe(s) de polarisation établie(s).
-l'isolement de l'ouvrage (revêtement, absence de contact et limites de protection).
-le degré global de protection après polarisation.
-l'existence de point(s) particulier(s).

L'absence de difficultés reflète la qualité des travaux et rend aisé l'établissement du certificat de réception de l'ouvrage. Par ailleurs les résultats constituent une référence pour suivre les évolutions pendant toute l'exploitation.

c) Interventions périodiques:

Quelque soit le système de protection cathodique, il convient d'assurer sa surveillance et sa maintenance par des interventions suffisamment fréquentes en raison:

-des caractéristiques évolutives de l'ouvrage (endommagement et vieillissement du revêtement ou de la peinture, extension, modification, réparation).
-d'un environnement variable (pollution, nappes phréatique et alluviale, pose de nouveaux ouvrages, modification des caractéristiques de structures voisines).
-de l'usure ou de la détérioration accidentelle des équipements du système (consommation des anodes, coupure de câble, oxydation de contacts, arrêt d'alimentation).

D'autre part si un bon fonctionnement du système doit être maintenu, il faut surtout qu'il procure à toute la surface de l'ouvrage un degré de protection dans les limites requises.

Le contrôle traditionnel, qui consiste à relever les paramètres des sources de courant et le potentiel instantané sous tension (valeur On) aux seules prises de mesure, est certes moins onéreux mais traduit plutôt le bon fonctionnement de la protection cathodique que son efficacité.

En effet, mis à part dans un électrolyte très conducteur tel que l'eau de mer, les valeurs de potentiel On intègrent une chute de tension négative dans celui-ci. C'est pourquoi, depuis de nombreuses années, les mesures doivent s'effectuer à la coupure du courant de protection (valeur Off).

Par ailleurs, en présence d'influence continue externe ou d'anomalies proches, la coupure du courant de protection cathodique ne supprime pas ceux présents dans l'électrolyte (influence) ou échangés instantanément entre anomalies, demeurées à des niveaux de polarisation différents. Il convient alors de déterminer le potentiel hors « tout » courant (valeur vraie) afin de s'assurer de la validité de la mesure Off.

Enfin la valeur lue n'est représentative que de la surface voisine de l'endroit où est positionnée l'électrode de référence à l'instant de la mesure, elle-même peut-être affectée par une influence externe. Ainsi le résultat obtenu n'est qu'apparent et concerne 2 à 3 % de l'ensemble de l'ouvrage à un moment donné bien que son interprétation soit pour la totalité et la durée entre deux contrôles successifs.

Cela explique, dans la majorité des cas, la présence de corrosions malgré un ouvrage à un degré de protection déclaré satisfaisant à partir de mesures On instantanées.

Le contrôle traditionnel trouve cependant sa justification s'il peut se référer à des résultats plus approfondis obtenus lors de la mise en service et à des périodes régulières.

Un relevé des potentiels On/Off pratiqué à faible intervalle sur l'ouvrage révèle en effet le niveau de potentiel et de polarisation aux et entre prises de mesure. Celui-ci, effectué au moins 1 fois tous les 3 contrôles traditionnels et associé à des mesures de courant, confirme si le réglage du système procure un degré de protection dans les limites requises et les potentiels sous tension (valeur On) nécessaires pour le maintenir.

Par ailleurs la mesure des gradients de potentiel est représentative des flux de courant vers l'ouvrage et leur variation sur une courte distance rend compte d'une anomalie locale. Ce relevé, complémentaire et généralement simultané au précédent, renseigne sur des points singuliers (influence d'ouvrage croisé ou parallèle, zones humides, mises à la terre, défaut d'isolement).

Pour une canalisation revêtue, ce relevé est particulièrement utile pour localiser des mises à nu avec certitude et précision, en connaître l'importance relative, la tendance cathodique ou anodique, et s'assurer de l'efficacité de la protection cathodique afin de définir une priorité de réparations.

Comme pour un véhicule personnel, un système de protection cathodique en bon état de fonctionnement et convenablement réglé fait partie intégrante de la sécurité tant de l'ouvrage lui-même que de l'environnement. Il doit ainsi faire l'objet d'un « contrôle technique » qui, cependant, n'est pas assimilable à celui d'une installation électrique mais fait appel à une compétence particulière.