

L'ESSENTIEL SUR LA PROTECTION CATHODIQUE

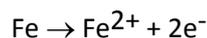
Par Marcel Roche

Des informations plus détaillées sont disponibles sur le site thématique du CEFRACOR <http://www.protectioncathodique.net/>.

1. Généralités sur la corrosion

La corrosion des matériaux métalliques à température ambiante ou relativement peu élevée est essentiellement due à de l'eau venant à leur contact dans une phase aqueuse qui peut être de l'eau, un sol ou un autre milieu comme le béton. Cette corrosion aqueuse est un processus d'oxydo-réduction de type électrochimique qui voit son origine dans le caractère de conduction électrique des deux phases en présence : conduction électronique dans la phase métallique et conduction ionique dans la phase aqueuse, appelée aussi électrolyte. Les réactions électrochimiques permettent les transferts de charge au niveau de l'interface entre le métal (électrode) et l'électrolyte.

Lorsqu'un métal se corrode au contact d'un électrolyte, des cations apparaissent dans l'eau et la charge négative correspondante se forme dans le métal. Dans le cas des aciers au carbone on a :

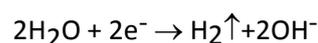
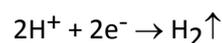
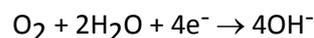


Le phénomène de base de la corrosion est donc une réaction électrochimique d'oxydation (production d'électrons) correspondant à un courant électrique circulant du métal vers l'électrolyte dû au mouvement des cations dans l'électrolyte, dit anodique. Toute surface vers laquelle circule du courant depuis le métal vers l'eau est appelée surface anodique et la réaction est appelée réaction anodique. Le courant de corrosion, est lié par la loi de Faraday à la quantité de métal oxydé. Ainsi la vitesse de corrosion d'un métal peut s'exprimer en courant de corrosion, en masse de métal oxydée par unité de temps et par unité de surface ou encore en épaisseur de métal oxydée par unité de temps. Pour l'acier ordinaire on a sensiblement la correspondance suivante :

$$1 \mu\text{A}/\text{cm}^2 \leftrightarrow 1 \mu\text{m}/\text{mois} \leftrightarrow 2,5 \text{ mg par dm}^2.\text{j}$$

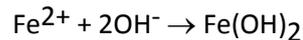
$$\text{ou encore } 1 \text{ mm}/\text{an} \leftrightarrow 7,8 \text{ kg}/\text{m}^2.\text{an} \leftrightarrow 860 \text{ mA}/\text{m}^2$$

La réaction de corrosion est conditionnée par le maintien de la neutralité électrique globale. Par conséquent, le mouvement des électrons dans le métal et des cations dans l'électrolyte aux surfaces anodiques doit être contrebalancé par une ou plusieurs réactions de réduction (consommation d'électrons) sur d'autres surfaces, appelées surfaces cathodiques, les plus courantes étant :

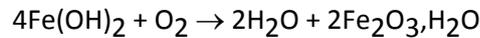


La première de ces réactions se produit en présence d'oxygène dissous et dans des conditions de quasi-neutralité. La deuxième réaction est favorisée par l'acidité (excès d'ions d'hydrogène), alors que la troisième domine à des valeurs de pH supérieures à celles correspondant à la neutralité. Dans tous les cas les réactions cathodiques entraînent une alcalinisation de la surface pouvant être à l'origine de phénomènes favorables (dépôts calco-magnésiens) ou défavorables comme le phénomène dit de décollement cathodique des revêtements.

Dans des conditions aérées de quasi-neutralité, les ions fer produits à l'anode réagissent avec les ions hydroxydes formés aux cathodes et produisent de l'hydroxyde ferreux :



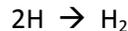
L'hydroxyde ferreux est oxydé par l'oxygène dissous pour former de l'oxyde ferrique hydraté $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (rouille) :



Ainsi la réaction globale peut s'exprimer par l'équation suivante :



Les atomes d'hydrogène éventuellement formés sur les zones cathodiques ont tendance à se recombinaison en hydrogène gazeux diatomique :



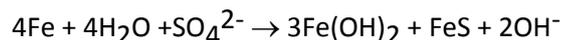
Cependant, une partie de cet hydrogène atomique peut pénétrer dans la phase métallique (notamment dans les aciers au carbone) et conduire à différentes formes de fragilisation par l'hydrogène (notamment en cas de surpolarisation cathodique).

L'approche cinétique de l'étude de la corrosion par le tracé des diagrammes densité de courant/potentiel (courbes de polarisation) permet de quantifier les échanges de courant et donc la vitesse de corrosion et le besoin en courant de protection cathodique. Ces courbes, tracées à l'aide d'un générateur de courant continu, permettent de déterminer la vitesse des réactions anodique et cathodiques en fonction du potentiel d'électrode (mesuré par rapport à une électrode de référence). En l'absence de courant imposé extérieur le métal est à son potentiel de corrosion libre, les courants anodiques et cathodiques étant égaux en valeur absolue.

Dans des environnements anaérobies (exempts d'oxygène) voisins de la neutralité, les bactéries sulfato-réductrices peuvent entraîner un autre type de réaction cathodique dans la corrosion de l'acier. Ces bactéries réduisent les sulfates dissous en sulfures par la réaction :



Dans ce cas, le mécanisme de corrosion global s'écrit comme suit :



2. Principes généraux 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 capable de fournir un courant cathodique suffisant à la surface métallique pour diminuer son potentiel à un niveau correspondant à une vitesse de corrosion résiduelle suffisamment faible pour l'application concernée.

La variation de potentiel sous l'effet du courant est appelée « polarisation ». Quand elle est dans le sens négatif il s'agit d'une « polarisation cathodique ». La diminution du potentiel de corrosion du métal se traduit par une réduction de la vitesse d'oxydation (anodique) du métal et une augmentation de la ou des réactions de réduction (cathodiques) des espèces oxydantes présentes dans l'électrolyte. L'ouvrage métallique à protéger est placé à un potentiel tel que la vitesse de corrosion devient acceptable sur toute la surface de métal en contact avec l'électrolyte. Pour les ouvrages industriels comme les canalisations ou les réservoirs enterrés, une vitesse de corrosion

résiduelle inférieure à $10 \mu\text{m}$ /an est généralement atteinte à l'aide d'un système de protection cathodique parfaitement efficace.

Pour cela on fait circuler un courant électrique continu entre une ou des anode(s) et le matériau à protéger, qui constitue la cathode. L'efficacité de la méthode exige un contact intime 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. La variation du potentiel de l'ouvrage en fonction de la densité de courant cathodique qu'il reçoit suit la courbe de polarisation cathodique, ou courbe intensité – potentiel, caractéristique du comportement électrochimique d'un métal donné dans un milieu électrolytique donné. Cette courbe quantifie les échanges de courant, donc notamment la vitesse de corrosion et le besoin en courant de protection cathodique.

La courbe globale de polarisation est tracée en utilisant un générateur de courant continu comme schématisé Fig. 1. Elle est la somme algébrique de plusieurs courbes individuelles de polarisation (anodique et cathodiques) qui permettent de déterminer la vitesse des réactions anodiques (oxydation du métal) et cathodiques (réduction de l'oxydant du milieu ou de l'eau elle-même) en fonction du potentiel d'électrode. Sans courant extérieur le métal est à son potentiel de corrosion libre E_{corr} , les courants anodique et cathodique(s) étant égaux en valeur absolue. Schématiquement, quand la densité de courant cathodique est suffisante pour atteindre le potentiel E_a la corrosion n'est théoriquement plus possible, on a atteint le seuil de potentiel de protection.

Cette protection constitue souvent le complément d'une « protection passive » (revêtement de type peinture, revêtement bitumineux, polymère...). Le courant de protection cathodique nécessaire à l'abaissement de potentiel recherché est alors fortement réduit car il n'entre dans la surface métallique qu'aux défauts de continuité du revêtement.

Il existe deux méthodes pour fournir le courant de protection afin de polariser la surface : les systèmes à anodes galvaniques dans lesquels le courant de protection provient d'un métal dont le potentiel de corrosion est plus négatif que celui de la pièce à protéger ou les systèmes à courant imposé où le courant continu est fourni par une source alimentant des anodes plus ou moins inertes. Dans tous les cas, le principe de la protection cathodique peut être schématisé comme illustré par la Fig. 2.

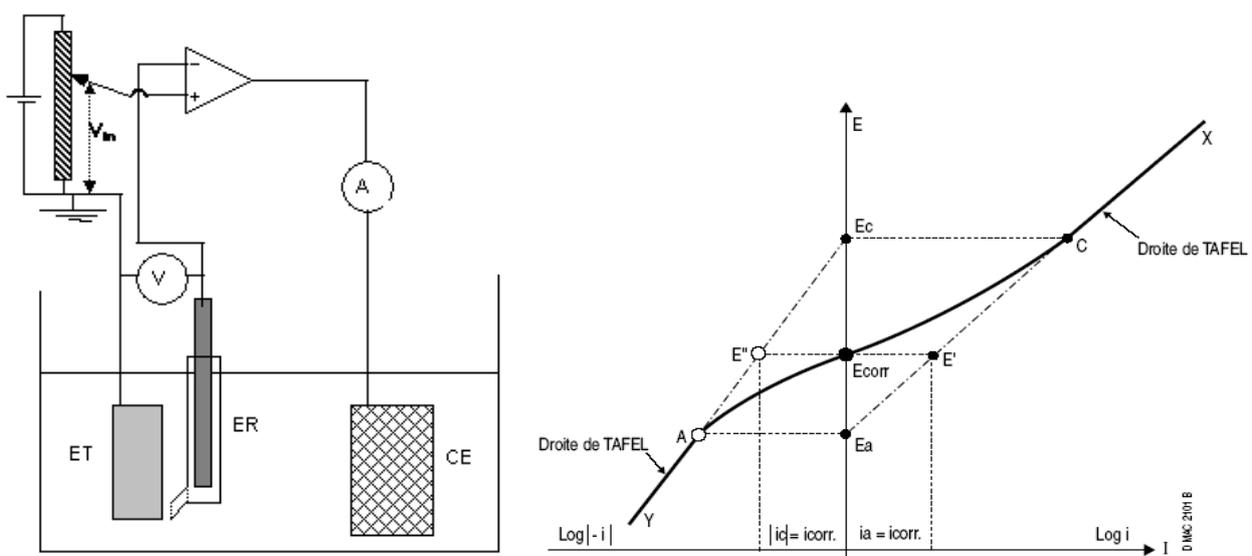


Figure 1 : Tracé d'une courbe globale de polarisation et décomposition en courbes individuelles (cas d'un milieu exempt d'oxygène dissous)

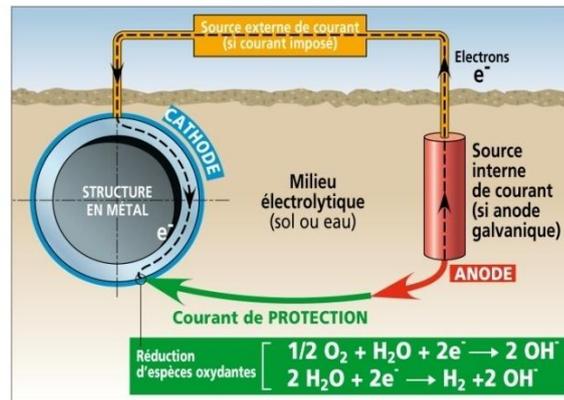


Figure 2 : Principe de la protection cathodique

3. Critères de protection

Quel que soit le système utilisé pour fournir le courant de protection, l'efficacité de la protection dépend du potentiel atteint sur la surface du métal que l'on veut protéger. C'est la valeur du potentiel ainsi obtenu qui sert de critère pour estimer l'efficacité de la protection. Une installation de protection cathodique doit être suivie et contrôlée régulièrement pour s'assurer du respect de ce critère. Dans les milieux électrolytiques naturels comme les sols ou les eaux, une protection cathodique est efficace si le **potentiel réel de l'acier au carbone** (hors chute ohmique dans l'électrolyte entre la position de l'électrode de référence et la surface du métal) est **plus négatif que -850 mV par rapport à une électrode au cuivre/sulfate de cuivre saturé, ce qui équivaut à -780 mV** (généralement arrondi à -800 mV) **par rapport à une électrode Ag/AgCl/eau de mer.**

Dans certains cas, par exemple dans des milieux anaérobies (fort développement de bactéries sulfato-réductrices – BSR-), le potentiel doit être abaissé à -950 mV par rapport à une électrode au cuivre/sulfate de cuivre saturé, ce qui équivaut à -880 mV (arrondi à -900 mV) par rapport à une électrode Ag/AgCl/eau de mer.

Au contraire, dans les sols sableux très peu conducteurs, il est possible de se contenter de valeurs de potentiel moins négatives. La norme NF EN 12954 accepte -750 mV si la résistivité de l'électrolyte se situe entre 100 et 1000 $\Omega \cdot m$ et même -650 mV au-dessus de 1000 $\Omega \cdot m$.

D'autres critères sont parfois retenus. Le plus répandu est celui qui admet que la protection est considérée comme suffisamment efficace si le potentiel de la structure protégée est plus négatif de plus de **100 mV** que le potentiel de corrosion. Il est généralement mesuré en "dépolarisation" : le potentiel de l'acier est mesuré aussi rapidement que possible après coupure du courant de protection cathodique (on s'affranchit ainsi de la chute ohmique), puis quelques heures après. La remontée du potentiel doit être de plus de 100 mV. Ce critère est un de ceux recommandés par les normes ou standards ISO 15589-1 ou NACE SP01-69. La méthode est illustrée par la Fig. 3.

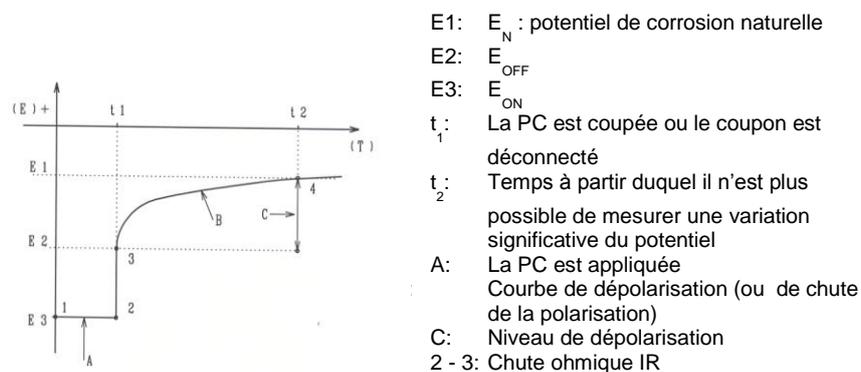


Figure 3 : Application du critère de 100 mV

Pour l'acier des armatures des parties en béton armé soumis à protection cathodique, en application de la norme NF EN ISO 12696, le respect d'un des critères suivants est considéré comme démontrant l'absence de corrosion significative : Un potentiel « OFF » instantané plus négatif que -720 mV mesuré avec une électrode de référence Ag/AgCl/0,5 M KCl (équivalent à -785 mV par rapport à une électrode au cuivre/sulfate de cuivre saturé) ; une dépolarisation de plus de 100 mV à partir du potentiel « OFF » instantané sur une durée maximale de 24 h ; une dépolarisation de plus de 150 mV à partir du potentiel « OFF » instantané sur une durée supérieure à 24 h.

Le potentiel d'un acier sous protection cathodique ne doit pas être trop abaissé (ou, ce qui est équivalent, la densité de courant cathodique ne doit pas être trop élevée). En effet, dans ce cas, de l'hydrogène peut se former (risque de fragilisation de certains aciers) et le pH devenir très alcalin (endommagement du revêtement). Des critères liés aux **risques de surpolarisation** figurent dans les normes et recommandations techniques.

La valeur de $-1,20$ V par rapport à une électrode au cuivre/sulfate de cuivre saturé (hors chute ohmique dans l'électrolyte) peut, de manière conservatrice, être retenue comme une valeur à ne pas dépasser pour éviter le risque de fragilisation par l'hydrogène des aciers au carbone courants et celui de décollement cathodique des systèmes performants de revêtements utilisés.

4. Systèmes de protection cathodique

Le courant de protection cathodique peut être appliqué par l'un des deux systèmes :

- **protection par courant imposé** utilisant un générateur de courant continu branché entre l'ouvrage à protéger (cathode) et une ou des anodes auxiliaires (appelées déversoirs de courant) utilisant tout matériau conducteur d'électricité (de préférence inattaquable) ;
- **protection par anodes galvaniques** utilisant un couplage galvanique entre l'ouvrage à protéger et une ou des anodes constituées d'un métal ou alliage moins noble que le métal que l'on veut protéger.

Protection par courant imposé

Dans les installations de protection cathodique par courant imposé, l'alimentation électrique permet de polariser cathodiquement la structure à protéger en faisant circuler un courant continu entre l'ouvrage à protéger et une anode auxiliaire dite « déversoir ». La méthode est illustrée par la Fig. 4.

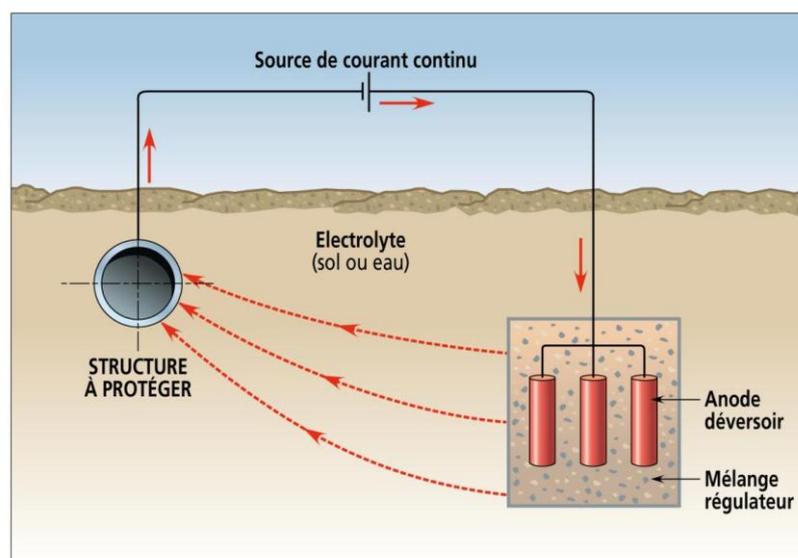


Figure 4 : Principe de la protection cathodique par courant imposé

Selon les cas, cette anode peut être constituée de matériau consommable (acier de rebut), semi-inerte (ferro-silicium, graphite, magnétite, oxyde de plomb) ou inerte (titane platiné, niobium platiné, tantale platiné, titane recouvert d'oxydes mixtes "Ti/MMO", polymères conducteurs).

Les postes de protection cathodique sont généralement à voltage constant. Il est aussi possible de mettre en œuvre des postes à débit constant.

Des postes assurant un débit asservi au potentiel mesuré à l'aide d'une électrode de référence pilote par rapport à un domaine de potentiel cible permettent de mettre en œuvre des systèmes automatiques utiles pour répondre aux variations des conditions électrochimiques liées par exemple à la résistivité ou à l'influence de courants continus vagabonds.

Protection cathodique galvanique

Certains métaux ou alliages placés dans le même milieu électrolytique que l'ouvrage à protéger ont un potentiel d'électrode (mesuré par rapport à une électrode de référence) inférieur à celui du métal constitutif de l'ouvrage. Lorsqu'un tel métal est relié électriquement à la structure à protéger, son potentiel tend à augmenter, alors que celui du métal de la structure tend à diminuer, ce qui conduit à faire décroître sa vitesse de corrosion. La méthode est illustrée par la Fig. 5.

Les anodes galvaniques (parfois appelées anodes sacrificielles ou consommables) sont à **base de magnésium, de zinc ou d'aluminium**. Dans tous les cas, les anodes pour protection cathodique doivent être impérativement constituées d'alliages spécifiques qui ont été préalablement qualifiés par des mesures permettant de connaître leurs caractéristiques électrochimiques, notamment leur réactivité et leur polarisabilité, sur le long terme. Dans le cas des ouvrages au contact du sol, seules les anodes à base de zinc ou de magnésium entouré d'un mélange régulateur ou « *backfill* » constitué de bentonite et de sulfate de calcium sont utilisables. Les anodes à base d'aluminium sont à exclure car les sols ne contiennent généralement pas assez d'ions chlorures pour éviter leur passivation qui conduit à une chute du débit du courant galvanique.

Les anodes galvaniques doivent être conformes à la norme NF EN 12496 qui spécifie les exigences de qualité et recommande les compositions et caractéristiques électrochimiques.

Le débit des systèmes à anodes galvaniques s'adapte naturellement en fonction de la résistance du circuit.

En cas de surpolarisation, il est possible de réduire le débit en intercalant une résistance électrique, éventuellement réglable, dans le circuit.

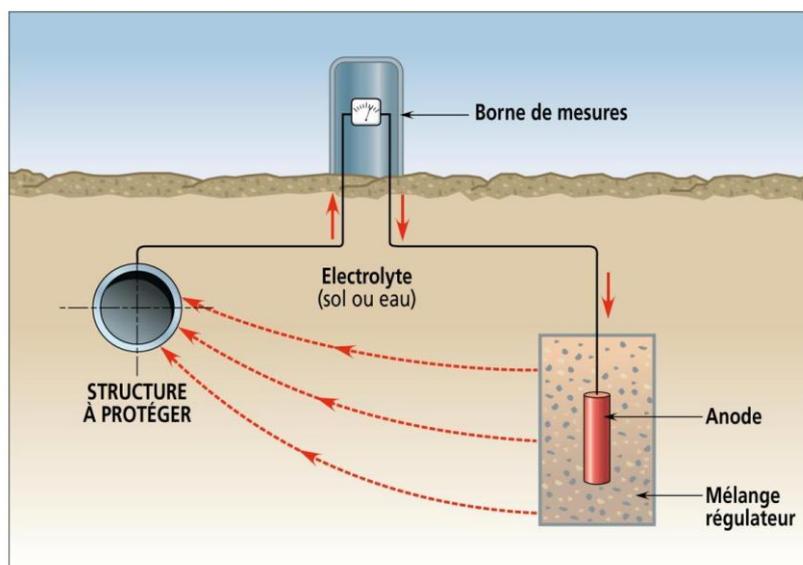


Figure 5 : Principe de la protection cathodique par anodes galvaniques

Comparaison entre un système à anodes galvaniques et un système à courant imposé

	Systèmes à anodes galvaniques	Systèmes à courant imposé
Environnement	L'utilisation peut être impossible dans les sols ou les eaux à résistivité élevée.	L'utilisation n'est pas restreinte par la résistivité des sols et des eaux.
Installation	Facile.	Nécessité d'une conception soignée pour éviter les complications.
Alimentation électrique	Indépendant de toute source d'énergie électrique. Il ne peut y avoir d'erreur de branchement.	Alimentation extérieure indispensable. Nécessité de faire attention aux erreurs de branchement.
Maîtrise du débit des anodes	Leur courant a tendance à s'ajuster de lui-même.	Possible. En général le contrôle est automatique et peut être continu.
Interaction	Ces systèmes sont peu susceptibles d'affecter les ouvrages voisins.	Les effets sur les ouvrages au voisinage des anodes doivent être évalués.
Entretien	En général, pas nécessaire. Le remplacement des anodes est possible dans certains cas.	Matériel conçu pour une longue durée de vie, à condition d'effectuer des contrôles réguliers du matériel électrique en service. L'alimentation électrique est nécessaire de façon continue.
Avaries	Les anodes sont robustes et peu susceptibles de subir des avaries mécaniques. Lorsqu'un système compte un grand nombre d'anodes, la perte de quelques-unes n'a qu'une très faible influence sur l'ensemble du système. Les branchements doivent être capables de supporter toute sollicitation s'exerçant sur l'ouvrage. L'isolation électrique des câbles n'est pas nécessaire.	Les anodes inertes sont de construction plus légère donc moins résistantes aux avaries mécaniques. La perte de certaines anodes peut être plus critique sur l'efficacité du système. Il est obligatoire de totalement isoler électriquement les câbles positifs exposés à l'électrolyte.

5. La mesure du potentiel de protection cathodique

Les potentiels fixés comme critères de protection sont ceux qui existent réellement à l'interface entre le matériau de l'ouvrage et l'électrolyte environnant, comme spécifié dans la norme NF EN 12954. Or pour effectuer ces mesures de potentiel, il est en général impossible de placer l'électrode de référence utilisée pour la mesure au contact intime du matériau et plus particulièrement aux défauts de son revêtement. La valeur de la « chute ohmique » (produit de l'intensité du courant par la résistance électrique) existant entre l'électrode de mesure et la surface dont on cherche à mesurer le potentiel peut conduire à des erreurs de mesure de potentiel importantes dans les milieux peu conducteurs comme les sols, comme schématisé par la Fig. 6.

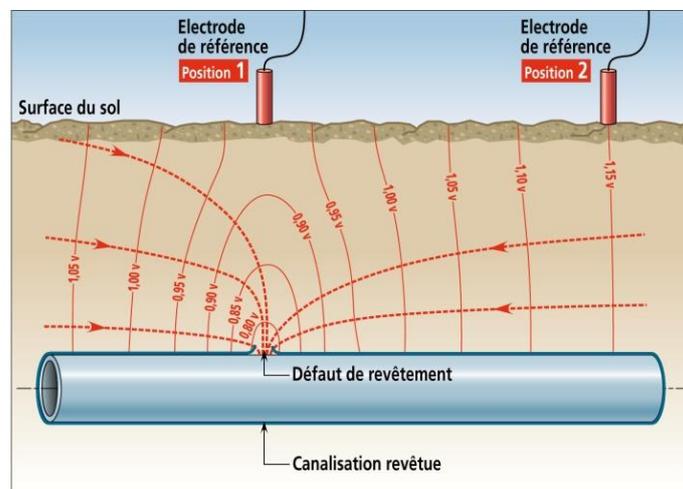


Figure 6 : Problématique de l'erreur de « chute ohmique » lors des mesures de potentiel

Le **potentiel à courant établi (« E_{on} »)** mesuré à courant de protection non coupé dépend fortement de la position de l'électrode de référence par rapport à la surface d'acier de l'ouvrage protégé exposée à l'électrolyte (cf. ci-dessus). En fait, le gradient de potentiel dans l'électrolyte est particulièrement élevé au voisinage des défauts de revêtement et des anodes.

En absence de courants extérieurs au système de protection cathodique considéré, les mesures E_{on} , plus négatives que le potentiel réel recherché, sont donc généralement très optimistes pour la vérification du niveau de protection. Elles sont par contre pessimistes pour la vérification du niveau de surpolarisation.

Il faut donc éliminer ou réduire le plus possible cette « erreur de chute ohmique » due au champ électrique causé par le courant de protection cathodique dans l'électrolyte entre la position de l'électrode de référence et la surface de l'acier aux points de défauts du revêtement recevant le courant de protection. La façon la plus courante de chercher à se rapprocher le plus possible du potentiel « vrai » (sans erreur de chute ohmique dans le sol) est de mesurer le **potentiel à courant coupé (« E_{off} ») dans un délai très court (" off instantané ")** après coupure du courant de protection cathodique. En effet ce potentiel évolue avec le temps au fur et à mesure de la dépolarisation de l'ouvrage (retour progressif au potentiel naturel de corrosion E_{cor}). En absence de courants extérieurs au système de protection cathodique considéré, les mesures E_{off} peuvent donc être pessimistes pour la vérification du niveau de protection. Elles peuvent par contre être optimistes pour la vérification du niveau de surpolarisation.

Afin d'éviter le début de dépolarisation qui conduit à une remontée plus ou moins rapide (en fonction de la nature de l'électrolyte) vers le potentiel de corrosion naturel les **mesures "ON/OFF"** sont réalisées avec des interrupteurs cycliques de manière parfaitement synchronisée s'il y a plusieurs sources de courant de protection cathodique qui coupent le courant pendant peu de temps (typiquement 1 à 3 sec. pour 30 à 60 sec. en courant établi). Il faut idéalement **mesurer le potentiel instantanément à la coupure** à l'aide d'un enregistreur numérique rapide. Si la mesure du potentiel "OFF" est réalisée avec un voltmètre numérique standard on mesure un potentiel "OFF" après environ une seconde, valeur moins négative que le potentiel "OFF instantané" (donc que la valeur réelle que l'on cherche). On sous-estime ainsi la qualité de la protection mais aussi le risque de surpolarisation

En cas de perturbations électriques extérieures ou si une mesure ON/OFF est difficile à réaliser directement sur la structure protégée, on peut effectuer les mesures "ON/OFF" sur des « **témoins métalliques** » ou « **coupons** » qui reproduisent le matériau protégé, par exemple à des défauts de revêtement artificiels (cf. Fig. 7 et 8). Ces témoins permettent aussi d'effectuer une mesure des densités de courant qu'ils reçoivent.

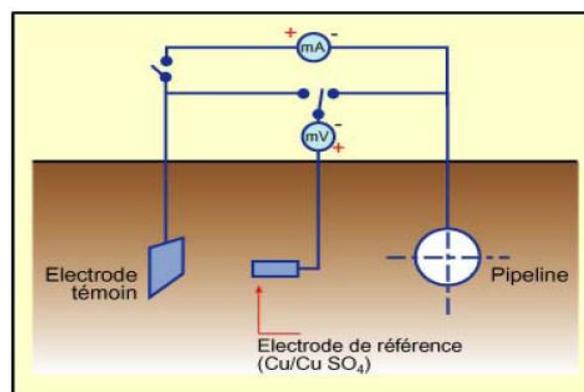


Figure 7 : Témoin métallique (coupon) permettant des mesures ON/OFF locales et des mesures de densité de courant

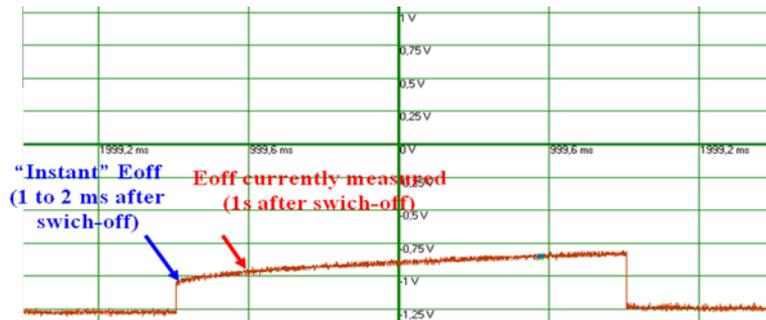


Figure 8 : Mesures « ON/OFF » réalisées avec un témoin métallique (coupon)

Un contrôle idéal de l'efficacité de la protection cathodique sur un ouvrage nécessiterait la mesure permanente du potentiel "vrai" en tout point de la surface de son matériau au contact de l'électrolyte. Ceci est bien entendu impossible et le but des contrôles est de s'assurer que le critère est bien obtenu sans variations significatives à des points représentatifs, avec une marge de sécurité.

Les électrodes de référence utilisées pour les mesures de potentiel doivent être vérifiées correctement, c'est-à-dire en dehors de tout champ électrique (courant de protection cathodique coupé).

Le courant de protection cathodique et les potentiels (E_{off} et E_{on}) des structures protégées peuvent être contrôlés à distance sans intervention humaine, de façon continue ou à intervalles définis. Les résultats de ces **mesures de télésurveillance** peuvent être enregistrés dans un collecteur de données puis transmises. Le fonctionnement de l'installation, avec ses éventuelles défaillances, peut ainsi être suivi à distance.

6. Compétence des intervenants

Une installation de protection cathodique peut perdre son efficacité si elle est mal conçue ou mal contrôlée, car les règles de conception, de mise en œuvre et de contrôle doivent être scrupuleusement respectées. C'est pourquoi, il est nécessaire que les personnels impliqués dans la mise en œuvre et le suivi de la protection cathodique soient compétents pour le niveau adapté aux tâches entreprises.

Afin d'assurer la compétence des personnes et des entreprises qui interviennent, des normes techniques sur les produits et les méthodes de conception ou de contrôle ont été rédigées au niveau international (normes ISO), européen (normes EN) ou purement français (normes NF). Elles sont la base de la formation et de la vérification de la compétence des personnels.

Pour les contrôles fonctionnels de routine, le personnel doit être suffisamment formé sous la forme d'une qualification interne à l'entreprise.

Pour les contrôles d'efficacité de la protection cathodique, cette compétence doit être vérifiée à l'aide d'un système de certification tierce partie. En France cette certification se fait habituellement en application de la norme NF EN 15257 ; un système international considéré équivalent (ex. certification délivrée par NACE International) peut aussi être utilisé.

La norme NF EN 15257 « *Protection cathodique - Niveaux de compétence et certification du personnel en protection cathodique* » distingue 4 secteurs d'application : Ouvrages enterrés, Ouvrages à la mer, Surfaces internes de capacités et Ouvrages en béton. Dans chaque secteur, la compétence des personnes est classée en trois niveaux :

- niveau 1 : technicien spécialisé
- niveau 2 : spécialiste
- niveau 3 : expert

La certification est délivrée à la suite d'examens pour les niveaux 1 et 2 et d'évaluation par un comité d'évaluation pour le niveau 3.

Pour les mesures, la réalisation doit être assurée au minimum par du personnel au niveau de compétence 1 sur la base d'instructions données par du personnel au minimum au niveau de compétence 2, et validées par du personnel au minimum au niveau de compétence 2.

La conception doit être réalisée par du personnel au minimum au niveau de compétence 2 pour des conditions reproductibles et bien connues (cas général des réservoirs de GPL sous talus), et par du personnel au niveau de compétence 3 pour les cas plus complexes.

Le système français, appliquant les normes NF EN ISO/CEI 17024 et NF EN 15257, est aujourd'hui opéré par la branche CFPC du CEFRACOR sous la marque déposée « CEFRACOR Certification / Protection cathodique ». Cet organisme de Certification est accrédité COFRAC pour les secteurs d'application Ouvrages enterrés et Ouvrages à la mer.



Toutes informations nécessaires et la liste réactualisée des personnes certifiées aux différents niveaux de compétence sont disponibles sur le site <http://www.protectioncathodique.net/>.

7. Responsabilités des parties

La référence à de la norme NF A05-800 « Prestations de service en protection cathodique – Engagements des prestataires de service » est recommandée afin de bien définir les relations entre maîtres d'ouvrage ou leurs maîtres d'œuvre agissant en leurs noms comme donneurs d'ordre et sociétés de service prestataire en protection cathodique chargées de la conception, de l'installation, du contrôle et de la maintenance des systèmes afin d'assurer au mieux la qualité des interventions.

L'utilisation de la certification de la compétence des personnels permet de s'assurer au mieux de la qualité des différents intervenants.

8. Références

Réglementation

- Décision DM-T/P n° 32325 du 9 décembre 2002 *relative à l'exploitation de certains réservoirs de stockage de gaz de pétrole liquéfiés dits "Petit vrac"*
- Arrêté du 4 août 2006 portant *règlement de la sécurité des canalisations de transport de gaz combustibles, d'hydrocarbures liquides ou liquéfiés et de produits chimiques*
- Arrêté du 20 décembre 2010 modifiant l'arrêté du 4 août 2006 portant *règlement de sécurité des canalisations de transport de gaz combustibles, d'hydrocarbures liquides ou liquéfiés et de produits chimiques* (Version consolidée au 27 janvier 2011)
- Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, Direction générale de la prévention des risques, Décision BSEI n° 13-028 du 21 mars 2013 *relative à la reconnaissance d'un cahier technique professionnel pour le contrôle en service des réservoirs sous talus destinés au stockage de gaz inflammables liquéfiés*

Documents techniques professionnels

- CFBP (Comité Français du Butane et du Propane), *Cahier des charges professionnel pour la fabrication et l'exploitation des réservoirs GPL Petit Vrac*, Ma.Pv/Cc.01 Edition 5 du 30 mars 2009
- AFIAP (Association Française des Ingénieurs en Appareils à Pression), *Cahier technique professionnel, Dispositions spécifiques applicables aux réservoirs sous talus destinés au stockage de gaz inflammables liquéfiés*, Edition 2013

Normes

- NF EN ISO 8044, *Corrosion des métaux et alliages - Termes principaux et définitions*
- NF EN 12499, *Protection cathodique interne des structures métalliques*
- NF EN 12496, *Anodes galvaniques pour la protection cathodique dans l'eau de mer et les boues salines*
- NF EN 12501-1, *Protection des matériaux métalliques contre la corrosion — Risque de corrosion dans les sols — Partie 1 : Généralités*
- NF EN 12501-2, *Protection des matériaux métalliques contre la corrosion — Risque de corrosion dans les sols - Partie 2 : Matériaux ferreux peu ou non alliés*
- NF EN 12473, *Principes généraux de la protection cathodique en eau de mer*
- NF EN ISO 12696, *Protection cathodique de l'acier dans le béton*
- CEN/TS 14038-1, *Ré-alkalinisation électrochimique et traitements d'extraction des chlorures applicables au béton armé - Partie 1 : Ré-alkalinisation*
- NF EN 12954, *Protection cathodique des structures enterrées ou immergées - Principes généraux et application aux canalisations*
- NF EN 14505, *Protection cathodique des structures complexes*
- NF EN 13509, *Techniques de mesures applicables en protection cathodique*
- NF EN 13636, *Protection cathodique des réservoirs métalliques enterrés et tuyauteries associées*
- NF EN 15280: *Evaluation du risque de corrosion occasionnée par les courants alternatifs des canalisations enterrées protégées cathodiquement*
- NF EN 15112 : *Protection cathodique externe des cuvelages de puits*
- NF EN 15257, *Protection cathodique – Niveaux de compétence et certification du personnel en protection cathodique*
- NF A05-800, *Prestations de service en protection cathodique – Engagements des prestataires de service*
- ISO 15589-1, *Industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel — Protection cathodique des systèmes de transport par conduites — Partie 1: Conduites terrestres*
- NF EN ISO 15589-2, *Industries du pétrole, de la pétrochimie et du gaz naturel — Protection cathodique des systèmes de transport par conduites — Partie 2: Conduites en mer*
- NF EN 16299, *Protection cathodique des surfaces externes des fonds de réservoirs de stockage aériens en contact avec le sol ou les fondations*
- NF EN 50162, *Protection contre la corrosion due aux courants vagabonds des systèmes à courant continu*
- NF EN 13173, *Protection cathodique des structures en acier flottant en mer*
- NF EN 12495, *Protection cathodique des structures en acier fixes en mer*

- NF EN ISO 13174, *Protection cathodique des installations portuaires*
- NF EN 16222, *Protection cathodique des coques de bateaux*
- NACE SP01-69-2007: *Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems*, NACE International, Houston, Texas, USA

9. Définitions

bactéries sulfato-réductrices

famille de bactéries présentes dans la plupart des sols et des eaux naturelles, mais uniquement actives dans des conditions de quasi-neutralité (pH≈7) et d'absence d'oxygène. Elles réduisent les sulfates dans leur environnement en produisant des sulfures, et accélèrent la corrosion des matériaux ferreux

chute ohmique dans un électrolyte

produit de l'intensité du courant électrique circulant entre deux points d'un électrolyte par la résistance électrique existant entre ces deux points

coefficient de dégradation d'un revêtement

rapport entre la densité de courant cathodique d'un matériau métallique revêtu et la densité de courant cathodique du matériau nu (coefficient compris entre 0 et 1)

condition anaérobie

absence d'oxygène libre dissous dans l'électrolyte

corrosion

interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et pouvant conduire à une dégradation significative de la fonction du métal, du milieu environnant ou du système technique dont ils font partie. Cette interaction est souvent de nature électrochimique

courant de protection

courant appliqué à un ouvrage métallique au travers de son environnement électrolytique afin d'obtenir la protection cathodique de l'ouvrage

courants vagabonds

courants électriques qui circulent sur des trajectoires différentes des circuits prévus (le cas le plus connu est lié à l'alimentation de voies ferrées en courant continu)

courbe de polarisation ou courbe intensité - potentiel

diagramme reliant le potentiel d'électrode et la densité de courant, représentatif des interactions physico-chimiques entre un métal et un électrolyte environnant

décollement cathodique

perte d'adhérence entre un revêtement et une surface métallique directement imputable à l'application de la protection cathodique

densité de courant de protection

courant de protection ramené à l'unité de surface. On utilise souvent le mA/m²

dépôt calco-magnésien

précipités minéraux formés sur la cathode métallique du fait de l'augmentation de l'alcalinité que provoque la protection cathodique

déversoir

ensemble d'anodes reliées à la borne positive d'une source de courant continu servant à amener le courant de protection cathodique vers l'ouvrage à protéger (pour un système à courant imposé)

électrode

conducteur électronique (métal, alliage, graphite, magnétite, etc...) en contact avec un électrolyte, siège de réactions électrochimiques

électrode de référence

électrode ayant un potentiel stable et reproductible et utilisée comme référence pour le mesurage des potentiels d'électrode. Certaines électrodes de référence utilisent l'électrolyte dans lequel le mesurage est effectué. Le potentiel mesuré varie selon la composition de cet électrolyte

électrode de référence à l'argent/chlorure d'argent

électrode de référence constituée d'argent, recouvert de chlorure d'argent, dans un électrolyte contenant une concentration connue d'ions chlorure. Les électrodes en argent/chlorure d'argent/KCl saturé sont couramment utilisées comme électrodes de référence maîtresses

électrode de référence au calomel saturé

électrode de référence composée de mercure et de chlorure mercurique dans une solution saturée de chlorure de potassium. Les électrodes au calomel saturé sont couramment utilisées comme électrodes de référence maîtresses

électrode de référence cuivre/sulfate de cuivre

électrode de référence constituée de cuivre dans une solution saturée de sulfate de cuivre. C'est l'électrode la plus utilisée au contact des sols

électrode de référence d'étalonnage primaire

électrode de référence utilisée pour l'étalonnage des électrodes de référence maîtresses ; il s'agit de l'électrode normale à hydrogène (E.N.H.). Il est pratiquement impossible de fabriquer l'électrode de référence officielle, l'électrode à hydrogène standard (E.S.H.), qui tient compte du coefficient de fugacité du gaz d'hydrogène et du coefficient d'activité des ions H^+

électrode de référence en zinc

électrode constituée de zinc pur ou d'un alliage de zinc spécifique pour anodes galvaniques, en contact avec l'électrolyte dans lequel les mesurages sont effectués

électrode de référence maîtresse

électrode de référence, étalonnée avec l'électrode de référence d'étalonnage primaire, utilisée pour la vérification des électrodes de référence qui servent pour les mesurages sur le terrain

électrolyte

milieu dans lequel le courant électrique est transporté par des ions

fragilisation par l'hydrogène

processus résultant d'une diminution de la ténacité ou de la ductilité d'un métal en raison de l'absorption d'hydrogène

gradient de potentiel

différence de potentiel entre deux points distincts dans le même champ électrique

joint (ou assemblage) isolant

joint ou assemblage électriquement discontinu inséré entre deux longueurs de tube pour créer une discontinuité électrique entre elles

polarisation d'électrode

modification du potentiel d'électrode par rapport au potentiel de corrosion libre causé par l'application d'un courant extérieur

potentiel d'électrode

différence de potentiel mesurée dans le circuit extérieur entre une électrode et une électrode de référence en contact avec le même électrolyte

potentiel de corrosion libre

potentiel d'électrode en l'absence de courant électrique global (externe) entrant ou sortant de la surface métallique

potentiel ouvrage - électrolyte

différence de potentiel entre un ouvrage et une électrode de référence mise en contact avec l'électrolyte en un point situé à proximité immédiate de l'ouvrage sans toutefois le toucher, pour éviter l'erreur due à la chute de tension consécutive à toute circulation de courant dans l'électrolyte

résistivité (d'un électrolyte)

résistance d'un volume d'électrolyte de section égale à l'unité et de longueur égale à l'unité. Elle est exprimée en ohm x mètre ($\Omega.m$). La résistivité dépend entre autres de la quantité de sels dissous dans l'électrolyte

surpolarisation

polarisation correspondant à des potentiels de l'ouvrage par rapport à l'électrolyte plus négatifs que ceux requis pour une protection cathodique satisfaisante. La surpolarisation ne fournit aucune fonction utile. Elle peut même endommager l'acier de l'ouvrage ou son revêtement

système de protection cathodique

installation complète qui fournit une protection cathodique. Il peut inclure des anodes, une source d'énergie, des câbles, des équipements de mesure, des joints isolants, des liaisons électriques

tension disponible

différence entre le potentiel ouvrage - électrolyte et le potentiel anode - électrolyte lorsque la protection cathodique fonctionne

10. Abréviations et symboles

Ag/AgCl/0,5 M KCl	Electrode de référence argent – chlorure d'argent à solution 0,5 M de KCl
BSR	Bactéries Sulfato-Réductrices
Cu-CuSO ₄ sat.	Electrode de référence au cuivre – sulfate de cuivre saturé
E	Potentiel d'électrode d'un métal dans un électrolyte mesuré avec une électrode de référence
E _{cor}	Potentiel de corrosion libre d'un métal dans un électrolyte
E _{OFF}	Potentiel d'électrode d'un métal dans un électrolyte mesuré après coupure du courant de PC
E _{OFF} instantané	Potentiel d'électrode d'un métal dans un électrolyte mesuré instantanément après coupure du courant de PC
E _{ON}	Potentiel d'électrode d'un métal dans un électrolyte mesuré en présence du courant de PC
IR	« Chute Ohmique » dans l'électrolyte due au champ électrique créé par la PC
ON/OFF	Mesures de potentiel avec cycle de courant de PC enclenché et déclenché
PC	Protection cathodique
T/R	Transformateur-redresseur (utilisé comme source de courant continu de PC)