

[www.ineris.fr/badoris](http://www.ineris.fr/badoris)

[www.ineris.fr/badoris](http://www.ineris.fr/badoris) [www.ineris.fr/badoris](http://www.ineris.fr/badoris) [www.ineris.fr/badoris](http://www.ineris.fr/badoris)

[www.ineris.fr/badoris](http://www.ineris.fr/badoris)



Base de données sur les Barrières Techniques de Sécurité

BADORIS - Document de synthèse relatif à  
une barrière technique de sécurité (BTS)

**Protection cathodique**

Version 1.1 – janvier 2008

**INERIS**

maîtriser le risque |  
pour un développement durable |

## **Document de synthèse relatif à une barrière technique de sécurité (BTS)**

Type(s) d'installation(s) : Gaz liquides liquéfiés (G.I.L.)  
Liquides inflammables

Nom du dispositif : Protection cathodique

Document élaboré par : l'INERIS

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Nguyen-Thuy LE

	<b>Rédaction</b>	<b>Relecture</b>	<b>Vérification</b>	<b>Approbation</b>
<b>NOM</b>	Nguyen Thuy LE	Valérie DE DIANOUS	Sylvain CHAUMETTE	Yann MACÉ
<b>Qualité</b>	Ingénieur Unité Prévention des Risques Accidentels	Responsable Programme Unité Prévention des Risques Accidentels	Responsable de l'Unité Prévention des Risques Accidentels	Directeur Direction des Risques Accidentels
<b>Date</b>	14/01/2008	14/01/2008	18/01/2008	22/01/2008
<b>Visa</b>	signé	signé	signé	signé

## TABLE DES MATIERES

<b>1. CORROSION DES MATERIAUX MÉTALLIQUES .....</b>	<b>7</b>
1.1 Généralités .....	7
1.2 Principe de la corrosion électrochimique .....	7
1.3 Potentiel d'électrode des métaux .....	9
1.4 Diagrammes de Pourbaix .....	11
<b>2. PROTECTION CATHODIQUE .....</b>	<b>13</b>
2.1 Moyens de lutte contre la corrosion humide – Choix de la protection cathodique .	13
2.2 Application de la protection cathodique dans l'industrie .....	13
2.3 Les revêtements associés à la protection cathodique .....	14
2.4 Potentiels de protection cathodique .....	16
2.5 Densité de courant de protection cathodique .....	17
2.6 Résistance des éléments .....	20
2.7 Protection cathodique par anodes sacrificielles et par courant imposé.....	20
2.7.1 Critères de choix.....	20
2.7.2 Protection par anodes sacrificielles .....	21
2.7.2.1 Principe de la protection .....	21
2.7.2.2 Choix des anodes sacrificielles.....	23
2.7.3 Systèmes de protection par courant imposé .....	25
2.7.3.1 Principes .....	25
2.7.3.2 Réalisation des soutirages.....	25
2.7.3.3 Composition typique d'un poste de soutirage .....	27
2.8 Facteurs de limitation d'efficacité de la protection cathodique .....	30
2.8.1 La continuité électrique insuffisante du système. ....	31
2.8.2 Perte d'adhérence des revêtements .....	31
2.8.3 Influence de la protection cathodique entre structures métalliques voisines.....	32
2.8.4 Influences d'une source de courant extérieure continu .....	32
2.8.5 L'influence d'une source de courant alternatif .....	32
2.9 Réservoirs enterrés et canalisations associées .....	33
2.10 Contrôles de protection cathodique .....	33
<b>3. CRITÈRES D'ÉVALUATION DES PERFORMANCES.....</b>	<b>35</b>
3.1 Critères de performance.....	35
3.1.1 Efficacité de la protection.....	35
3.1.2 Temps de réponse :.....	36

3.1.3 Niveau de confiance de la barrière .....	36
3.2 Maintenance préventive .....	36
<b>4. LISTE DE SPÉCIALISTES EN PROTECTION CATHODIQUE.....</b>	<b>37</b>
<b>5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>38</b>
<b>6. ANNEXES .....</b>	<b>39</b>



# 1. CORROSION DES MATERIAUX METALLIQUES

## 1.1 GENERALITES

La corrosion est le phénomène de dégradation d'un substrat métallique, sous l'action du milieu ambiant. Elle correspond au retour de la matière à son état le plus stable. Dans le cas du fer, par exemple, la forme stable dans la nature n'est pas le métal mais l'oxyde, c'est pourquoi une pièce en acier exposée sans protection à une atmosphère humide tend à se transformer en rouille (oxyde de fer hydratés).

Les phénomènes de corrosion sont généralement classés en deux grandes catégories :

- La corrosion électrochimique (ou corrosion humide)
- La corrosion à haute température (ou corrosion sèche)

Ce document n'abordera que la corrosion électrochimique pour laquelle **la protection cathodique** peut être efficace et ne concerne que les ouvrages enterrés ou immergés. Cette catégorie représente par ailleurs la grande majorité des problèmes de corrosion rencontrés car liée à la présence de l'eau au contact des métaux. C'est le cas en particulier des environnements naturels, tels que les eaux douces, l'eau de mer ou les sols. C'est aussi le cas de la plupart des milieux liquides de l'industrie, ainsi que des gaz conduisant à des condensations liquides contenant de l'eau (seulement si l'eau est acide ou contient de l'oxygène dissous).

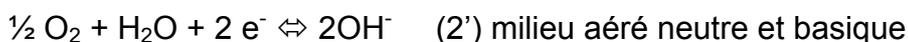
## 1.2 PRINCIPE DE LA CORROSION ELECTROCHIMIQUE

- La corrosion d'un métal comme le fer est la résultante d'un processus qui peut être schématisé par l'équation suivante :



Cette équation signifie simplement que les atomes du métal (Fe) sous l'action d'un processus de corrosion se transforment en ions positifs ( $\text{Fe}^{2+}$ ) qui quittent le métal pour passer dans le milieu. Il y a changement d'état de la matière lié à la **réaction de dissolution du métal**. Ce changement d'état s'accompagne de la libération d'électrons ( $2 \text{e}^-$  dans le cas du fer).

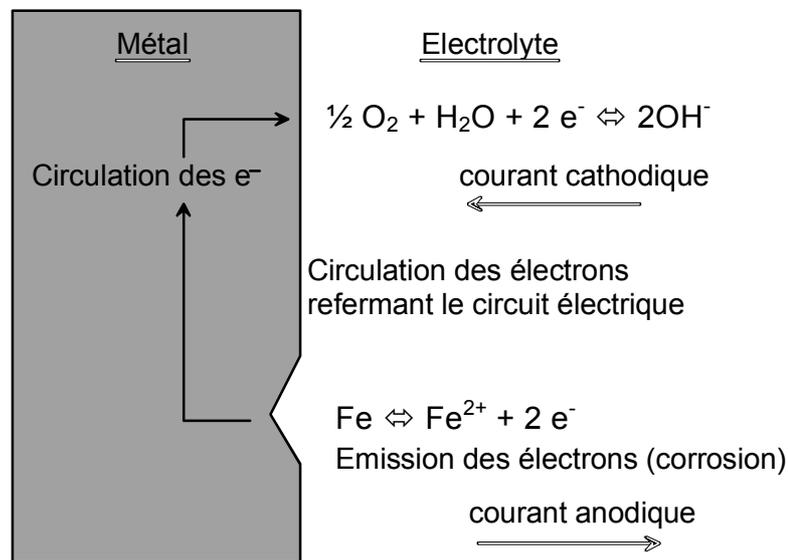
La conservation de la neutralité du milieu impose que les électrons émis par la réaction de dissolution (1) soient consommés dans une deuxième réaction qui peut être par exemple :



La deuxième réaction (2 et 2') est liée à la nature du milieu avec lequel le matériau est en contact (électrolyte). Cette réaction s'agit de la **décomposition du milieu**.

- Lors d'un processus de corrosion, la surface du matériau est donc nécessairement le siège de deux réactions :
  - Réaction de dissolution ou d'oxydation (réaction anodique);
  - La réaction de décomposition du milieu : « réduction » (réaction cathodique).

Le processus de corrosion, superposition des réactions anodiques et cathodiques, s'accompagne de la circulation d'un courant électrique (circulation d'électrons dans le métal et d'ions dans l'électrolyte) entre les deux zones de l'interface.



Note: Les électrons ne circulent que dans le métal

**Figure 1** Corrosion métallique du fer dans une eau neutre aérée

Les électrons libérés par l'anode (libération d'un ion Fe<sup>2+</sup> en solution) sont consommés par le processus cathodique. Pour ce faire, les électrons circulent dans le métal de l'anode vers la cathode dont le potentiel électrique est supérieur à celui de l'anode.

- Pour qu'un processus de corrosion se déclenche, il faut donc :
  - une surface métallique comportant des zones anodiques et des zones cathodiques, donc des hétérogénéités de potentiel;
  - un électrolyte assurant le transport des ions afin de refermer le circuit électrique pour permettre la circulation des électrons. L'électrolyte est assurée par le milieu (sol immergé, eau ...).

**Lorsque la corrosion est généralisée**, les différents points de la surface du métal sont successivement cathodiques et anodiques et la perte d'épaisseur

est globalement uniforme. Dans ce cas, la vitesse de corrosion peut être évaluée, par exemple, par la mesure de l'épaisseur ou de la perte du poids permettant ainsi d'estimer la durée de vie de la pièce concernée. Exemple de corrosion généralisée : enrouillement de l'acier dans les environnements naturels.

A la différence de la corrosion généralisée, les corrosions localisées proviennent de la localisation des zones anodiques en certains endroits de l'interface, pour des raisons d'hétérogénéité dans le métal (défauts du métal...) ou dans l'électrolyte. La pénétration de la corrosion est d'autant plus rapide que le rapport de la surface anodique sur la surface cathodique est faible (insuffisance de la protection par anodes sacrificielles...).

### 1.3 POTENTIEL D'ELECTRODE DES METAUX

Les échanges de courant électrique à l'interface métal-électrolyte sont régis par des différences de potentiel. A chaque réaction chimique correspond un potentiel dit d'électrode qui peut être déterminé par l'équation de Nernst :

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{\text{red}}}{a_{\text{ox}}}$$

$$\Leftrightarrow E = E^0 + \left( \frac{RT}{nF} \right) \ln \frac{a_{\text{ox}}}{a_{\text{red}}}$$

Où :

- $E^0$  correspond au **potentiel standard (ou normal)** de la réaction électrochimique. Par convention, le potentiel standard de la réaction :
 
$$2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \Leftrightarrow \text{H}_2$$
 est pris égal à zéro. L'électrode standard à hydrogène constitue l'électrode officielle de mesure des potentiels d'électrode.
- $R$  est la constante des gaz parfaits, égale à  $8,314570 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$
- $T$  est la température en Kelvin
- $a$  est l'activité chimique de l'oxydant et du réducteur (généralement égale à la concentration)
- $F$  est la constante de Faraday, égale à  $96\,485 \text{ C.mol}^{-1} = 1 \text{ F}$
- $n$  est le nombre d'électrons transférés dans la demi-réaction
- $[\text{ox}]$  est la concentration de l'oxydant
- $[\text{red}]$  est la concentration du réducteur

Le tableau suivant donne les **potentiels standards** des principales réactions électrochimiques :

Electrode		Potentiel par rapport à l'électrode d'hydrogène (V)
Or	Au /Au <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup>	+1,50 Métaux
Platine	Pt /Pt <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	+1,20 Nobles
Argent	Ag /Ag <sup>+</sup> + e <sup>-</sup>	+0,80
Oxygène	O <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O + 4e <sup>-</sup> /4OH <sup>-</sup>	+0,40
Cuivre	Cu /Cu <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	+0,34
Inox - Duplex		0 (après qq jours)
Hydrogène	2H <sup>+</sup> /H <sub>2</sub> + 2e <sup>-</sup>	0
Plomb	Pb /Pb <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	-0,13
Nickel	Ni /Ni <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	-0,26
Fer	Fe /Fe <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	-0,447
Chrome	Cr /Cr <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup>	-0,74
Zinc	Zn /Zn <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	-0,76
Titane	Ti /Ti <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	-1,63
Auminium	Al /Al <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup>	-1,66
Magnésium	Mg /Mg <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	-2,37

**Tableau 1** Potentiels standards

En pratique, l'échelle des potentiels est repérée à l'aide, non pas de l'électrode à hydrogène difficile à mettre en œuvre, mais d'une **électrode de référence** (par définition de potentiel propre connu et suffisamment stable dans les limites de l'emploi) telles que l'électrode au sulfate de cuivre en solution saturée Cu/Cu-SO<sub>4</sub> (pour les sols) ou l'électrode en argent/chlorure d'argent ou encore en zinc extra pur (pour l'eau de mer).

Lorsqu'un métal est plongé dans un électrolyte, il prend un potentiel qui est fonction de sa nature et du milieu.

Le tableau ci-après donne en exemple les potentiels que prennent certains métaux dans un sol type par rapport à l'électrode au sulfate de cuivre.

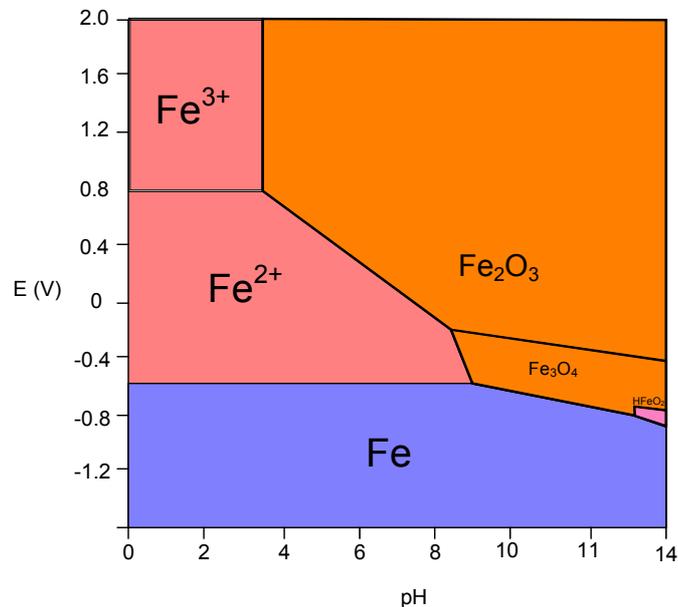
Matériau	Potentiel (V)
Graphite	+0.1
Fonte à forte teneur en silicium	+0.1
Cuivre, laiton et bronze	+0.1
Fonte	-0.2
Acier doux rouillé	+0.1 à -0.2
Acier doux propre	-0.5 à -0.2
Aluminium	-0.5
Zinc	-0.8
Magnésium	-1.3

**Tableau 2** Potentiels des métaux par rapport à l'électrode Cu/Cu-SO<sub>4</sub>

Le potentiel du métal et le pH du milieu environnant sont les paramètres sur lesquels les méthodes électrochimiques de protection peuvent agir. L'influence de ces paramètres dans l'état d'un métal est schématisée dans **les diagrammes de Pourbaix**.

## 1.4 DIAGRAMMES DE POURBAIX

Les **diagrammes de Pourbaix**, aussi appelés diagrammes potentiel-[pH], indiquent sur un plan E-pH les domaines d'existence ou de prédominance d'un élément. Ils sont construits à partir de **données thermodynamiques**. La figure 2 donne l'exemple d'un diagramme **simplifié** de Pourbaix du fer.



**Figure 2** Diagramme de Pourbaix du fer (à 25°C)

Selon le diagramme de la figure 2, le fer peut se trouver dans trois états thermodynamiques suivant son potentiel et le pH de la solution dans laquelle il est immergé :

- **Passivation thermodynamique** s'il se trouve dans les domaines de stabilité des hydroxydes ferreux ou ferrique ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ );
- **Activité ou corrosion** dans les domaines de stabilité des ions ferreux et ferrique ( $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  et  $\text{HFe}$  vers les pH extrêmes);
- **Immunité** dans le domaine du diagramme correspondant à la stabilité du fer ( $\text{Fe}$ ).

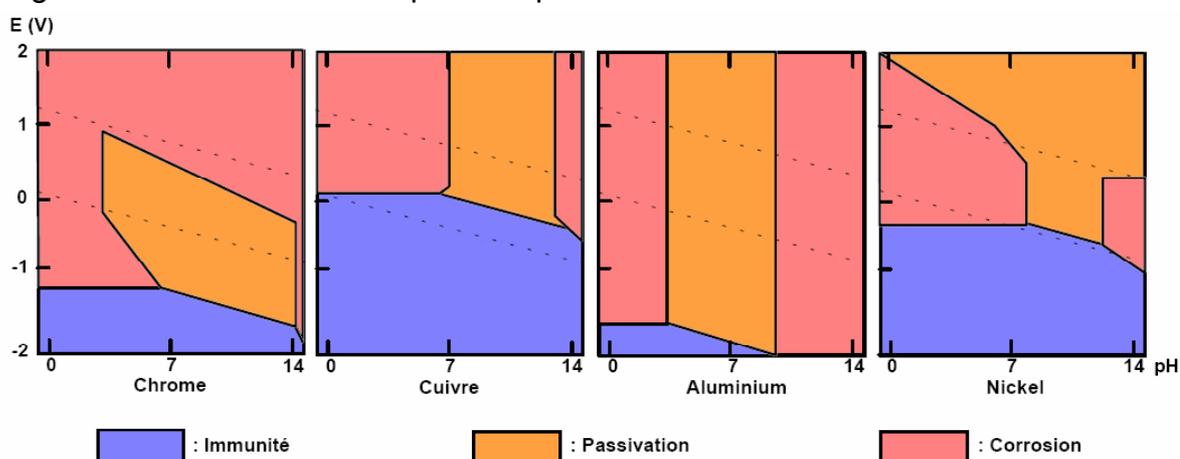
Dans l'état **d'immunité**, le métal et le milieu ambiant sont dans un état de **stabilité thermodynamique** : ils ne peuvent réagir et par conséquent, la corrosion n'est pas possible. Cette situation se rencontre naturellement avec les métaux nobles (potentiel bien supérieur à celui de l'électrode d'hydrogène. Cf. tableau 1).

Dans l'état de **passivité**, le métal et le milieu ne sont pas dans un état de stabilité thermodynamique, mais le métal se recouvre naturellement d'un film protecteur qui l'isole du milieu extérieur. Ce film (couche passive) doit être thermodynamiquement stable vis à vis du milieu extérieur et ne pas présenter de faiblesse localement. Dans le cas contraire, le métal se corrompt localement. Dans

la pratique en situation courante, l'acier inoxydable et le titane, par exemple, doivent leur résistance à la corrosion à leur comportement passif.

Dans l'état **d'activité**, le métal n'est pas stable thermodynamiquement, et n'est pas recouvert d'un film protecteur : il réagit avec son environnement et se corrode.

On retrouve ces trois comportements dans les diagrammes de Pourbaix du chrome, du cuivre, de l'aluminium et du nickel donnés en exemple dans la figure 3. Il est à noter que les diagrammes de Pourbaix sont construits à partir de données thermodynamiques : ils n'apportent donc aucune donnée quant à la vitesse des réactions de transformations qu'ils peuvent indiquer, comme par exemple la formation de complexes passivants à l'interface du métal. Ces diagrammes ne doivent donc pas être pris dans un sens absolu.



L'examen de ces quelques diagrammes de Pourbaix permet de comprendre qu'en **abaissant le potentiel** d'un métal à un niveau d'immunité, la corrosion du métal peut être contrée : c'est le principe de la **protection cathodique**.

En se référant au processus électrochimique de corrosion présenté à la figure 1, **la protection cathodique consiste à abaisser le potentiel électrochimique d'un métal pour que seules les réactions cathodiques puissent avoir lieu à sa surface**. Cet abaissement de potentiel est obtenu en injectant un courant extérieur à la surface du métal pour le polariser.

## **2. PROTECTION CATHODIQUE**

### **2.1 MOYENS DE LUTTE CONTRE LA CORROSION HUMIDE – CHOIX DE LA PROTECTION CATHODIQUE**

Dans les conditions de corrosion humide, il est rarement possible d'utiliser des revêtements avec des métaux nobles qui ne se corrodent pas, pour des raisons économiques. Le problème est donc de combattre la corrosion intrinsèque des métaux et alliages que l'on utilise. Il existe certaines méthodes contre la corrosion humide établies à partir des principes électrochimiques. D'autres méthodes consistent à isoler le métal de son environnement ou à utiliser des additifs chimiques en traitement de surface tels que les inhibiteurs de corrosion ou les bactéricides. Le succès de celles-ci dépend de la résistance chimique ou électrochimique des isolants et des additifs chimiques. Dans certaines situations il est parfois possible de rendre le milieu moins corrosif en agissant sur certains paramètres physico-chimiques tels que la température, le pH (alcalinisation), le dégazage ...

Le choix de la méthode de protection n'étant pas aisé du fait qu'aucune méthode n'est universellement applicable, le choix se fait d'une part selon le milieu environnant, d'autre part, selon les considérations économiques. Ces dernières n'incluent pas seulement le coût initial de mise en œuvre, mais aussi le coût de la maintenance tels que le remplacement des parties corrodées et dans certains cas le renouvellement de la protection. Une des méthodes les plus utilisées industriellement est la **protection cathodique** qui s'avère généralement peu coûteuse et efficace sur une longue durée **lorsque cette technique est maîtrisée et accompagnée d'une bonne connaissance des conditions environnantes.**

Une autre méthode de protection électrochimique est la protection anodique qui consiste à maintenir le potentiel d'un alliage passivable dans un domaine de passivité stable (cf. figure 2), en élevant son potentiel sous l'effet d'un faible courant anodique. Cette méthode est peu utilisée car son application est soumise à des limitations importantes : contrairement à la protection cathodique, on ne peut pas appliquer cette protection sur toute l'échelle des pH, et de plus elle peut être altérée si le film de passivation est détruit, c'est à dire si les ions chlorures sont présents.

### **2.2 APPLICATION DE LA PROTECTION CATHODIQUE DANS L'INDUSTRIE**

Ses applications industrielles principales concernent les canalisations enterrées ou immergées, les réservoirs enterrés, les intérieurs de capacités, en association avec une protection passive par systèmes de peintures ou revêtements spéciaux. Elle est aussi largement utilisée en milieu marin : protection des navires, des bouées, des ouvrages portuaires et des plates-formes offshore. Cette technique se développe dans les nouveaux secteurs comme les ouvrages aériens en béton armé ou précontraint (tabliers de ponts , piliers).

Il est à noter que dans les sites classés concernés par l'arrêté du 22 juin 1998 relatif aux réservoirs enterrés de liquides inflammables et de leurs équipements annexes, la protection n'est reconnue comme alternative à la double paroi que

pour les canalisations lorsque les produits circulent par gravitation ou par gravité. Les systèmes de protection installés sont généralement à courant imposé.

## 2.3 LES REVETEMENTS ASSOCIES A LA PROTECTION CATHODIQUE

### □ Intérêt des revêtements associés à la protection cathodique

La protection cathodique est systématiquement utilisée dans un système duplex qui associe une protection passive et une protection active. La protection cathodique n'entre en fonction que s'il y a un défaut de revêtement et une partie de métal en contact direct avec l'électrolyte (sol ou eau).

Les revêtements sont souvent associés à la protection cathodique afin de :

- offrir une protection supplémentaire contre la corrosion et de façon "passive",
- aider la protection cathodique dans les rôles suivants :
  - limiter le courant consommé,
  - réduire la consommation des anodes,
  - assurer une polarisation plus rapide,
  - assurer une portée de la protection cathodique dans les structures complexes,
  - assurer une meilleure répartition du courant dans la structure,
  - réduire le coût global de la protection.

### □ Choix des revêtements

Il convient de choisir des revêtements compatibles avec leur situation :

- une adhérence parfaite et pérenne sur la structure,
- un pH du milieu rendu alcalin.

Dans les règles de sécurité en France, pour les canalisations de produits pétroliers liquides (arrêté du 21 avril 1989), de gaz combustible (arrêtés du 11 mai 1970 et du 13 juillet 2000) ou d'autres fluides du type produits chimiques (arrêté du 6 décembre 1982), la protection cathodique est réalisée systématiquement **en supplément d'un revêtement organique**. Par ailleurs, les canalisations d'eau potable, d'irrigation ou d'alimentation d'enneigement artificiel sont de plus en plus protégées avec cette technique.

Dans les centres de dépôt de GPL, les réservoirs mis sous talus sont protégés cathodiquement **en conjonction avec un revêtement**.

Les dessous de réservoirs aériens verticaux sont parfois protégés cathodiquement en préventif ou en curatif, en liaison avec un **enduit bitumineux ou une peinture**. L'efficacité de la protection dépend grandement du contact avec le sol ou l'eau et de l'emplacement des anodes.

La **peinture** n'est pas retenue pour les ouvrages enterrés.

Le revêtement protecteur utilisé dépend du diagnostic des conditions d'exposition. Il existe un choix considérable et il est difficile de les comparer tant les opinions diffèrent, les expériences varient et les progrès continuent.

Il est à noter qu'un mauvais choix de revêtement peut conduire à des cloquages et parfois, à des décollements importants dû à l'alcalinisation du milieu, à la température du fluide transporté et au dégagement d'hydrogène en surface.

#### □ Effet sur la protection cathodique

La protection cathodique associée avec les revêtements doit tenir compte:

- des pourcentages de défauts de revêtement apparaissant dans le temps,
- du vieillissement du film.

Ces facteurs sont à prendre en compte dans les calculs de courant à corriger d'année en année.

#### □ Précautions dans la mise en œuvre des revêtements de canalisation

Lorsque l'on pose des conduites, la procédure de protection dépend de l'agressivité des sols. Dans la plupart des cas, les conduites sont revêtues par des systèmes multicouches épais (polyéthylène, polypropylène, époxy) **posés en usine**. Seuls les revêtements des zones de soudure sont **appliqués sur site**.

Les conduites sont posées dans des tranchées préparées, le fond de fouille est soit recouvert de sable soit du terrain d'origine concassé pour **ne pas agresser le revêtement**. Dans les sols particulièrement durs, il est possible **de renforcer la protection mécanique** par des revêtement type BIDIM, voire de passer la canalisation en fourreau laissant passer les courants de protection cathodique. Les facteurs qui définissent le choix sont par exemple : le sol est-il sujet à des variations de charge ? Le sol contient-il des roches dures qui peuvent s'appuyer contre la conduite ?

Il est important de noter que les conduites doivent être posées avec beaucoup d'attention pour **ne pas endommager les revêtements** (cf. figure 4).



**Figure 4** Exemple de revêtement blessé sans toutefois aucune trace de corrosion après 50 ans.

## 2.4 POTENTIELS DE PROTECTION CATHODIQUE

### □ Principe de la protection

La corrosion des métaux au contact des milieux aqueux (eaux, sols, béton) est de nature électrochimique (cf. §1). Dans ces milieux, l'application de la technique de la protection cathodique a pour but de **diminuer le potentiel de polarisation du métal à un niveau pour lequel la vitesse de corrosion du métal est réduite de façon significative**. Le seuil de protection cathodique peut être déterminé thermodynamiquement. Il correspond **au seuil d'immunité** tel que représenté dans les diagrammes de Pourbaix (figures 2 et 3) correspondant à un état à partir duquel la corrosion devient théoriquement impossible.

### □ Influence du milieu

Le seuil de protection cathodique dépend du milieu au contact duquel l'équipement est en contact.

Il est toutefois difficile de définir théoriquement le seuil de protection cathodique d'un métal dans un milieu donné (impossibilité de tracer avec précision la courbe individuelle de polarisation anodique, calcul thermodynamique basé sur l'hypothèse d'équilibre de la teneur en cation métallique avec le métal dans le milieu corrosif). Les critères pratiques sont donc basés sur l'expérience pour contrôler la corrosion d'une surface métallique en transformant cette surface en la cathode d'une cellule électrochimique.

Le tableau 4 donne les domaines de potentiel généralement recommandés, pour différents métaux dans différents milieux [1].

METAL	Domaines de protection préconisés	
	Dans les sols (électrode Cu/Cu-SO <sub>4</sub> )	En eau de mer (électrode Ag/Ag-Cl)
Acier et carbone:		
1) Environnement aérobie	< -0,85 V	< -0,80 V
2) Environnement anaérobie	< -0,95 V	< -0,90 V
Alliages cuivreux	< -0,50 V à -0,65 V	< -0,45 V à -0,60 V
Aluminium	Entre -0,95 V et -1,20 V	Entre -0,90 V et -1,15 V
Plomb	Entre -0,60 V et -1,50 V	Entre -0,55 V et -1,45 V

**Tableau 4** Domaines de potentiels de protection préconisés

#### □ Contrôle des mesures de potentiel sur site

La mesure du potentiel électrochimique d'une structure sous protection cathodique doit être effectuée avec l'électrode de référence **la plus proche possible du point à contrôler et à courant coupé** (les courants de protection cathodique doivent être coupés quelques secondes au moment de la mesure pour éliminer les chutes de tension ou chutes ohmiques générées par ces courants lorsqu'ils circulent dans le sol). Certaines recommandations précisent même que la lecture doit être effectuée rapidement après coupure de courant pour annuler cette erreur.

#### □ Autres paramètres modifiant le potentiel de protection requis

A l'instar de la norme **NF EN 12954**, la norme **ISO 13623** "Industries du pétrole et du gaz naturel – Systèmes de transport par conduites" fait varier le critère de protection avec la **résistivité du terrain** (et le potentiel de corrosion libre) : le seuil acceptable est de  $-0,75\text{V/ Cu/Cu-SO}_4$  saturé dans le cas d'un sol sableux aéré dont la résistivité est comprise entre 100 et 1000  $\Omega\cdot\text{m}$  et de  $-0,65\text{V/ Cu/Cu-SO}_4$  saturé pour des valeurs de résistivité supérieures à 1000  $\Omega\cdot\text{m}$ .

Le seuil de protection doit être abaissé à  $-0,95\text{ V/ Cu/Cu-SO}_4$  ou  $-0,90\text{ V/ Ag/Ag-Cl}$  -eau de mer en cas de **milieu anaérobie** (favorable au développement de bactéries sulfurogènes), cette valeur étant déterminée à l'aide de l'étude des équilibres tension-pH afin d'autoriser une passivité de l'acier en présence de sulfures.

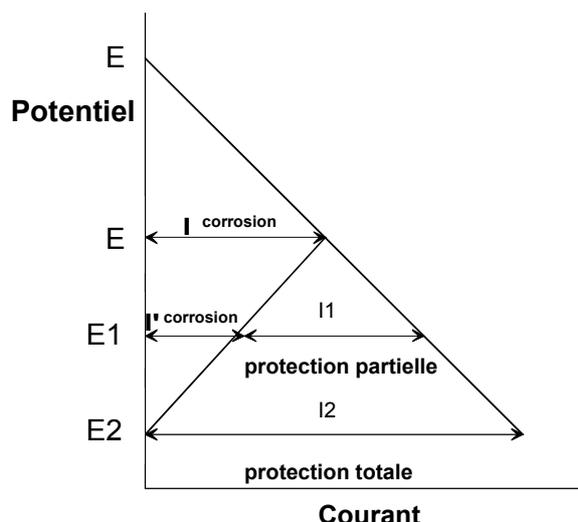
Pour d'autres métaux courants, les valeurs de potentiel de corrosion et de potentiel de protection à appliquer suivant le milieu sont données dans la norme **NF EN 12954** : « Protection des structures métalliques enterrés ou immergées – Principes généraux et application pour les canalisations ».

**En général, les seuils de protection varient et les recommandations sont fournies par des normes et documents professionnels.** Pour des matériaux à l'état passif mais risquant des corrosions localisées (piqûres, corrosion caverneuse, corrosion sous tension) le niveau de protection cathodique peut être défini par rapport au **potentiel de piqûre** : c'est par exemple le cas des aciers inoxydables en milieu chloruré ou celui de l'acier enrobé de béton.

## 2.5 DENSITÉ DE COURANT DE PROTECTION CATHODIQUE

#### □ Principe de la détermination de la densité de courant pour atteindre le potentiel de la protection cathodique

La dissolution du métal se fait dans un processus anodique. On a vu théoriquement que si le potentiel d'un objet qui se corrode est amené jusqu'au potentiel de la protection cathodique, alors la dissolution s'interrompt puisque thermodynamiquement la réaction devient impossible. Il en résulte une perte de poids nulle. **Pour atteindre le potentiel correspondant au seuil de la protection cathodique, la surface entière de l'objet doit être parcourue par un courant s'exprimant en densité de courant ( $\text{A/m}^2$ ).** Cette situation est décrite à la figure 5.



**Figure 5** Densité de courant et potentiel de la protection cathodique.

Dans les conditions de corrosion libre, la structure métallique a un potentiel de corrosion mixte  $E$  et se corrode à une vitesse proportionnelle à  $I_{\text{corrosion}}$ . Si l'on applique la polarisation cathodique afin que le potentiel de la structure diminue jusqu'à  $E_1$  par le courant  $I_1$  appliqué extérieurement, alors l'objet est partiellement protégé, puisque la vitesse de corrosion a diminué et vaut  $I'_{\text{corrosion}}$ . Si l'on augmente le courant extérieur jusqu'à  $I_2$  pour que le potentiel descende à  $E_2$  correspondant au potentiel réversible de la réaction anodique, alors la dissolution anodique sera stoppée. L'objet est alors sous protection cathodique.

□ **Paramètres jouant sur la densité de courant**

La densité de courant nécessaire à l'obtention du seuil de protection est fonction du **matériau à protéger** (nature de l'équipement, présence d'un revêtement...) et des **paramètres physico-chimiques de l'électrolyte** au contact de celui-ci (présence de  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ , corrosivité du milieu...).

Il faut également considérer le **facteur temps** (présence de dépôts pouvant se réduire, dégradation des revêtements...).

Ainsi, pour les aciers non alliés ou faiblement alliés, la densité de courant peut varier sensiblement au cours du temps dans les **milieux qui contiennent en  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$**  (typiquement dans l'eau) : **il se forme des dépôts calco-magnésiens** (sorte de dépôt calcaire offrant une protection supplémentaire) par suite de l'alcalinisation du milieu à proximité de la surface. Dans ces conditions, le courant de polarisation requis pour une protection totale  $I_2$  diminue, puisque sa fonction principale n'est plus que de réparer les fissures du dépôt protecteur. Même si une telle interaction n'a pas lieu, l'augmentation de l'alcalinité qui résulte de la protection cathodique fournit une protection supplémentaire, puisque le fer n'a pas tendance à se corroder en présence modérée d'alcalins. **Pendant que la surface du métal se recouvre d'un film protecteur, la valeur du courant de polarisation baisse.** Cependant, **le dépôt formé peut également se dégrader** (par exemple en cas de nettoyage de la surface ou de tempête sur les ouvrages offshore) et **la densité de courant doit alors être augmentée.**

De ce fait, on distingue souvent la **densité de courant initiale** (nécessaire à la polarisation jusqu'au seuil de protection), de la **densité de courant de repolarisation** en cas de dégradation du pouvoir protecteur du dépôt calcaire

Lorsque la protection cathodique est appliquée en conjonction avec un **revêtement** (cf. § 2.3), les calculs du besoin en courant doivent prendre un **coefficient de dégradation qui varie généralement au cours du temps**. Pour les canalisations enterrées ou immergées, la mesure de la dégradation s'effectue sous forme d'une diminution de la résistance d'isolement qui dépend aussi de la résistivité du sol et de la corrosivité du milieu électrolytique environnant.

L'ordre de grandeur des valeurs prises dans les calculs de dimensionnement des systèmes de protection cathodique **en fonction des milieux électrolytiques** au contact **de l'acier** est donné dans le **tableau 5**. Des valeurs plus détaillées en fonction des conditions d'environnement et de service sont fournies dans les normes et les référentiels professionnels.

Milieu électrolytique	Densité de courant
<b>Sols :</b>	
a) sol sec	10 mA/m <sup>2</sup>
b) sol humide agressif	jusqu'à 30 mA/m <sup>2</sup>
<b>Acier enrobé de béton :</b>	0,1 mA/m <sup>2</sup> (prévention)
a) béton de bonne qualité	1 mA/m <sup>2</sup>
b) béton dégradé	10 mA/m <sup>2</sup> (curatif)
<b>Eaux douces :</b>	
a) eau froide en mouvement	150 mA/m <sup>2</sup>
b) eau chaude aérée	50 mA/m <sup>2</sup>
<b>Eau de mer</b>	60 à 220 mA/m <sup>2</sup>
<b>Fonds marins</b>	25 mA/m <sup>2</sup> (initial) 20 mA/m <sup>2</sup> (maintien)

*Tableau 5 Dimensionnement des densités de courant en pratique*

## 2.6 RÉSISTANCE DES ÉLÉMENTS

Le dimensionnement des systèmes de protection doit tenir compte de la **résistance électrique des éléments qui les composent**. Pour cela, la résistance opposée au courant par l'électrolyte doit être évaluée. Les lignes de courant étant généralement très concentrées autour des anodes, on parle de "résistance d'anode". On la calcule à partir de la résistivité de l'électrolyte l'environnant et de la géométrie de l'anode.

Dans le cas où la structure est longiligne (par exemple, une conduite) et que les points de connexion avec les anodes ou les soutirages de courant sont espacés, il faut tenir compte de la **résistance électrique de la structure elle-même** qui provoque un effet d'atténuation du courant. Les calculs s'effectuent alors en utilisant la notion de résistance d'isolement de la structure. Dans la majorité des cas, ces calculs font intervenir des formules connues et couramment appliquées par les spécialistes de la profession (standards de géométrie des anodes, des hypothèses pour les résistances d'isolement).

## 2.7 PROTECTION CATHODIQUE PAR ANODES SACRIFICIELLES ET PAR COURANT IMPOSE

### 2.7.1 CRITERES DE CHOIX

Pour modifier le potentiel du métal à protéger cathodiquement, on utilise une anode installée dans le même électrolyte. Les anodes peuvent être de deux types :

- soit des anodes ayant un potentiel plus électronégatif que le métal à protéger (**anode galvanique ou sacrificielle**),
- soit des anodes couplées à un générateur de courant imposant une différence de potentiel entre les deux métaux (méthode à **courant imposé**).

Le choix d'un système par rapport à un autre doit être établi en tenant compte des comparaisons techniques (cf. tableau 6 [2]) et des critères économiques (conception, équipement, installation, maintenance, consommation en matière et en énergie).

	<b>Anode galvanique ou sacrificielle</b>	<b>Système à courant imposé</b>
Complexité de l'installation	Simple	Complexe
Source d'énergie	Non nécessaire	Nécessaire
Distribution du courant sur la structure	Homogène	Souvent hétérogène
Poids de la structure	Importante surcharge en poids pour des longues durées de vie	Peu d'accroissement
Influence de la résistivité du milieu	Non envisageable si la résistivité du milieu est trop grande	Pas de difficulté
Débit par anode	Faible	Elevé
Nombre d'anodes	Important	Faible
Facilité d'adapter le courant consommé en fonction de la demande	Adaptation possible à travers une liaison résistante	Adaptation facile
Risque de surprotection	Pratiquement aucun	Possible
Interférence avec d'autres structures	Non	Possible
Risques humains	Non	Possible (poste de soutirage)
Surveillance	Aisée et occasionnelle	Surveillance fréquente requise par un spécialiste

**Tableau 6** Comparaison entre les deux systèmes de protection

## 2.7.2 PROTECTION PAR ANODES SACRIFICIELLES

### 2.7.2.1 PRINCIPE DE LA PROTECTION

La protection cathodique par anodes sacrificielles a pour but de mettre à profit l'effet du couple galvanique (pile) créée par l'**association, dans un même électrolyte, de deux métaux différents** : le métal à protéger et un métal moins noble qui constitue l'anode.

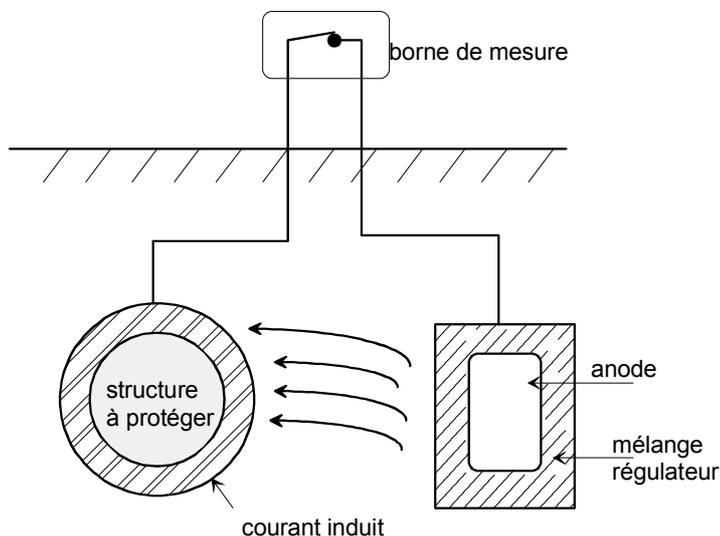


**Figure 7** Anodes sacrificielles



**Figure 8** Pose d'une anode prébackfillée

Dans ce type de protection, l'anode se consomme par dissolution en portant la surface du métal à protéger au-delà de son potentiel d'immunité. La réalisation est schématisée dans les figures 9 et 10.

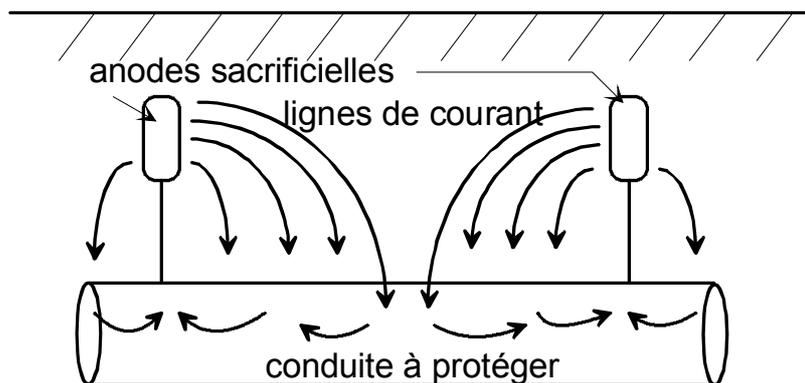


**Figure 9** Principe de la protection cathodique par anodes sacrificielles

Pour que la protection existe, il faut :

- que la pile débite, donc que l'anode soit reliée électriquement au métal,
- que la surface à protéger et l'anode soient plongées toutes dans le même milieu électrolytique,
- que l'installation soit adaptée à la surface à protéger (dimensions, nombre, répartition des anodes).

**La protection par anodes sacrificielles n'a pas une durée indéfinie.** Elle s'arrête avec la disparition du matériau sacrificiel ou par blocage électrochimique. L'évaluation de sa durée de vie est estimée par calcul du dimensionnement des anodes et par retour d'expérience, généralement une quinzaine d'années.



**Figure 10** Répartition des anodes sacrificielles le long d'une conduite

### 2.7.2.2 CHOIX DES ANODES SACRIFICIELLES

Il existe plusieurs types d'anodes dont les caractéristiques et les applications sont différentes. Le tableau 7 résume les principales caractéristiques (valeurs typiques) des anodes les plus utilisées, avec les avantages et inconvénients de chacune [1].

Dans le cas de la protection de **l'acier**, les anodes utilisées sont à base **de zinc, d'aluminium ou de magnésium**. Des études et l'expérience ont permis de déterminer, pour chacun des métaux les seuils d'impureté admissibles ainsi que les éléments d'alliage complémentaires nécessaires pour obtenir les meilleures performances. De nombreux alliages spécifiques pour la protection cathodique existent aujourd'hui sur le marché.

	Anode à base de zinc	Anode à base d'aluminium à l'indium	Anode à base de magnésium
<b>Potentiel en charge (V)</b>	-1 à -1,05 en eau de mer -1,10V à terre	-1,05	-1,4 à -1,5 (type standard) -1,6 à -1,7 (type haut potentiel)
<b>Capacité pratique (Ah/Kg)</b>	780 en eau de mer 740 à terre	2600	1100 (type standard) 1230 (type HP)
<b>Consommation pratique (Kg/A.an)</b>	11,2 en eau de mer 11,9 en terre	3,4	6,5 à 8
<b>Rendement électrochimique (%)</b>	95 en eau de mer 90 à terre	87	55
<b>Application</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Conduites enterrées de faible longueur</li> <li>▪ Ouvrages immergés</li> <li>▪ Capacités métalliques (intérieur ou extérieur)</li> <li>▪ Réservoirs sous talus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Plates-formes offshore</li> <li>▪ Conduite offshore chaude</li> <li>▪ Capacités métalliques (intérieur)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Conduites enterrées sur de faibles longueurs</li> <li>▪ Conduites offshore sur plusieurs Km à partir des plates-formes</li> <li>▪ Prépolarisation d'ouvrages offshore permettant de réduire la quantité d'anodes d'aluminium devant prendre le relais</li> <li>▪ Réservoirs sous talus</li> </ul>
<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Potentiel bien adapté à la protection des structures compactes en eau de mer</li> <li>▪ Comportement sûr dans les conditions diverses de fonctionnement (sol, eau de mer, vase, milieux confinés)</li> <li>▪ Excellent rendement</li> <li>▪ Peu sensibles aux salissures marines</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Coût de l'A/an le plus faible (forte capacité pratique)</li> <li>▪ Potentiel bien adapté à la protection des structures complexes en eau de mer</li> <li>▪ Utilisation possible dans les citernes des tankers (pas d'étincelle en cas de chute)</li> <li>▪ Reste active aux températures élevées avec toutefois une chute du rendement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Portée élevée (fort potentiel)</li> <li>▪ Polarisation rapide de la structure (précipitation du dépôt calco-magnésien en eau de mer)</li> <li>▪ Faible poids spécifique</li> </ul>
<b>Inconvénients</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Portée limitée (faible potentiel)</li> <li>▪ Température d'utilisation limitée à 60 °C</li> <li>▪ Coût A/an</li> <li>▪ Poids spécifique élevé</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Moins adaptée dans les milieux faiblement renouvelés (chute de rendement en cas d'acidification du milieu)</li> <li>▪ Vulnérable aux salissures marines</li> <li>▪ Déconseillé pour la protection des ouvrages entièrement peints car il y a risque de passivation si l'anode n'est que faiblement sollicitée.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Force électromotrice parfois surabondante pour la protection en eau salée (surconsommation, risque de cloquage de la peinture)</li> <li>▪ Faible durée de vie (remplacement fréquents nécessaires)</li> <li>▪ Rendement médiocre en eau de mer</li> <li>▪ Coût de l'A/an le plus élevé</li> </ul>

**Tableau 7** Comparaison des différents types d'anodes sacrificielles

Note: les potentiels sont donnés par rapport à l'électrode de référence Ag/Ag-Cl/Eau de mer et à l'électrode Cu/Cu-SO<sub>4</sub> saturé pour la terre.

## 2.7.3 SYSTEMES DE PROTECTION PAR COURANT IMPOSE

### 2.7.3.1 PRINCIPES

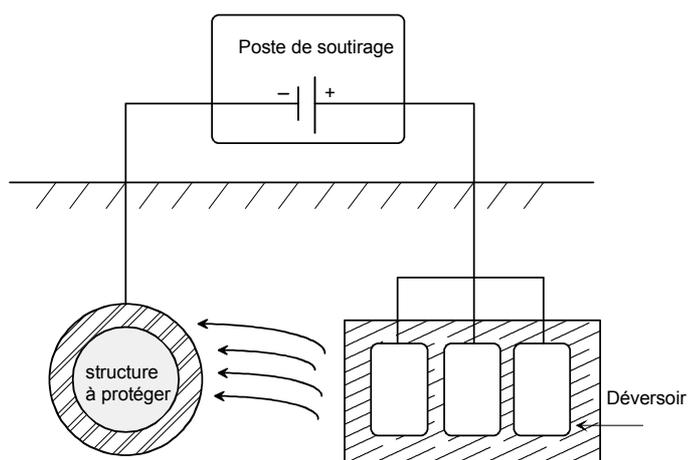
La protection par courant imposé (ou de soutirage) utilise une source d'énergie électrique en courant continu qui débite dans un circuit comprenant :

- Un déversoir (ou masse anodique),
- L'électrolyte (sol ou eau),
- La structure à protéger.

Le pôle positif de la source est relié au déversoir alors que le pôle négatif est relié à la structure à protéger.

Le courant venant du déversoir traverse l'électrolyte, puis entre dans la structure créant ainsi un abaissement de potentiel recherché correspondant à l'immunité du métal.

Par exemple, pour de l'acier dans un sol type, la différence de potentiel (ddp) entre l'électrode de référence au sulfate de cuivre saturé est inférieure à  $-0,850$  V en tous points de la structure. En général, la valeur limite inférieure que l'on cherche à atteindre est d'environ  $-1$  V.



**Figure 11** Principe de la protection cathodique à courant imposé

### 2.7.3.2 REALISATION DES SOUTIRAGES

#### □ Paramètres pour le dimensionnement de la protection

Le dimensionnement de la protection cathodique est une affaire de spécialiste. Néanmoins, il est utile de donner quelques principes de base.

Il s'agit tout d'abord de mesurer, quand cela est possible, mais le plus souvent d'estimer par le calcul, **le besoin en courant cathodique de la structure, c'est à dire le courant qu'elle doit recevoir pour que le seuil de protection soit atteint.** Il s'agit d'utiliser des hypothèses déduites de l'expérience. Le tableau 5 donne les valeurs de densité de courant cathodique couramment utilisées dans les sols ou dans l'eau de mer pour l'acier au carbone.

Le besoin en courant de protection sert à la détermination de la masse et du nombre d'anodes, ainsi qu'au dimensionnement électrique de la source de courant du poste de soutirage (protection par courant imposé). Le courant délivré doit être estimé au mieux, non seulement pour des considérations économiques, mais aussi à cause de certains effets néfastes tel que le décollement des revêtements lorsque le courant est trop important.

Dans un système à courant imposé, la protection cathodique se définit par les paramètres suivants :

- La densité de courant de protection (cf. §2.5), qui est l'intensité par unité de surface, dépendant essentiellement de la qualité de l'isolement du revêtement et de l'agressivité du milieu environnant;
- Les caractéristiques du générateur, définies ci-après.

Le débit du générateur de courant I est défini par la loi d'ohm :

$$I=U/R$$

où U tension du générateur de courant continu et R résistance du circuit.

- La tension U se situe dans la catégorie basse tension (TBT) où la tension est en général de 48V, mais peut atteindre dans certains cas 120 V continu (EN C 15-100). Les générateurs utilisés peuvent fonctionner suivant plusieurs modes en fonction du besoin, soit à courant constant soit à tension constante. Il est possible sous certaines conditions de piloter l'appareil avec une consigne prise sur une électrode de référence permanente.
- La résistance du circuit est en général conditionnée par la résistance de la masse anodique. Il y a donc intérêt à obtenir pour cette masse anodique une résistance aussi faible que possible pour éviter les pertes. Toutefois, dans certains cas, la résistance de contact avec l'électrolyte autour de la structure (le sol par exemple) n'est pas négligeable et doit être prise en compte dans la valeur de résistance du circuit.

#### □ Détermination pratique des paramètres

Avant la réalisation du soutirage, une bonne pratique est de procéder à un **essai *in situ* au moyen d'une installation provisoire**. Les résultats servent ensuite à définir l'installation. Connaissant le courant à débiter par le poste de soutirage, on peut fixer ses caractéristiques en appliquant un coefficient de sécurité qui tient compte, en particulier, du vieillissement du revêtement, des défauts possibles, et d'éventuelles modifications à venir de la structure protégée.

Lors de la conception du système, il est important de noter que :

- Certains revêtements ne supportent pas des potentiels de protection trop négatifs,

- La répartition de postes de soutirage peut s'avérer dans certains cas nécessaire pour protéger les structures de grande longueur, connaissant le caractère exponentiel de l'atténuation en fonction de la longueur.

#### □ **Implantation des postes de soutirage**

L'implantation d'un poste de soutirage doit tenir compte des critères pratiques suivants :

- Possibilité d'occupation du sol,
- Terrain de faible résistivité,
- Stabilité du terrain d'accueil,
- Risque d'inondation, ou d'écoulement des eaux sur le terrain pouvant pénétrer dans le poste de soutirage,
- Disponibilité et coût de l'alimentation en énergie électrique,
- Facilité d'accès pour la maintenance et la surveillance humaine.
- Si possible, éviter l'installation du poste de soutirage à l'extrémité d'une conduite donnant lieu à une mauvaise répartition des potentiels et donc, une mauvaise utilisation du poste.

#### 2.7.3.3 COMPOSITION TYPIQUE D'UN POSTE DE SOUTIRAGE

Un poste de soutirage comprend *a minima* (cf. figure 12) :

- Une source d'énergie,
- Un déversoir,
- Des câbles de liaison,
- Un appareillage électrique auxiliaire.

et peut être complété par des dispositifs complémentaires.

Etant accessible par le personnel de maintenance, il doit se conformer aux réglementations de sécurité électrique en vigueur.

En pratique, **la source d'énergie** peut être apportée par :

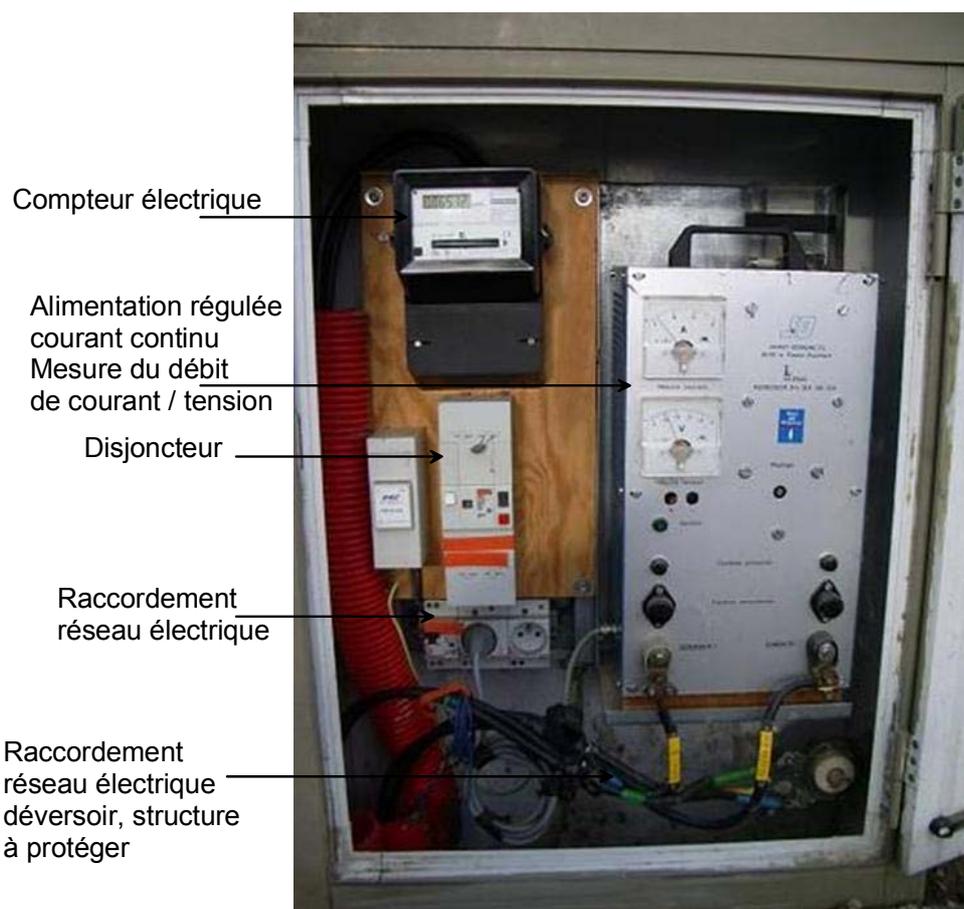
- Le réseau local de distribution,
- Des panneaux solaires, associés à des batteries électriques en tampon (fonctionnement de nuit),
- Des groupes électrogènes,
- Des turbogénérateurs,
- Des générateurs thermoélectriques,
- Des éoliennes,
- Des piles à durée de vie limitée à quelques années.

Le **déversoir** utilisé est une masse de matériau conducteur d'électricité dont le rôle est d'injecter le courant dans le milieu où se trouve la structure à protéger. Sa résistance de contact au sol doit être la plus faible possible et sa masse est déterminée pour avoir la longévité souhaitée. Les matériaux les plus couramment utilisés sont :

- L'acier (rails, tubes ...),
- Le graphite,
- Le ferro silicium, etc.

La résistance du déversoir, faible en pratique (quelques ohms en général) doit être déterminée fonction du besoin en courant et doit être définie lors de l'étude.

En règle générale, les **câbles de liaison** ne doivent pas porter de gaines métalliques. La section de câble doit être déterminée en rapport avec la chute de tension admissible (loi d'ohm), de l'échauffement et des contraintes mécaniques. La nature de l'isolant des câbles doit être déterminée en fonction du milieu (présence de chlore dans le sol, ...). Les gaines les plus couramment utilisées sont de type PVC. **Une attention particulière doit être apportée aux conditions de pose afin d'éviter toute blessure de l'isolant.**



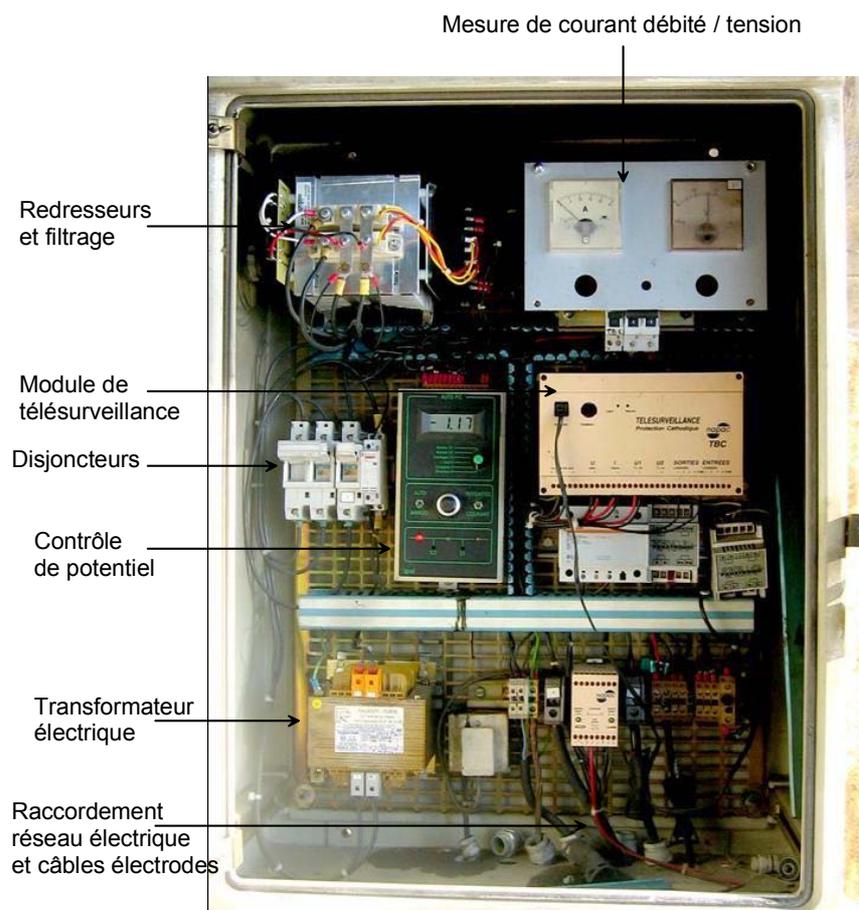
**Figure 12** Poste de soutirage simple

Le poste de soutirage est équipé d'appareillages électriques auxiliaires, qui servent généralement à la protection (para-surtenseurs ...), à la coupure générale ou à la coupure des sous-ensembles, ou aux mesures qui ont pour but d'indiquer :

- La tension d'alimentation,
- La tension d'utilisation (<120 V continu),
- Le courant débité,
- Le potentiel de structure,
- Le temps de fonctionnement.

En complément de la configuration minimale du poste de soutirage, il est fréquent d'installer certains dispositifs permettant (cf. figure 13):

- La régulation automatique du potentiel de protection de la structure,
- La limitation du courant (par exemple en limitation du soutirage sur voie ferrée en service, cf. §2.8.4),
- L'interruption du service, permettant des mesures de potentiels "on" et "off" de la structure lors des contrôles de maintenance,
- La télésurveillance du poste de soutirage, notamment pour signaler son état de fonctionnement ou d'arrêt.



**Figure 13** Poste de soutirage avec module de télésurveillance et contrôle de potentiel. Exemple de réalisation.

## 2.8 FACTEURS DE LIMITATION D'EFFICACITE DE LA PROTECTION CATHODIQUE

L'efficacité de la protection cathodique, en principe idéale pour maîtriser la corrosion en milieu aqueux, peut être influencée par des facteurs de limitations suivants:

- La continuité électrique insuffisante du système,
- La perte d'adhérence des revêtements,
- L'influence de la protection cathodique entre structures métalliques voisines
- L'influence d'une source de courant continu,
- L'influence d'une source de courant alternatif.

Les opérations régulières de suivi et d'entretien du système de protection cathodique permettent de surveiller ces facteurs d'influence et de maintenir l'efficacité du système de protection dans le temps.

## 2.8.1 LA CONTINUITÉ ÉLECTRIQUE INSUFFISANTE DU SYSTÈME.

### Dans l'électrolyte:

Cette insuffisance peut intervenir dans l'électrolyte où il faut s'assurer de la conductivité électrique dans l'ensemble de la structure à protéger et les anodes. Le cas peut être critique lorsque le milieu électrolytique corrosif ne vient qu'épisodiquement ou partiellement en contact du métal (condensations, projections, certaines zones de dessous des fonds de bacs horizontaux de stockage) ou quand les anodes risquent d'être recouvertes d'un milieu isolant (hydrocarbures). Les corrosions entraînées par une déficience locale de protection due à une forte résistance au passage du courant peuvent être très gênantes dans le cas des canalisations enterrées en milieu peu conducteur dont le revêtement s'est décollé faisant écran au passage d'un courant de protection suffisant pour assurer la protection dans les zones les plus difficilement accessibles.

### Dans l'ouvrage à protéger:

Cette insuffisance peut aussi provenir de la **structure à protéger** où il faut s'assurer que la conductivité électrique soit effective en tous points de la structure. Des précautions peuvent être entreprises telles que l'emploi de pièces anodisées pour lesquelles un simple contact est insuffisant. Dans le cas des structures complexes, il est difficile de déterminer la qualité de la continuité entre toutes les parties, les conséquences d'une continuité insuffisante peuvent être une aggravation locale de la corrosion puisqu'elle conduit à une sortie de courant (zone anodique).

Dans le cas de figure classique d'emploi de raccords isolants entre différents ouvrages, si un pontage électrolytique existe permettant le passage d'une partie du courant de protection vers l'ouvrage voisin isolé, le retour de ce courant au travers du raccord isolant provoque la corrosion du côté non protégé. Cette raison conduit à déconseiller l'emploi de raccord isolant enterré ou immergé.

Mais les cas les plus fréquents en pratique concernent la présence d'eau dans les canalisations, venant court-circuiter l'intérieur du raccord isolant et provoquer des perforations rapides. Pour éviter ce risque, l'emploi d'un revêtement interne de longueur suffisante du côté du joint soumis à la protection cathodique doit s'appliquer.

## 2.8.2 PERTE D'ADHÉRENCE DES REVÊTEMENTS

La perte d'adhérence des revêtements associés à la protection cathodique peut intervenir dans le cas où ces revêtements ne résistent pas à l'alcalinisation du milieu créée par les réactions cathodiques. Le choix du revêtement approprié s'appuie avant tout sur un retour d'expérience suffisant (cf. § 2.2 et §2.3)

### 2.8.3 INFLUENCE DE LA PROTECTION CATHODIQUE ENTRE STRUCTURES METALLIQUES VOISINES

La proximité de structures métalliques dans un électrolyte commun (sol, eau de mer) peut conduire à des interférences électriques néfastes quand la protection cathodique est appliquée à l'une ou à l'autre sans précaution suffisante. Comme précédemment, le courant électrique a tendance à circuler dans les conducteurs qui offrent une résistance minimale. Cela se traduit par la circulation de courants non contrôlés qui protègent l'ouvrage. La situation peut engendrer la corrosion du côté non protégé, situation semblable à l'exemple des canalisations isolées (cf. exemple au §2.8.1).

### 2.8.4 INFLUENCES D'UNE SOURCE DE COURANT EXTERIEURE CONTINU

Il existe dans le sol des courants liés à des fuites électriques provenant d'installations alimentées en courant continu mal isolées par rapport au sol. Ils sont particulièrement fréquents aux abords des lignes ferrées électrifiées. Ces courants sont généralement variables dans leur intensité, leur direction et le trajet qu'ils parcourent et dans le temps. Ces courants sont appelés **courants vagabonds**. Ces courants se déplacent avec la motrice qui leur donne naissance et créent un danger pour les structures à proximité dans le sol. Ces passages de courant conduisent à la formation de deux cellules d'électrolyse qui, dans le cas du déplacement du courant vagabond s'effectuant de l'ouvrage vers le rail, ont pour effet de rendre la canalisation anodique, donc dans une situation de corrosion.

Pour lutter contre l'influence des courants vagabonds, on peut agir à la source en isolant au mieux la partie émettrice des courants vagabonds, ou recourir aux dispositifs de limitation de types passifs ou actifs suivants:

#### **Passifs:**

- Des prises de terre polarisées qui permettent de faciliter l'évacuation des courants qui ont emprunté une canalisation.

#### **Actifs système de loin le plus utilisé et efficace si il est bien positionné:**

- Système de régularisation ou de drainage de courant qui permet de limiter le courant de transit.

### 2.8.5 L'INFLUENCE D'UNE SOURCE DE COURANT ALTERNATIF

La norme EN 12954 :2001 précise que « dans le cas d'influences de longue durée du courant alternatif sur des structures métalliques, il est nécessaire de prendre en compte la **possibilité d'une corrosion induite par le courant alternatif** ». C'est le cas en particulier des canalisations enterrées en acier qui sont susceptibles de subir ces influences **au voisinage de lignes haute tension, de centrales électriques ou de système de traction**.

Le mécanisme de corrosion n'est pas à ce jour entièrement compris.

Dans son annexe A, des préconisations et mesures sont données pour évaluer le risque de corrosion :

- Effectuer des mesures du potentiel de l'électrode de la structure avec un équipement approprié afin de s'assurer que les critères de potentiel soient bien atteints en présence de courant alternatif sur la structure;
- La probabilité d'une corrosion peut être négligeable si la densité de courant alternatif relative à une surface nue de 1 cm<sup>2</sup> est inférieure à 30 A/m<sup>2</sup> et si le potentiel d'électrode de la structure satisfait aux critères de la protection cathodique;
- Sur les structures protégées cathodiquement et soumises à la présence de courant alternatif, une densité de courant de protection plus élevée peut s'avérer nécessaire pour atteindre le potentiel de protection;
- Les structures comportant un petit nombre de défauts de revêtement de petite taille peuvent présenter un risque supérieur de corrosion due au courant alternatif.

## **2.9 RESERVOIRS ENTERRES ET CANALISATIONS ASSOCIEES**

Le cas des réservoir enterrés est particulier du fait du confinement relatif de tout les éléments du système anticorrosion, réservoir, anodes et mise à la terre électrique. Le choix du système de protection reste du ressort de l'exploitant mais au vu de la complexité de ce type de système l'avis d'un spécialiste est recommandé spécialiste (circulaire DM-T/P n°26290 du 30 juillet 1993 applicable aux centres de dépôts de GPL).

**Les deux solutions, courant imposé et anodes sacrificielles peuvent être appliqués et assurer un bon niveau de protection. Seule la maintenance et la disponibilité de personnels qualifiés pour l'entretien fera la décision.**

Les systèmes utilisés sont soit des anodes sacrificielles de magnésium dans un mélange régulateur (ou anodes "prébackfillées" ), soit du courant imposé utilisant des anodes ferrosilicium ou de type câble-anode.

Lors de la mise en œuvre, il est impératif de s'assurer que les appareils de contrôle et de commandes des équipement électriques ne mettent pas le réservoir au contact de la mise à la terre du centre d'exploitation ou de la station service. Un système de bride isolantes sur les tuyauteries et une cellule de découplage des courants électriques des réseaux de terre permet d'assurer un confinement des parties sous protection cathodique (blocage des courants continus de quelques volts) mais aussi de protéger les opérateurs d'éventuelles tensions alternatives. On peut aussi considérer que le réservoir est intrinsèquement une mise à la terre (GESIP 94.02 / 6.1.3.1).

## **2.10 CONTROLES DE PROTECTION CATHODIQUE**

**Le contrôle périodique de la protection cathodique effectué par un spécialiste certifié est indispensable pour maintenir son efficacité et prévenir contre les risques de défaillance (cf. §3).**

Le contrôle porte essentiellement sur les points suivants :

- Le fonctionnement correct et permanent des dispositifs produisant les potentiels d'immunité attendus,
- La mesure du potentiel du métal de la structure devant respecter les valeurs des recommandations (cf. tableau 4),
- La vérification du maintien de ce potentiel à des valeurs acceptables sur toute la surface du métal à protéger,
- Le contrôle et le suivi du débit de courant.

Dans la plupart des cas, la structure protégée n'est pas accessible à la réalisation des mesures. **On réalise donc des points de mesures aménagés où des prises de potentiels installées sont en règle générale régulièrement répartis, mais aussi aux points particuliers pouvant devenir des points critiques** (croisement avec d'autres structures, passages sous gaines ...).

**En situation normale, le potentiel du métal est stable et n'évolue pas s'il n'y a pas d'action des courants vagabonds** (passage de trains sur une voie ferrée à proximité ...), **et si la structure est bien isolée et non modifiée.**

Par contre, les conditions de corrosion du milieu peuvent évoluer en raison de :

- La résistivité des terrains pouvant varier suivant les conditions météorologiques,
- Le vieillissement du revêtement,
- La présence des voies ferrées électrifiées en courant continu,
- La pose dans le voisinages d'autres structures protégées ou non (modification de la configuration du site).

**Toutes ces causes font varier le potentiel structure-sol, et c'est le cas notamment des courants vagabonds qui provoquent des variations importantes et parfois très rapides.** Dans ce cas, les mesures instantanées du potentiel ne sont plus représentatives de la protection cathodique à appliquer. **Il est donc nécessaire de procéder à des enregistrements de potentiel sur une durée de un à plusieurs jours**, et d'appliquer les corrections nécessaires pour s'adapter aux nouvelles situations (drainage en présence de courants vagabonds, modifications à apporter au système de protection, surveillance des nouveaux points critiques, ...).

**La mesure des variations ainsi que l'analyse et la mise en œuvre des corrections nécessitent la maîtrise des techniques pointues et doivent être confiées aux spécialistes reconnus par la profession.**

### **3. CRITERES D'EVALUATION DES PERFORMANCES**

La réglementation des Installations Classées s'appuyant sur le code de l'environnement, modifié par la loi du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages, introduit le principe d'une étude de dangers basée sur une analyse de risque qui doit caractériser non seulement la gravité potentielle, mais aussi la probabilité d'occurrence des accidents

L'évaluation de ces paramètres nécessite une analyse des barrières de sécurité techniques et organisationnelles. Ainsi l'article 4 de l'arrêté du 29 septembre 2005 précise "pour être prises en compte dans l'évaluation de la probabilité, des mesures de maîtrise des risques doivent être efficaces, avoir une cinétique de mise en œuvre en adéquation avec celle des événements à maîtriser, être testées, maintenues de façon à garantir la pérennité du positionnement précité".

L'INERIS se propose donc d'évaluer les performances de la protection cathodique à travers l'analyse des critères **efficacité, temps de réponse, niveau de confiance, et maintenance** [3].

#### **3.1 CRITERES DE PERFORMANCE**

##### **3.1.1 EFFICACITE DE LA PROTECTION**

L'efficacité et la fiabilité de la protection cathodique sont liées en grande partie :

- au choix des techniques appropriées (anodes sacrificielles, courant imposé, drainage, revêtements éventuellement associés...),
- à la qualité de la conception du système,
- à sa réalisation,
- à son contrôle en service (système de protection, structure protégée et revêtements éventuels),

**Or, ces critères dépendent fortement de la compétence des personnes et des entreprises intervenantes ainsi que du respect des standards reconnus par la profession.** Par conséquent, la mise en œuvre de la protection cathodique doit suivre les démarches allant dans le sens de la normalisation des produits et des méthodes de conception ou de contrôle ainsi que de la qualification et de la certification du personnel.

Depuis 1990, la France s'est dotée d'une série de normes de référence tant pour les produits et les méthodes de conception ou de contrôle, que pour définir la compétence des spécialistes de la protection. Ainsi, **la compétence requise pour le personnel participant à l'étude, à la conception ou à la réalisation de la protection cathodique doit être de niveau 2 certifié ou supérieur tel que défini dans la norme NF EN 15 257.**

La liste des normes de référence (non exhaustive) pour la France est donnée en annexe 1.

### 3.1.2 TEMPS DE REPONSE :

L'action de la protection cathodique est permanente et s'inscrit dans la durée. En général, la défaillance du système de protection cathodique à courant imposé entraînant une perte de courant nécessaire à la protection sur plusieurs jours (suite à une rupture du courant d'alimentation, à la mise en sécurité du disjoncteur de sécurité, à une rupture de câble relié aux électrodes, à la foudre, ...) n'aura que peu d'incidence sur la protection en considérant les processus de corrosion lente. La remise en service du système doit toutefois être effectué dans les temps par un spécialiste afin de maintenir les paramètres (vérifications fonctionnelles, état de la surface du métal, conditions environnantes, ...) conditionnant l'efficacité de la protection. En situation particulière où le poste de soutirage d'un système de protection à courant imposé est difficilement accessible pour permettre une surveillance humaine régulière, le système doit prévoir un système de télésurveillance signalant à distance le fonctionnement permanent de la protection.

### 3.1.3 NIVEAU DE CONFIANCE DE LA BARRIERE

Le niveau de confiance du système de protection cathodique **dépend avant tout de sa surveillance et des contrôles effectués périodiquement**. Ceci est surtout valable dans le cas d'un système à courant imposé pour lequel le bon fonctionnement et de l'adéquation des sources alimentant les postes de soutirage est indispensable.

Les vérifications portent essentiellement sur le paramètre déterminant le critère de protection, c'est à dire le potentiel du matériau dans le milieu électrolytique environnant. Il est également indispensable de contrôler périodiquement le débit des anodes et/ou la consommation en courant d'ouvrage protégé. Ces mesures permettent, d'une part de comparer le besoin réel en courant avec la valeur prise dans les calculs pour la densité de courant de protection. Ces mesures permettent également d'évaluer éventuellement le coefficient de dégradation du revêtement, de détecter les évolutions des conditions de corrosion du milieu et d'adapter au fur et à mesure les hypothèses prises en compte pour les calculs pour apporter les corrections appropriées.

Par ailleurs, la fréquence de contrôle doit être adaptée aux risques d'évolution (beaucoup plus faible avec les anodes galvaniques) et aux conséquences d'une sous-protection voire d'une surprotection.

## 3.2 MAINTENANCE PREVENTIVE

Les performances de la protection se dégradent dans le temps lorsqu'aucune maintenance n'est prévue. Le maintien des performances dans le temps doit être assuré par la mise en œuvre d'une **maintenance et d'une inspection adaptées et réalisées par un personnel compétent, certifié de niveau 1 ou supérieur suivant la norme NF EN 15 257**. Par ailleurs, les modifications des structures protégées ou des conditions environnantes de nature à remettre en cause l'efficacité de la protection cathodique doivent être maîtrisées par la mise en œuvre par l'exploitant **d'une gestion des modifications**.

#### **4. LISTE DE SPECIALISTES EN PROTECTION CATHODIQUE**

Le tableau 8 (non exhaustif) ci-dessous regroupe des spécialistes et fournisseurs de matériels pour la protection cathodique.

<b>Noms</b>	<b>Coordonnées</b>
<b>Cabinet Jacques PEZOU</b>	145, rue Lafayette 13300 SALON DE PROVENCE tél. : 06 85 18 00 98 / 08 77 86 27 52 fax : 04 90 53 94 48 <a href="http://www.cjp-e.fr">http://www.cjp-e.fr</a>
<b>COREXCO</b>	47, avenue des Bruyères 69150 DECINES tél. : 04 37 42 32 32 fax : 04 37 42 32 30 <a href="http://www.corexco.fr">http://www.corexco.fr</a>
<b>IPSI</b>	102, Rue Jean Baptiste Charcot 92400 COURBEVOIE tél. : 01 47 68 75 00 fax : 01 47 89 99 39 <a href="http://www.ipsifrance.com/fr/index.htm">http://www.ipsifrance.com/fr/index.htm</a>

*Tableau 8 Spécialistes et fournisseurs de matériels pour la protection cathodique*

## **5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] Protection cathodique: guide pratique - Editions TECHNIP
- [2] Bernard Normand, Nadine Pébère, Caroline Richard, Martine Wery "Prévention et lutte contre la corrosion - une approche scientifique et technique" - 2004 - Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- [3] Rapport OMEGA 10 " Evaluation des barrières Techniques de Sécurité" - Programme DRA-39 - Evaluation des dispositifs de prévention et de protection utilisés pour réduire les risques d'accidents majeurs - N. Ayrault, INERIS – MEDD - 2004 - <http://www.ineris.fr/badoris/Pdf/Rapports/omega10.pdf>

## **6. ANNEXES**

Liste des annexes:

<b>N° Annexe</b>	<b>Titre</b>
1	Normes de protection cathodique en France

## ANNEXE 1

### NORMES DE PROTECTION CATHODIQUE EN FRANCE

En France, une reconnaissance officielle de la compétence des spécialistes de la protection cathodique est décrite à travers les normes fonctionnelles :

Référence des normes	Intitulé
NF EN 45013	Critères généraux concernant les organismes de certification du personnel.
NF A05-800	Norme de service - Prestations de service en protection cathodique - Engagements des prestataires de service.
NF A05 690	Protection cathodique - Définition des niveaux de compétence des agents en vue de leur qualification.
NF A05 691	Protection cathodique - Certification des agents - Principes généraux.
NF EN 15 257 NF A05 692	Protection cathodique - Niveaux de compétence et certification du personnel en protection cathodique

**Trois niveaux de certification** sont définis :

- **Niveau 1** : mesures courantes en protection cathodique
- **Niveau 2** : Etude, conception et réalisation d'installations de protection cathodique
- **Niveau 3** : Expertise dans le domaine de la protection cathodique

Ces niveaux sont relatifs à quatre domaines d'applications de la protection cathodique :

- **Secteur terre** (protection cathodique des structures enterrées)
- **Secteur mer** (protection cathodique des structures immergées)
- **Secteur surfaces** internes de capacités (protection interne des capacités)
- **Secteur béton armé** (protection cathodique des armatures)

Pour les produits et les méthodes de conception ou de contrôle, la France s'est dotée de normes parmi lesquels (liste non exhaustive):

Référence des normes	Titre
A05-611	Protection électrochimique contre la corrosion - Protection cathodique des armatures du béton - Ouvrages enterrés et immergés.
A05-655	Protection électrochimique contre la corrosion - Techniques de mesure en protection cathodique externe des ouvrages en acier - Généralités.
NF EN 12068	Protection cathodique - Revêtements organiques extérieurs pour la protection contre la corrosion de tubes en acier enterrés ou immergés en conjonction avec la protection cathodique - Bandes et matériaux rétractables.
NF EN 12473	Principes généraux de la protection cathodique en eau de mer.
NF EN 12474	Protection cathodique des canalisations sous-marines.
NF EN 12495	Protection cathodique des structures en acier fixes en mer.
NF EN 12499	Protection cathodique interne des structures métalliques.
NF EN 12696	Protection cathodique de l'acier dans le béton.
NF EN 12954	Protection cathodique des structures métalliques enterrées ou immergées - Principes généraux et application pour les canalisations.
NF EN 13173	Protection cathodique des structures en acier flottant en mer.
NF EN 13174	Protection cathodique des installations portuaires.
NF EN 13509	Techniques de mesures applicables en protection cathodique.
NF EN 13636	Protection cathodique des réservoirs métalliques enterrés et tuyauteries associées.
NF EN 14505	Protection cathodique des structures complexes.
NF EN 15112	Protection cathodique externe des cuvelages de puits.