



COMITE D'ETUDE DE LA CORROSION ET DE LA PROTECTION DES CANALISATIONS

**CORROSION PAR COURANT ALTERNATIF SUR LES CANALISATIONS CATHODIQUEMENT
PROTEGEES**

RECOMMANDATIONS POUR L'EVALUATION DES RISQUES ET MESURES DE REMEDIATION



COMITE D'ETUDE DE LA CORROSION ET DE LA PROTECTION DES CANALISATIONS
www.ceocor.lu

**CORROSION PAR COURANT ALTERNATIF SUR LES CANALISATIONS CATHODIQUEMENT
PROTEGEES**

RECOMMANDATIONS POUR L'EVALUATION DES RISQUES ET MESURES DE REMEDIATION

Les recommandations ci-après sont informatives; aucune responsabilité sera assumée ni par le Ceocor
comme organisation, ni par ses membres individuels pour une quelconque action prise suite à une
information donnée.

TRADUCTION

PREFACE

Ce livre relatif à la corrosion par les courants alternatifs sur les canalisations cathodiquement protégées constitue une recommandation pour l'évaluation des risques et les mesures de réduction de ceux-ci.

Il continue la tradition du CEOCOR d'élaborer des recommandations pour la protection contre la corrosion des canalisations.

Des spécialistes en corrosion ont été alarmés en 1988, l'année de la première découverte des dommages par courant alternatif de canalisations cathodiquement protégées contre la corrosion. La confiance mise dans la protection cathodique a souffert en conséquence.

Après la surprise initiale, le phénomène de la corrosion par courant alternatif a été étudiée en profondeur dans différents pays et également discutée dans le secteur A du CEOCOR. Des mesures préventives de réduction et les critères d'appréciation des risques ont été élaborés.

Ces buts n'ont été que partiellement atteints. Aujourd'hui nous commençons à comprendre les mécanismes et les conditions de la corrosion par courant alternatif. Ce livre, un sommaire de notre connaissance actuelle est de nature à informer les spécialistes en corrosion du problème et attirer leur attention sur la corrosion par courant alternatif.

Le livre a été préparé par un groupe de spécialistes en corrosion (énumérés ci-dessous). Leur expérience, leur connaissance et leur important travail personnel étaient essentiels pour réussir. Nos remerciements leur sont adressés ainsi qu'à leurs collègues.

L. Di Biase	SNAM, Italie - chef du groupe de travail après 98
H.G. Scheneich, DR	Ruhrigas AG, Allemagne - chef du groupe de travail jusque 97
P.J. Baars	KIWA N.V., Pays Bas
G. Camitz	Institut suédois de corrosion - Suède
P. Cohn	DONG, Danemark
H.E. Edwall	Sydgas ab, Suède
A. Gomila	WWI Guldager, Electrolysis Espagne
R. Gregoor	N.V. Distrigaz, Belgique
F. Kuijt	Nederlandse Gasunie, Pays-Bas
K.C. Lax	Corroconsult Ltd, Grande-Bretagne
Asa Marbe	Sydkraft consult ab, Suède
M. Melis	Slovak, Ges and Gis Association, République Slovaque
I. Ragault	Gaz de France, France
G. Reiff, DR.	DVGW, Allemagne
F. Stalder, DR.	Gesellschaft für Korrosionsschutz, Suisse

Le Président du secteur A
à partir de mai 2000
Lucio Di Biase - Italie

Le Président du secteur A
jusque mai 2000
Ferdinand Stalder - Suisse

AVANT-PROPOS

Ce livre est destiné, en particulier, aux personnes spécialisées dans la protection contre la corrosion des structures métalliques enterrées.

Il est également utile pour les ingénieurs, les dirigeants et les personnes s'occupant de l'exploitation de structures métalliques souterraines, telles que les câbles de télécommunication, les canalisations d'eau, de gaz et de pétrole, les exploitants de lignes de puissance électriques, ou de systèmes de fourniture de courant. Ils pourront mettre à profit cet ouvrage pour comprendre l'origine, la nature et la conséquence des influences des courants alternatifs.

Les directeurs des lignes de puissance d'électricité, ou de systèmes de fourniture de courant alternatif seront également intéressés par les phénomènes décrits dans cette maquette qui dans un avenir proche pourraient intervenir dans les coûts et fonctionnement de leurs systèmes.

L'influence des courants alternatifs s'est développée de manière continue ces dernières années, en raison du développement énorme des systèmes de transport alimentés en courant alternatif (voir les trains à grande vitesse) en raison de l'intérêt porté à la qualité des revêtements et à la bonne tenue globale des canalisations.

Tout en contenant des considérations théoriques et les études et expériences de laboratoire, ce livret décrit également les approches pratiques de solutions aux problèmes communs liés à l'influence de courant alternatif.

Il peut être intéressant de noter que le livre a été conçu et préparé bien avant que des travaux de standardisation au niveau européen sur ce sujet soient entamés.

Le CEOCOR a déjà installé un groupe ad-hoc chargé de suivre la recherche et les avancées dans le domaine de l'influence des courants alternatifs afin de mettre à jour périodiquement l'information recueillie après la publication de ce premier livre.

Nous sommes persuadés que ce livre sera profitable à celui qui s'intéresse au domaine de la corrosion ainsi qu'aux ingénieurs et spécialistes en protection cathodique.

Il constitue une étape importante de progrès scientifique dans ce domaine technique très spécial.

Pierre Leroy
Président du CEOCOR

TRADUCTION EN LANGUE FRANÇAISE

La traduction en langue française a été réalisée au sein de la SWDE, Société wallonne des eaux (Belgique) par Messieurs Philippe BEAUJEAN, Roger MOISSE et Jacques HELLAS.

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

- 1.1 Sources d'interférence
- 1.2 Paramètres influençant la corrosion par courant alternatif

2. ASPECTS FONDAMENTAUX

- 2.1 Modélisation électrique
- 2.2 Influence physique et géométrique sur la résistance de dispersion
- 2.3 Influence chimique sur la résistance
 - 2.3.1 Réactions chimiques provoquées par le courant de protection cathodique
 - 2.3.2 Sels formés par les cations alcalino-terreux
 - 2.3.3 Sels formés par des cations alcalins
 - 2.3.4 Mélanges de cations alcalins
 - 2.3.5 Effets de ces processus sur la résistance de dispersion

3. MESURES DE LABORATOIRE

- 3.1 Mesures électrochimiques
 - 3.1.1 Courbe de polarisation en courant continu
 - 3.1.2 Commutation du signal d'onde rectangulaire
 - 3.1.3 Spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS)
- 3.2 Evaluation du taux de corrosion
 - 3.2.1 Perte de poids et examen visuel
 - 3.2.2 Technique électrique de résistance

4. EVALUATION DU RISQUE DE CORROSION PAR C.A.

- 4.1 Calcul du C.A. induit sur les canalisations
 - 4.1.1 Généralités
 - 4.1.2 Evaluation des cas de calcul du courant alternatif induit à effectuer
 - 4.1.3 Paramètres à considérer
 - 4.1.4 Algorithmes et résultats de calcul
- 4.2 Mesures sur site
 - 4.2.1 Mesures préliminaires
 - 4.2.2 Mesures particulières
 - 4.2.2.1 *Potentiel sol-conduite*
 - 4.2.2.2 *Densité de courant alternatif*
 - 4.2.2.3 *Rapport des densités de courant (J_aC/J_dC)*
- 4.3 Echantillons, conception et installation
 - 4.3.1 Caractéristiques d'installations portatives non-permanentes (mesures à court terme)
 - 4.3.2 Caractéristiques d'installations enterrées permanentes (mesures à long terme)
- 4.4 Localisation de défauts d'enrobage et caractéristiques du sol

5. IDENTIFICATION D'UN CAS DE CORROSION PAR COURANT ALTERNATIF

6. REMEDIATION DE LA CORROSION PAR COURANT ALTERNATIF

- 6.1 Augmentation de la distance entre une canalisation et la ligne de chemin de fer électrifié à haut tension
- 6.2 Arrangement optimum de phase des câbles haute tension de lignes de chemin de fer électrifiées
- 6.3 Mise à la terre de canalisations par électrodes de terre
- 6.4 Compensation de tension alternative induit
 - 6.4.1 Compensation totale
 - 6.4.2 Compensation partielle
- 6.5 Installation de joints isolants pour interrompre la conductivité longitudinale de la canalisation
- 6.6 Réparation de dégâts d'enrobage
- 6.7 Echange du sol à proximité de la canalisation
- 6.8 Utilisation de câbles de terre parallèles
- 6.9 Résumé des mesures de remédiation

7. REFERENCES

ANNEXES (VOIR CD.ROM JOINT)

- 1. Vue d'ensemble d'une approche pratique de problèmes de corrosion par courant alternatif
H.G. Schoeneich - Ruhrgas, Allemagne.
- 2. Corrosion par courant alternatif sur canalisations métalliques enterrées.
Expérience et perspectives APCE - Roma, Di Biase - Snam, Italie.
- 3. Détection et évaluation de la corrosion par courant alternatif
A. Pourbaix - Cebelcor, R. Gregoor - Distrigas, Belgique.
- 4. Analyse de cas réels de corrosion par courant alternatif
L. Di Biase - Snam, Italie.
- 5. Corrosion par courant alternatif. Résultats et discussion d'essais en laboratoire.
Peter Cohn - Dong, Danemark, F. Stalder - für Korrosionsschutz, Suisse de gesellschaft de Schweizerische.
- 6. Corrosion par courant alternatif induit sur les canalisations de gaz revêtue de polyéthylène en acier.
Ragault - Gaz de France, France.
- 7. Corrosion par courant alternatif sur l'acier enterré protégé cathodiquement - Recherche à long terme.
Göran Camitz, Charlotte Johansson et Asa Marbe, Suède.

SOMMAIRE

Un nouveau phénomène de corrosion lié aux courants alternatifs s'est ajouté à la liste des phénomènes de corrosion. Ceci résulte habituellement de tensions alternatives induites dans les canalisations dont le tracé est parallèle ou croise les lignes à haute tension ou des chemins de fer électrifiés.

L'implication de l'influence de courants alternatifs sur les canalisations enterrées revêt une grande importance pour tous les propriétaires de canalisations en Europe.

L'importance de cette interférence est toujours en augmentation : pour le personnel de terrain (tension de contact et tension de pas); effet inverse aux équipements de protection cathodique; et pour la protection contre la corrosion de structures métalliques enterrées.

Parmi les facteurs qui contribuent à l'augmentation de tension due à des courants alternatifs sur les canalisations enterrées on peut compter :

- nombre croissant de lignes de puissance en haute tension;
- système de traction à haute vitesse fonctionnant par courant alternatif;
- très haute résistance d'isolation du revêtement des canalisations modernes.

Les mesures traditionnelles de potentiel entre la canalisation et le sol ne garantissent pas une efficacité de la protection cathodique contre la corrosion sur des canalisations supportant des interférences de courant alternatif.

Une approche spécifique pour évaluer l'efficacité de la protection doit être adoptée. De plus, une recherche en laboratoire est encore nécessaire pour expliquer les mécanismes de base de la corrosion par courant alternatif principalement pour déterminer les méthodes d'évaluation des risques de corrosion.

Le but principal de cette brochure est de :

- informer le monde technique des problèmes;
- montrer qu'il y a un risque réel de corrosion par courant alternatif sur les canalisations enterrées;
- fournir des exemples d'actions pratiques de réduction ou de minimisation des risques de corrosion.

Les aspects sécurité en rapport avec l'influence de courants alternatifs sur les canalisations ne sont pas abordés dans cette brochure (voir références 1 et 2).

Quelques expériences de laboratoire et de terrain sont illustrées.

Les conclusions exposées ne doivent pas être considérées comme définitives du fait que des expériences sont toujours en cours.

La nature réelle du phénomène de corrosion par courants alternatifs n'a pas encore été complètement investiguée.

1. INTRODUCTION

Le facteur principal en électrolyse par courant alternatif est la densité du courant.

La constatation en a été faite en 1927 dans le "Engineering Journal", le journal de "Engineering Institute of Canada".

Un long moment s'est écoulé depuis lors et les effets des courants alternatifs ont été expérimentés et investigués en profondeur.

Plus récemment, depuis 1986, quelques exemples de corrosion sur des canalisations de gaz dues aux courants alternatifs (16^{2/3} et 50 Hz) ont été constatés en Europe (annexes 2, 3 et 4).

Dans tous ces cas, les valeurs de protection cathodique mesurées avec des instruments et des techniques conventionnels satisfaisaient aux critères reconnus jusqu'alors.

Il est très probable que des défaillances antérieures de corrosion n'aient pas été reconnues comme étant causées par des courants alternatifs, car le personnel chargé de la protection cathodique n'avait pas été conscientisé des risques de corrosion par courant alternatif.

Dans la littérature technique l'influence des courants alternatifs se réfère aussi bien à l'induction qu'à la résistivité ou à la capacité.

Dans les années récentes à travers l'Europe, nombre de cas de corrosion clairement attribués à la corrosion par courants alternatifs ont été découverts.

Selon l'information disponible (qui représente probablement un petit pourcentage de tous les cas), le résumé ci-après peut être dressé :

- nombre de cas de corrosion par courant alternatif : 23
- nombre de fuites : 4
- nombre d'attaques de corrosion observé : 709

L'influence des courants alternatifs et les risques de corrosion associés vont certainement augmenter en raison des facteurs suivants :

- installation de lignes d'électricité nouvelles et plus performantes;
- qualité des revêtements continuellement améliorée;
- amélioration de la méthodologie pour obtenir un revêtement presque parfait sur les nouvelles canalisations;
- construction partout en Europe de nouvelles lignes de train à haute vitesse.

Cas typique de corrosion par courant alternatif sur une canalisation revêtue de PE

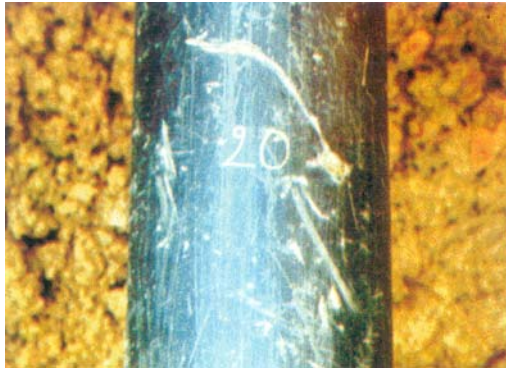


Photo 1 : Défectuosité du revêtement (15 x 20 mm) sur la génératrice supérieure de la canalisation, la dimension du trou dans le revêtement est de quelques mm²



Photo 2 : Oxyde (40 x 40 mm) et produit de corrosion

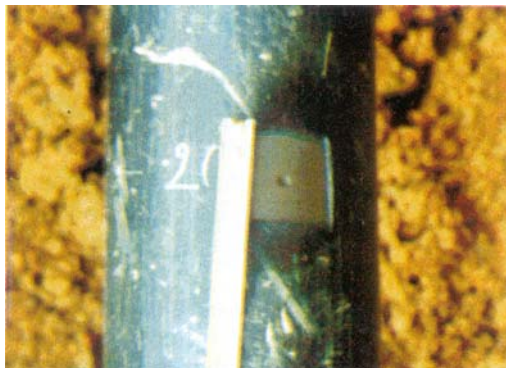


Photo 3 : Corrosion (diam 5 mm; prof. 0,5 mm)

1.1. Sources d'interférence

Les principales sources d'interférence dues aux courants alternatifs sont :

- lignes de puissance à HT aériennes ou enterrées;
- lignes de puissance longues et parallèles;
- système de traction à haute vitesse (habituellement alimentée par une ligne de 132 kV et 25 kV en parallèle);

1.2. Paramètres affectant la corrosion par courant alternatif

La corrosion est provoquée par un échange de courant entre le sol et le métal, cet échange de courant dépend de la tension induite sur les canalisations.

L'amplitude de la tension induite est due à des paramètres divers tels que :

- distance entre les câbles de phase;
- distance entre la ligne électrique à haute tension et la canalisation;
- ligne aérienne;
- résistance du revêtement de la canalisation.

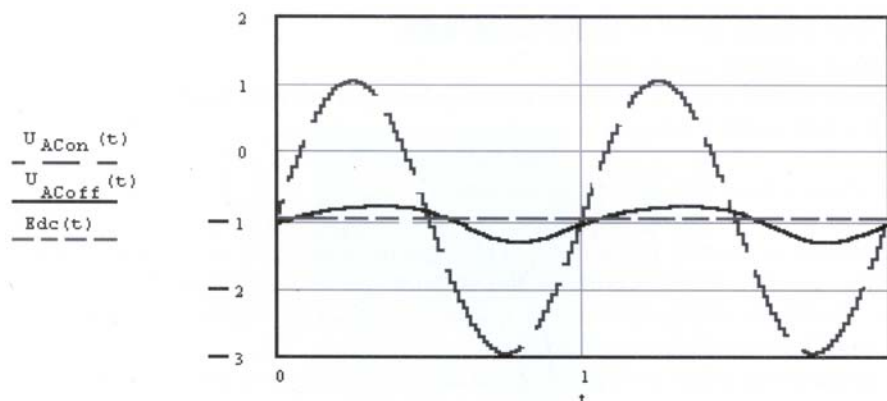
La corrosion est principalement influencée ou associée à :

- la densité de courant alternatif;
- valeur de potentiel "On/Off";
- la dimension du défaut de revêtement;
- la résistivité locale du sol;
- la composition chimique locale du sol;
- la formation de sel à l'interface métal/sol due à la réaction de protection cathodique.

2. ASPECTS FONDAMENTAUX

Quand une canalisation en acier subit l'interférence de courants alternatifs une tension de courants alternatifs peut être mesurée entre le tuyau et la terre à distance. En se référant à la figure 2.1 ci-dessous les valeurs suivantes peuvent être identifiées :

- $U_{ac,on}$ est égale à la tension de courants alternatifs qui peut être mesurée entre le tuyau et la terre à distance.
Cette tension de courants alternatifs comprend tant la chute de IR se produisant dans le sol que "la tension véritable de courants alternatifs" existant directement à la surface du tuyau.
- $U_{ac,off}$ est la tension de courants alternatifs existant directement à la surface de l'acier (tension de courants alternatifs véritable) sans influence de la chute de IR due à la résistance de dispersion (voir section 2.3). Il y a lieu de noter qu'il peut y avoir entre $U_{ac,on}$ et $U_{ac,off}$ un décalage dans le temps ainsi qu'une relation non-linéaire.
- $E_{dc,off}$ est IR libre de potentiel à la surface de l'acier ("potentiel véritable") avec par exemple une protection cathodique mais sans courants alternatifs



La tension alternative produit un courant alternatif circulant de la canalisation à travers tout défaut de revêtement vers la terre à distance. La magnitude de ce courant alternatif dépend de la magnitude de l'impédance existant entre le tuyau à travers un défaut de revêtement vers la terre à distance.

Cette section entend donner une idée des aspects fondamentaux reprenant la manière dont la tension de courant alternatif, l'impédance et le courant alternatif sont interconnectés à travers des paramètres chimiques et physiques en relation avec les défauts de revêtement et comment la corrosion par courant alternatif peut se développer dans ce cas.

2.1 Modélisation électrique

L'impédance de tuyauterie par rapport au sol peut être considérée comme une somme d'impédance de dispersion (Z_s) et l'impédance de polarisation (Z_p) en regard de l'électrochimisme de l'interface tuyau/sol (figure 2.2-A).

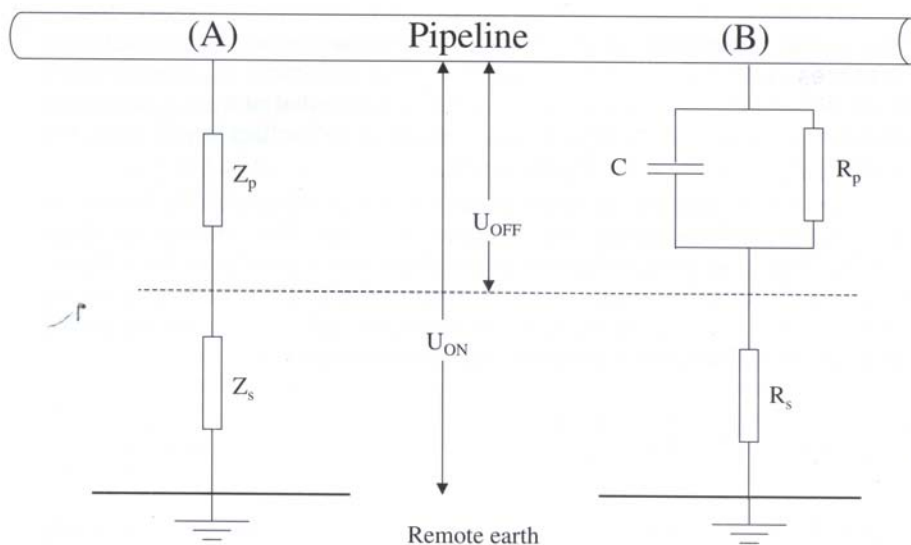
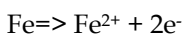


Figure 2.2 - Illustration de circuits électriques simplifiés équivalents utilisés pour décrire les impédances tuyau/sol

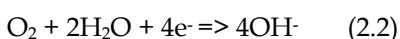
L'impédance de dispersion est généralement considérée comme étant une impédance résistive entre autre le terme résistance de dispersion (R_s dans la figure 2.2-B) est plus indiqué. La chute de IR se produit à travers la résistance de dispersion.

A l'interface entre le tuyau métallique et le sol il existe une double couche électrochimique. Cette double couche peut être considérée électriquement comme un condensateur (C dans la figure 2.2-B). La capacitance de cette double couche électrochimique dépend de la composition chimique du sol qui définit la constante diélectrique E. Son unité est le farad [$F = As/V$]. Le condensateur peut jouer un rôle clé dans le comportement de la corrosion par courant alternatif dans un sens tel que si la charge de cette double couche atteint une valeur critique, des processus électrochimiques irréversibles à travers cette double couche sont initiés.

Ceci peut être par exemple, la dissolution anodique de l'acier :



ou la réduction de l'oxygène ou la libération d'hydrogène comme processus cathodiques produisant tous deux de l'alcalinité (OH^-) :



La dissolution de métal peut être initiée lorsque le potentiel métal/sol s'accroît au delà du potentiel de protection. La réduction d'oxygène s'opère à des potentiels plus bas que le potentiel d'équilibre de l'électrode O₂. et l'évolution de l'H₂ a lieu à des potentiels plus bas que le potentiel d'équilibre de l'électrode de H₂.

La résistance définie par de tels processus électrochimiques est connue comme étant la résistance de polarisation (R_p dans la figure 2.2-B) Cela devrait être considéré seulement en termes génériques puisque la résistance de polarisation est loin d'être linéaire. Cela dépend du chimisme dans le voisinage de la surface de la canalisation et du potentiel du tuyau. Les processus qui ne sont pas limités par la diffusion, montrent généralement un comportement exponentiel entre le courant et le potentiel :

$$i = i_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{E - E_0}{\beta_a}\right) - \exp\left(-\frac{E - E_0}{\beta_c}\right) \right] \quad (2.4)$$

Où E est le potentiel d'électrode, E₀ est le potentiel de l'électrode d'équilibre, i₀ est la densité de courant d'échange existant lorsque E = E₀, et β_a et β_c sont les pentes anodiques et cathodiques de Tafel relatives au processus particulier.

L'impédance de polarisation (Z_p) de la figure 2.2 (A) peut alors être considérée comme un couple en parallèle de la résistance R_p de polarisation et le condensateur à double couche C. Cela inclut une impédance réelle aussi bien qu'imaginaire de laquelle découle un délai (l'angle de phase) entre la tension et le courant comme indiqué dans la figure 2.1

Ces idées concernant le mécanisme de corrosion par courant alternatif conduisent à l'établissement des critères pour l'évaluation des risques de corrosion par courant alternatif tels que repris ci-après.

- la somme des charges fournies à la double couche électrochimique avant que des processus irréversibles ne soient initiés dépend de la densité du courant, de la fréquence et de la composition chimique du sol;
- en première approximation l'utilisation de la densité de courant comme critère semble une bonne approche. Les investigations de laboratoire montrent que la densité du courant d'environ 30 A/m² donne des résultats satisfaisants en tant que critère de détection de corrosion par courant alternatif. Cette valeur dépend de facteurs tels que la fréquence, la composition du sol à l'interface, etc.;
- S'il y a des processus anodiques irréversibles le potentiel métal/sol peut monter au dessus du potentiel de protection. En conséquence, la mesure du potentiel off très peu de temps après la coupure du courant peut être utilisée comme critère. Jusqu'à présent, les constantes de temps de décharge de la double couche électrochimique, de dépolarisation du métal à l'interface avec le sol ne sont pas connues. Les recherches de laboratoire montrent que la mesure du potentiel off moins d'une milliseconde après la coupure (du courant) peut conduire à des résultats satisfaisants en tant que critère pour détecter le potentiel de corrosion par courant alternatif.

La résistance de dispersion est connue comme étant un paramètre primaire déterminant le niveau de courant alternatif pour une certaine tension alternative. Les critères possibles pour évaluer le risque de corrosion par courant alternatif peuvent seulement être testés avec des échantillons branchés sur la canalisation. La résistance de dispersion des échantillons est contrôlée par des paramètres physiques relatifs à la géométrie et à la dimension de l'échantillon aussi bien que les paramètres chimiques relatifs au chimisme du sol et la modification du chimisme dans le voisinage d'un revêtement défectueux provoqué par le courant de protection cathodique et le courant alternatif.

Il est très important de prendre en compte les influences chimiques et physiques qui déterminent le flux de courant dans un défaut de revêtement, entre autres les influences physiques et chimiques sur la résistance de dispersion. Dans les chapitres suivants quelques expériences relatives aux influences physiques et chimiques sur la résistance de dispersion d'échantillons et de défauts de revêtement sont rassemblées.

2.2. Influence physique/géométrique sur la résistance de dispersion

La résistance de dispersion de l'aire dépendante R's d'une sonde circulaire peut être calculée à partir de la résistivité ρ_s spécifique du sol et du diamètre de l'aire exposée.

$$R's = \frac{\rho_s}{2 \cdot d} \quad [\Omega] \quad (2.5)$$

La densité de courant résultant à l'échantillon avec l'aire A sous voltage inducteur U est déterminée selon la loi d'Ohm telle que :

$$i = \frac{U}{R \cdot A} = \frac{8 \cdot U}{\pi \cdot \rho_s \cdot d} \quad [A / m^2] \quad (2.6)$$

Dès lors, avec une résistance de sol constante et une tension inductrice donnée, une augmentation de la densité de courant avec un diamètre d décroissant pour le défaut est attendue.

En prenant également en considération l'effet de l'épaisseur h du revêtement du tuyau, la résistance de dispersion R_s du défaut circulaire du revêtement ayant un diamètre d est composée d'une résistance de la piqûre (pore) et d'une résistance de dispersion dépendant de la surface R'_s :

$$R_s = R_F + R'_s = \frac{4 \cdot \rho_F \cdot h}{d^2 \cdot \pi} + \frac{\rho_s}{2 \cdot d} \quad [\Omega] \quad (2.7)$$

Mis à part la résistance spécifique de l'électrolyte à l'intérieur de la piqûre (ρ_F) et dans le sol (ρ_s) la résistance de dispersion R_s dépend également de l'épaisseur h du revêtement.

Supposant que $\rho_F = \rho_s$, la densité de courant résultant des effets physiques fonction de la dimension du défaut, de la résistivité du sol et de la tension de courant alternatif inductrice peut être calculée au moyen de l'équation 2.7 et la loi d'Ohm.

A la figure 2.3 on peut voir que pour des petits diamètres de défaut de revêtement, la densité de courant est essentiellement constante et est déterminée par la résistance R_F de la piqûre du revêtement. Pour des diamètres plus grands, la densité de courant diminue en proportion inverse du diamètre du défaut de revêtement. Il est prouvé que la densité de courant accroît quand la surface du défaut de revêtement décroît.

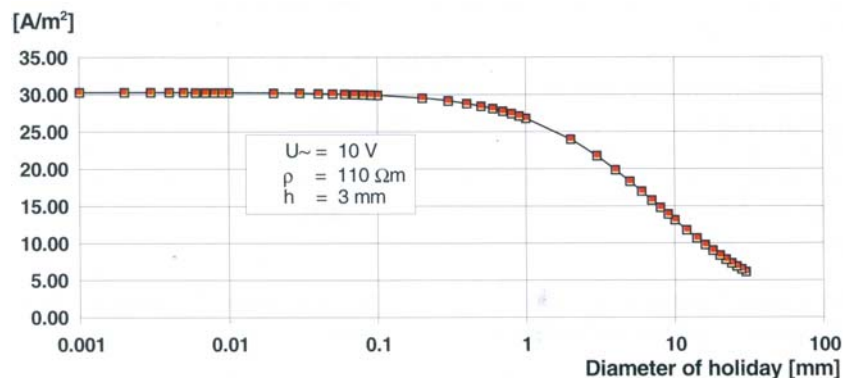


Figure 2.3 - Densité de courant alternatif en fonction de la dimension du défaut de revêtement.

Malgré ces effets physiques l'expérience pratique montre que les modifications de résistance de dispersion sont manifestement provoquées par le courant de protection cathodique et ne peuvent être expliquées uniquement à partir d'effets physiques simples :

- des déviations significatives dues à l'influence des conditions météorologiques sont à prévoir sur des échantillons sans protection cathodique et sans charge de courant alternatif (échantillons de référence). Les valeurs minimum et maximum varient approximativement d'un facteur 2 alors que les valeurs les plus élevées sont observées pendant les périodes d'été;
- la résistance de dispersion des échantillons sans protection cathodique s'accroît avec l'accroissement du temps d'exposition puisque la couche de rouille qui se développera entravera le passage de courant; Il a été observé que l'accroissement, durant une période de 3 années, était de 20%;
- pour les échantillons sans protection cathodique mais avec une charge de courant alternatif, la résistance de dispersion est virtuellement égale à celles d'échantillons sans charge de courant alternatif et sans protection cathodique;
- pour les échantillons avec protection cathodique et avec charge de courant alternatif, la résistance de dispersion peut augmenter de l'ordre de 100 fois ou décroître de l'ordre de 60 fois;

- pour les échantillons avec protection cathodique et avec charge de courant alternatif, la résistance de dispersion se comporte virtuellement de la même manière que les échantillons mesurés avec protection cathodique mais sans charge de courant alternatif.

2.3. Influences chimiques sur la résistance de dispersion

Nonobstant l'influence physique sur la résistance de dispersion telle que décrite ci-dessus, le chimisme formé localement dans le défaut de revêtement contribue largement à la variation de la résistance de dispersion tel que décrit ci-après.

2.3.1. Réactions chimiques provoquées par le courant de protection cathodique

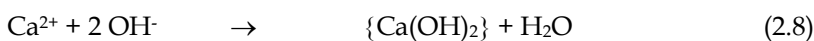
Les réactions ont lieu au défaut de revêtement, là où le courant de protection cathodique atteint la surface cathodique de l'acier. Elles provoquent la réduction de l'oxygène (2.2) et la libération d'hydrogène (2.3). Les deux réactions génèrent des ions hydroxydes (OH⁻); elles conduisent à un accroissement de pH à l'interface.

Dans la région de la cathode (défaut dans le revêtement), le courant de protection cathodique transporte les anions présents dans le sol (hydrogénocarbonates, sulfates, nitrates, OH⁻, chlorures, ...) loin de la cathode vers l'anode, et les cations (entre autres les ions de calcium, sodium, potassium et magnésium) vers la cathode.

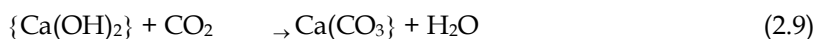
La production d'OH⁻ et l'intensité de la migration des ions décrite est directement proportionnelle à la densité de courant sur le défaut. Dans le sol adjacent au défaut, il se produit la formation de sels (hydroxydes alcalins et alcalino-terreux) dans la région du défaut; la quantité, la composition et les propriétés de ceux-ci dépendent de la composition du sol. Jusqu'à présent, on connaît relativement peu au sujet de l'influence de la composition du sol et de l'eau (l'eau du sol) sur les hydroxydes métalliques résultants. Par exemple, on ne sait pas si le type des hydroxydes émergents dépend seulement de cations dissous dans l'eau du sol ou si également des cations liées à des anions macro complexés de manière tels que des silicates (entre autres des argiles) sont inclus dans le processus de formation d'hydroxydes. Toutefois, les cations présents dans le sol peuvent être répartis en deux groupes selon leurs effets, à savoir, les cations alcalins et alcalino-terreux.

2.3.2. Sels formés à partir des cations alcalino-terreux

Les cations alcalino-terreux Ca²⁺ et Mg²⁺ forment des hydroxydes avec un relatif manque de solubilité qui décroît fortement avec l'augmentation du pH. Le niveau de pH est le plus élevé à l'interface métal/électrolyte en raison de la production de OH⁻ apparaissant directement à cet endroit (étant le site de la cathode). Puisque les ions OH⁻ migrent en tant qu'anions à partir de la cathode, un profil d'OH⁻ s'établit où la concentration en OH⁻ décroît avec la diminution de la distance par rapport à l'interface. Dans ces endroits où les produits de dissolution de Ca(OH)₂ sont trouvés, Ca(OH)₂ est précipité.



Grâce à la capture de CO₂ qui peut être présent dans le sol à des niveaux de concentration 25 fois plus élevés que dans l'atmosphère, ce Ca(OH)₂ peut être transformé en carbonates moins solubles (calcaire).



Le schéma de réaction pour le magnésium prend une allure analogue à celle expliquée pour les ions calcium. Dans le cas où les cations alcalino-terreux sont seuls présents, cette précipitation peut avoir lieu directement à l'interface métal/électrolyte (fig. 2.4).

Ces précipitations peuvent conduire à la formation de couches hautement résistives qui accroissent la résistance de dispersion de l'acier nu et après un certain temps vont réduire l'accès au courant de protection. Cet effet peut être très important de manière telle que le potentiel de protection ne sera plus obtenu sur de tels échantillons.

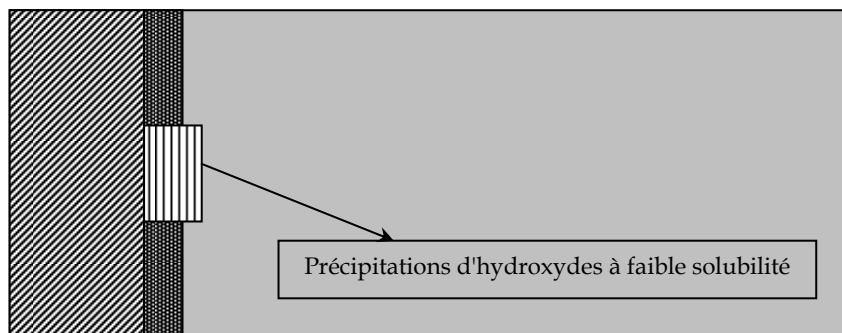


Fig. 2. 4. – eau du sol comprenant les seuls sels d'alcalino-terreux
Précipitations d'hydroxydes à faible solubilité de cations d'alcalino-terreux à l'interface à la phase frontière métal/électrolyte

2.3.3..... Sels formés à partir de cations alcalins

Dans le cas où seulement les cations alcalins (pas de cations alcalino-terreux) sont présents dans le sol, les mêmes réactions électrochimiques du sol apparaissent comme avec les cations alcalino-terreux.

Cependant, les sels de NaOH, KOH ou LiOH formés dans la zone du défaut sont hautement solubles et, de plus, fortement hygroscopiques, c'est-à-dire qu'ils ne forment pas de précipités faiblement solubles. Ils absorbent assez bien l'eau des environs et forment une solution alcaline aqueuse, par ex. de la lessive de soude caustique.



Grâce à la réception de CO_2 provenant du sol, le NaOH s'est transformé en carbonate de soude qui est également fortement soluble :



Les informations au sujet de la solubilité et du degré hygroscopique de ces sels sont présentées au tableau 2.1.

La formation de lessives hygroscopiques dans la zone des défauts conduit à une diminution de la résistance de dispersion et à un accroissement du courant de protection ainsi que du courant alternatif à l'endroit de ces défauts.

Salt	Dissolvability (g/L)	rF _{kr} (%)
NaOH	420	8.9
KOH	1070	9.3
Ca(OH) ₂	1.85	~99.5
Mg(OH) ₂	0.009	~100
Na ₂ CO ₃	71	87
K ₂ CO ₃	1120	43.2
CaCO ₃	0.015	~100
MgCO ₃	0.11	~100

Tableau 2.1 - Solubilité et degré hygroscopique des produits de réaction

Un degré hygroscopique de 87 % pour le Na_2CO_3 signifie que dans un environnement d'humidité relative de plus de 87 %, le Na_2CO_3 sera présent en solution aqueuse, et en dessous de 87 %, sous forme de sel cristallin. La solution aqueuse donne lieu à un gradient de diminution de la résistivité du sol adjacent, alors que le sel cristallin donne lieu à un gradient d'augmentation de celui-ci.

2.3.4. Mélange de cations alcalins et alcalino-terreux

Suivant le rapport de concentrations entre les cations alcalins et alcalino-terreux, des couches à haute résistivité ou des lessives à basse résistivité peuvent se former.

Les processus pouvant se produire sont schématisés à la figure 2.4.

Durant la phase initiale, le courant de protection cathodique provoque la migration des cations à travers les défauts et l'éloignement des anions. Cette migration d'ions dépend de la concentration et de la mobilité des ions dans la phase aqueuse du sol. La conductivité équivalente [$\Omega^{-1}\text{cm}^2\text{mol}^{-1}$], comme mesure de la mobilité des ions peut être utilisée (voir tableau 2.2).

Dans le cas où durant la phase de démarrage, un surplus de Ca^{2+} est présent dans la région du défaut, des précipitations de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se produisent (fig. 2.5).

Cations	Λ [$\Omega^{-1}\text{cm}^2\text{mol}^{-1}$]	Anions	Λ [$\Omega^{-1}\text{cm}^2\text{mol}^{-1}$]
H ⁺	349.8	OH ⁻	197.6
Na ⁺	50.1	Cl ⁻	76.3
K ⁺	73.5	HCO ₃ ⁻	75
Mg ²⁺	53.1	SO ₄ ²⁻	80
Ca ²⁺	59.5	NO ₃ ⁻	71.4

Tableau 2.2 – Conductivité équivalente Λ [$\Omega^{-1}\text{cm}^2\text{mol}^{-1}$] de différents ions

La densité de ces précipités peut augmenter de manière telle qu'un dépôt compact ou poreux se formera et réduira l'alimentation du courant de protection.

Toutefois si durant la phase de démarrage des cations alcalins atteignent cette interface, le pH peut fortement augmenter. En raison du degré hygroscopique des produits de réaction résultants, la résistivité de l'électrolyte à l'interface va décroître et le courant de protection cathodique augmenter en accélérant même les processus en cours. Après quelque temps, un état d'équilibre sera atteint (fig. 2.5). Dans la région d'interface, une lessive à haute concentration (pH de valeur 12 à 14) s'est développée.

Les OH⁻ migrent en s'écartant de l'interface. Avec l'accroissement de la distance de l'interface, le pH diminue. Dans la tranche de pH allant de 9 à 12, Mg(OH)₂ et Ca(OH)₂ sont précipités et si le CO₂ est présent dans le sol, transformés en carbonates. Par ce processus, le sol dans cette région sera solidifié et agglutiné.

2.3.5. Effets de ces processus sur la résistance de dispersion.

Ces processus chimiques dans la zone de défaut de revêtement ont une influence significative sur la résistance de dispersion de ce dernier. Des résultats avec des échantillons ayant une surface de 1 cm² ont démontré que la résistance de dispersion pouvait augmenter de l'ordre de 100 fois ou décroître de l'ordre de 60 fois, selon la composition du sol.

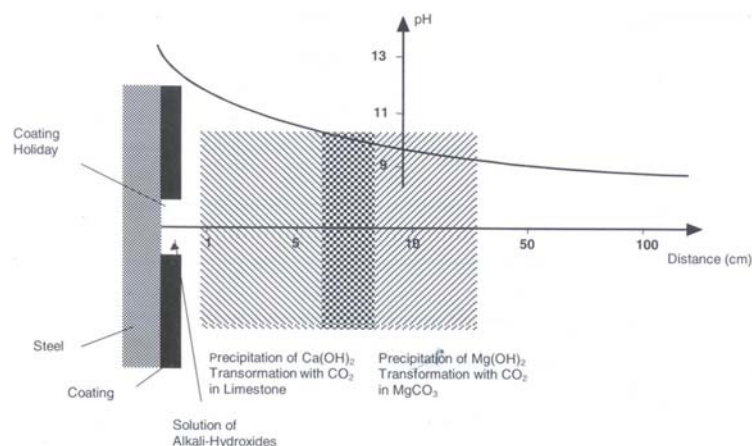


Fig. 2.5 - Eau du sol avec un mélange de sels métalliques alcalino-terreux et alcalins
Des précipitations d'hydroxydes à faible solubilité de cations alcalino-terreux à une certaine distance de l'interface métal/électrolyte.

3. MESURES DE LABORATOIRE

Dans ce qui suit, des exemples de techniques utilisées en laboratoire sont donnés dans le but de caractériser les facteurs relatifs aux phénomènes de corrosion par courant alternatif. Toutefois ces techniques sont aussi applicables sur terrain (sur des échantillons). Ces techniques ont été identifiées en mesures relatives à la caractérisation électrochimique et en mesures relatives à l'estimation de la vitesse de corrosion sous l'influence de courants alternatifs.

3.1. Mesures électrochimiques

3.1.1. Courbes de polarisation par courant continu

Une courbe de polarisation par courant continu décrit d'une manière générale le courant circulant vers ou partir du métal exposé dans une certaine situation comme une fonction du potentiel du métal soumis à des conditions stables. Cette courbe est une fonction du potentiel du métal étudié sous certaines conditions. A partir de cette courbe, le comportement électrochimique du métal dans cette solution en fonction du potentiel peut être évaluée. La condition du métal est normalement décrite aussi bien comme immunisée (sous une protection cathodique fonctionnant bien), corrosion active ou passive (les produits de corrosion recouvrant le métal donc créant une protection effective contre la corrosion).

En relation avec le courant alternatif, les contraintes suivantes sont soulignées :

- les conditions du métal (immune, corrosion active, passivité) sous courant continu ne sont pas sensées être similaires sous des conditions de courant alternatif (sinon la corrosion par courant alternatif induit ne peut pas se produire);
- les constantes de temps des processus électrochimiques impliqués ne peuvent être évaluées;
- la vitesse de corrosion sous courant alternatif ne peut pas être extrapolée à partir de la courbe;
- la possibilité de corrosion par courant alternatif induit dans un certain environnement ne peut directement (du moins jusqu'à présent) être évaluée à partir de la courbe.

La figure 3.1 est un exemple schématique de courbe de polarisation à partir de courant continu. Elle montre les régions d'immunité, de corrosion active et de passivité du métal. En outre, le potentiel, lorsque le circuit est ouvert, la région de protection cathodique propre, aussi bien que les régions de formation d'hydrogène et les régions de formation d'oxygène sont montrées.

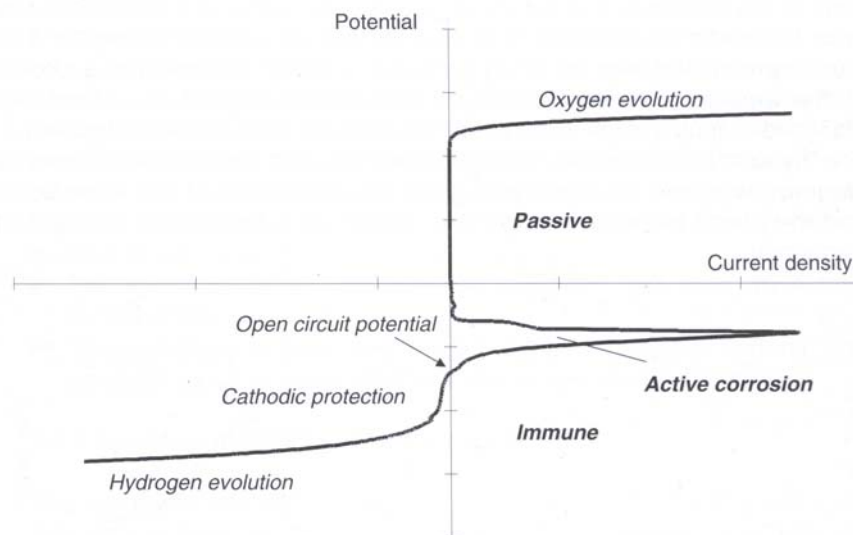


Fig. 3.1 - schéma de courbe de polarisation par courant continu montrant les régions d'immunité, de corrosion active et de passivité.

3.1.2. Commutation du signal d'onde rectangulaire

Par la commutation du signal du carré de l'ondulation on entend la variation soit du courant soit du potentiel à partir d'un état stable vers un autre état stable devant être atteint. La technique de l'instant off est une technique de commutation de signal; puisque le courant est interrompu et le potentiel est mesuré juste après la disparition de la chute de IR, toutefois avant la dépolarisation du métal. Si le potentiel est suivi pendant une longue période de temps, la décroissance du potentiel peut être enregistrée et être décrite de manière mathématique.

- les constantes de temps d'électrode peuvent être évaluées à partir de cette technique;
- les chutes de IR peuvent être identifiées;
- les courants alternatifs superposés peuvent influencer les comportements;
- les constantes de temps relatives à l'électrode de référence utilisée peuvent être difficiles à évaluer.

3.1.3. Spectroscopie d'impédance électrochimique

La mesure de la spectroscopie électrochimique (EIS) est un balayage de l'impédance du métal sur une large plage de fréquence allant du micro ou milli hertz jusqu'à la région du kilo ou méga hertz. La mesure nécessite un potentiel secondaire ou un courant secondaire, et un choix de l'amplitude de la perturbation sinusoïdale aux alentours de cet effet secondaire. La courbe idéalisée d'une telle mesure d'impédance est montrée dans la figure 3.2. Le tracé "Nyquist" donne la part d'impédance réelle et imaginaire dans un diagramme vectoriel, alors que le tracé présumé donne la magnitude de l'impédance et le décalage de phase entre le voltage et le courant comme une fonction de la fréquence appliquée.

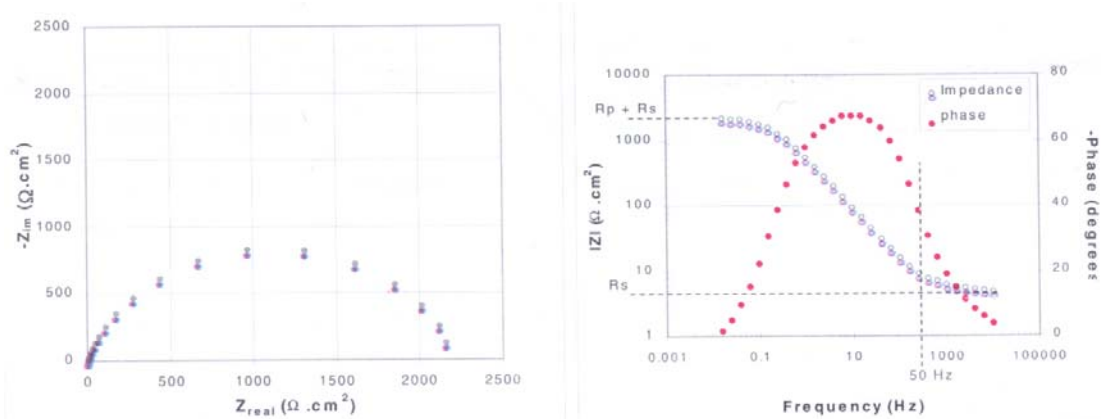


Figure 3.2 Tracé "Nyquist" idéalisé (à gauche) et tracé présumé résultant d'une mesure de EIS (à droite)

La mesure offre les possibilités suivantes en relation avec la corrosion par CA :

- La résistance de dispersion peut être mesurée directement;
- La résistance de polarisation du métal peut être évaluée;
- Les constantes de temps du processus concerné peuvent être évaluées;
- Les quantités ci-dessus sont censées être linéaires pour de petites valeurs (environ 10 millivolts) d'amplitude appliquées, mais à la fois de petites et grandes (plus réaliste) amplitudes peuvent être appliquées;
- La vitesse de corrosion par CA ne peut être évaluée à partir de ces mesures

3.2 Estimation de la vitesse de corrosion

Dans les cas de courant continu conventionnel les techniques électrochimiques décrites ci-dessus s'indiquent pour l'évaluation de la vitesse de corrosion. Cependant elles sont incorrectes dans le cas de corrosion par CA et d'autres techniques doivent être employées parmi lesquelles la mesure de perte de poids ou l'inspection visuelle et la mesure de résistance électrique sont celles qui sont préférées.

3.2.1. Perte de poids et examen visuel

La mesure de perte de poids est la plus rigoureuse pour caractériser le degré de corrosion. Elle rend simplement compte de la vitesse moyenne de corrosion apparue endéans un certain temps d'exposition en divisant la perte de poids par la période d'exposition. La technique peut être affinée en utilisant la microscopie pour caractériser la surface corrodée, par exemple en terme de degré de corrosion localisée, mesure de sa profondeur etc. Cependant la méthode nécessite un certain temps d'exposition entre autre un certain temps de corrosion de manière à fournir une bonne image de cette corrosion.

- La technique quantifie la vitesse moyenne de corrosion sur une période de temps étendue.
- La technique est très lente car une certaine perte de matière est nécessaire avant que la perte de poids puisse être mesurée valablement.

3.2.2. Technique de la résistance électrique (Electrical Resistance ER)

La technique de la résistance électrique est basée sur le phénomène que la résistance électrique dans un élément métallique s'accroît quand la section de passage de cet élément décroît en raison de la corrosion. La figure 3.3 est un exemple de la mesure de ER et le calcul associé de la vitesse de corrosion au cours du temps pour de l'acier protégé cathodiquement soumis à l'interférence de courant alternatif.

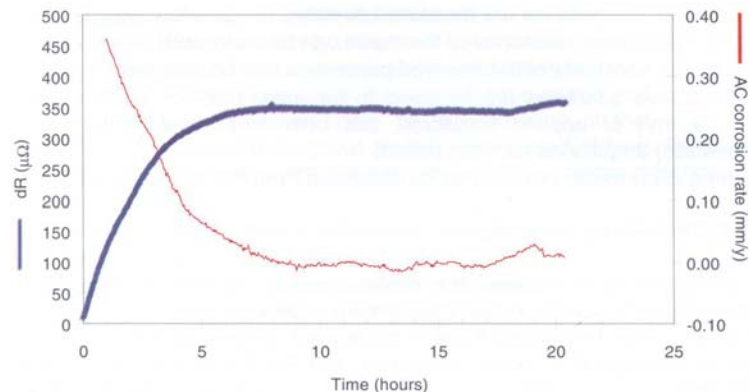


Figure 3.3 Exemple de la mesure de ER et vitesse de corrosion calculée comme une fonction du temps pour de l'acier protégé cathodiquement soumis à des courants alternatifs.

- La très haute résolution de la mesure de résistance et les effets de compensation de température font que la technique ER est à même de mesurer les vitesses de corrosion instantanées.
- La technique peut être employée dans n'importe quel environnement sans se soucier de la présence d'eau ni du signal électrique appliqué à partir de sources externes (entre autre la technique peut être utilisée sous des conditions de courant alternatif).

4. EVALUATION DU RISQUE DE CORROSION PAR COURANT ALTERNATIF.

La probabilité de corrosion par courant alternatif peut être évaluée selon des approches différentes :

- calcul du courant alternatif induit sur les conduites;
- mesures sur site.

4.1. Calcul du courant alternatif induit sur des conduites

4.1.1. Généralités

Cette approche est commode pendant l'étape de conception de la structure influençant ou influencée. Elle permet la prédiction de la probabilité de corrosion par courant alternatif dans des situations futures et de prendre les mesures appropriées. Suite aux tensions excessives sur des conduites, dues à des lignes de puissance à haute tension et des fils de traction aériens, la configuration des structures interférant et interférées et des équipements connectés doit être considérée d'un point de vue électrique. Tous les paramètres, qui déterminent le comportement électrique des structures s'influencent réciproquement, doivent être pris en considération.

Ils s'appliquent :

- au comportement électrique de la ligne de puissance à haute tension ou de la ligne de traction (la hauteur, le courant, la tension, les lignes, l'emplacement relatif des câbles de phase les uns par rapport aux autres, etc.);
- au comportement électrique de la conduite dans l'environnement (revêtement, sol, mise à la terre, etc.) et au comportement électrique entre les différentes parties de la conduite (liaisons équipotentielles, joints isolants, etc.);
- à l'organisation géométrique entre la conduite et les lignes de puissance à haute ou les fils de traction aériens (longueur de cheminement parallèle, distance réciproque, angle de croisement, etc.).

Pour les calculs, les plus mauvaises conditions devraient être prises en considération (tensions, courants). Comme celles-ci ne sont pas évidentes, il peut être nécessaire d'exécuter plusieurs calculs (plusieurs trains ou courts-circuits à différents emplacements, des conditions de charge différentes sur les lignes de puissance à haute tension, etc.) pour trouver l'interférence la plus sévère. Les caractéristiques et l'emplacement des lignes de puissance à haute tension, des lignes de traction, des sections de conduite et des équipements connectés doivent être considérés dans les conditions de conception, y compris tous les dispositifs de sécurité montés comme ils le sont au moment du calcul.

4.1.2. Quand est-il nécessaire de faire des calculs de courants alternatifs induits

On peut s'attendre à des tensions inadmissibles sur des conduites en raison des lignes de traction aériennes et des lignes de puissance à haute tension et nécessitant un examen approfondi si un des cas suivants est rencontré :

- La distance entre la ligne aérienne et la conduite est inférieure à

$$d=300.\rho^{1/2}$$

avec : d (m) = la distance entre la ligne aérienne et la conduite

ρ (Ohm x m) = la résistivité de sol (par exemple env. 2100 m dans le cas d'une résistivité du sol de 50 Ohm x m)

Dans un environnement urbain, en raison de la présence d'autres structures en métal dans le sol (câbles de puissance et de télécommunication, des conduites de gaz et d'eau), cette distance peut être réduite.

- La longueur du parallélisme est supérieure à 2.000 m.

4.1.3. Les paramètres à considérer

Pour les lignes de traction ou des lignes de puissance à haute tension les paramètres mentionnés ci-après sont importants en tant qu'entrées du modèle mathématique pour décrire la source d'interférence et doivent donc être mentionnés par le propriétaire de la source d'interférence :

- courants (A) et tensions (V) dans les conducteurs sous haute charge ou conditions de court-circuit;
- la hauteur (m) au-dessus du sol et la disposition de chaque fils de phase l'un par rapport à l'autre (m) (mesures sur les pylônes);
- l'emplacement et les caractéristiques des systèmes de mise à la terre des pylônes (Ohm), les dispositifs de limitation de tension.

Pour toutes les conduites et les équipements connectés, dans les limites définies au point 4.1.2., les paramètres mentionnés ci-après sont importants en tant qu'entrées du modèle mathématique pour décrire la sensibilité du système aux interférences et devraient donc être mentionnés par le propriétaire de la conduite :

- les coordonnées des conduites et des lignes à haute tension (pour calculer des distances entre les deux systèmes);
- la longueur de la conduite dans le secteur d'exposition (km);
- la profondeur d'enfouissement de la conduite (m);
- le diamètre extérieur de la conduite (millimètre);
- l'épaisseur de la conduite (millimètre);
- l'épaisseur du recouvrement isolant (millimètre);
- la résistance du recouvrement isolant (Ohm/m²);
- la résistivité de la conduite (Ohm x mm);
- les caractéristiques électriques du fluide circulant (si autre que gaz);
- la résistivité de sol (Ohm x m);
- l'emplacement et les caractéristiques des terres, des dispositifs de limitation de tension, des cellules de polarisation, de l'équipement électrique et/ou électronique, des dispositifs de protection cathodique et des joints d'isolation.

Les calculs sont exécutés sur des conduites et des lignes à haute tension, en utilisant des valeurs moyennes pour les paramètres qui ne peuvent pas être constants, c'est-à-dire la résistivité de sol, etc. Les paramètres à considérer peuvent varier selon l'algorithme de calcul appliqué. Les calculs considérant des conditions normales (tensions, courants) peuvent être exécutés pour permettre la comparaison avec des mesures sur le terrain.

4.1.4. Les algorithmes de calcul et les résultats

Les algorithmes de calcul sont définis dans le Volume III des Directives de l'ITU-T (CCITT) (accouplements capacitifs, inductifs et conducteurs) et dans le rapport CIGRE (voir références). Les résultats sont des tensions à long terme et à court terme dans les différentes sections des structures interférées.

4.2. Les mesures sur le site

Comme première approche, quelques mesures préliminaires peuvent être exécutées sur les conduites influencées. Selon les résultats, des actions plus spécifiques peuvent être prises, comme :

- mesures sur échantillons;
- mesures spécifiques;
- enquêtes dédiées.

4.2.1. Mesures préliminaires

Sur les sections de conduites dans le secteur d'exposition comme défini dans 4.1.2. les mesures suivantes peuvent être exécutées :

- mesures de tension alternative conduite - sol entre la conduite et une électrode de référence à des points de test (mesures instantanées);
- le temps d'exécution de chaque mesure sera exactement enregistré, pour permettre de calculer le courant alternatif induit plus tard dans les mêmes conditions que pendant les mesures;
- mesure du courant alternatif sur la mise à la terre existante des conduites;
- la résistance ohmique de la mise à la terre de la conduite;
- la résistivité du sol aux emplacements où des mesures de tension alternative conduite - sol ont été prises;
- 24 h d'enregistrement des mesures prises à des emplacements montrant le courant alternatif induit le plus haut pour les lignes de puissance à haute tension et aux sections influencées par des systèmes de traction à courant alternatif.

Toutes les mesures sur des conduites doivent être effectuées dans les conditions suivantes :

- toutes les stations de protection cathodique, les soutirages et les liaisons seront connectés dans les conditions normales de fonctionnement;
- toutes les terres seront connectées (cellules de polarisation, dispositifs de décharge de courant alternatif, condensateurs, etc);
- l'électrode de référence doit être située à la surface de la terre, aussi près que possible de la conduite.

4.2.2. Mesures spécifiques

Des mesures spécifiques doivent être prises sur le site dans les sections où les tensions alternatives sont plus élevées que 10 V ou là où les tensions le long de la conduite montrent des variations à des valeurs plus basses, indiquant une décharge possible de courant alternatif. Aucune technique de mesure simple ou critère d'évaluation du risque de corrosion par courant alternatif ne sont encore acceptés pour évaluer la corrosion par courant alternatif. Quelques techniques de mesure spécifiques avec critère associé sont utilisées :

- potentiel de conduite - sol;
- densité du courant;
- J_{ac}/J_{dc} (rapport des densités de courant alternatif et dc).

4.2.2.1. Potentiel sol-conduit

La méthode de mesure

Un échantillon d'acier avec une surface de recouvrement connue est installé dans le sol près de la conduite et y est connecté électriquement, afin de tester le même courant de protection cathodique et l'interférence par courant alternatif comme la conduite étudiée. On permettra à l'échantillon de se polariser. Une électrode de référence, permanente ou portable, sera placée dans le sol aussi près que possible de l'échantillon, de préférence intégrée à l'échantillon.

Dans un but de mesure, le potentiel instantané E_{off} entre l'échantillon et le sol peut être mesuré en débranchant l'échantillon de la conduite (mesurant le potentiel sans chute IR). Pour exécuter les mesures automatiquement un système de mesure peut être utilisé.

Ce système de mesure consiste en un dispositif d'enregistrement électronique qui lit et stocke des données périodiquement et n'est pas synchronisé avec l'interférence due au courant alternatif. Le dispositif mesure le potentiel quand l'échantillon est connecté à la conduite (E_{on}), déconnecte l'échantillon de la conduite, via un relais reed, mesure le potentiel E_{off} , 1 msec après le débranchement et connecte de nouveau l'échantillon à la conduite. Le potentiel E_{on} et le courant à l'échantillon sont mesurés et enregistrés.

En même temps, ce cycle est répété ensuite environ toutes les 20 msec. En raison de la désynchronisation du cycle de mesure par rapport à l'interférence due au courant alternatif, les mesures seront prises à tout moment pendant la période d'interférence due au courant alternatif, y compris les valeurs maximales.

Evaluation du risque de corrosion par courant alternatif

Utilisant cette technique de mesure, on considère la conduite protégée contre la corrosion par courant alternatif si le potentiel E_{eff} échantillon - sol est à tout moment plus négatif que la gamme de potentiel de protection, qui est -0,850 mV pour le fer ou l'acier dans un sol aérobie ou -0,950 mV dans un sol anaérobie contenant des bactéries réduisant les sulfates.

4.2.2.2. La densité de courant alternatif

La méthode de mesure

Un échantillon d'acier avec un défaut de recouvrement de surface connu est installé dans le sol près de la conduite et y est connecté électriquement, afin de subir le même courant de protection cathodique et l'interférence due au courant alternatif comme la conduite à analyser. Un ampèremètre est introduit dans le fil de connexion pour mesurer la valeur RMS (courant efficace) du courant alternatif. Les petits courants doivent être mesurés comme une baisse de tension dans une résistance (1 Ohm ou moins) ou en utilisant un ampèremètre de résistance zéro. La densité de courant RMS est alors calculée.

Evaluation du risque de corrosion par courant alternatif

En utilisant cette technique de mesure, on considère la conduite protégée de la corrosion par courant alternatif lorsque la densité de courant RMS est inférieure à 30 A/m².

4.2.2.3. Rapport des densités de courant (J_{ac}/J_{dc})

La méthode de mesure

Un échantillon d'acier avec un défaut de recouvrement de surface connu est installé sur ou dans le sol près de la conduite et y est connecté électriquement, afin de tester le même courant de protection cathodique et les mêmes interférences dues au courant alternatif que la conduite à analyser.

Un ampèremètre est introduit dans le fil de connexion pour mesurer les valeurs de courant continu et RMS du courant alternatif. Les petits courants doivent être mesurés comme une chute de tension sur une résistance (1 Ohm ou moins) ou en utilisant un ampèremètre de résistance zéro. De ces valeurs la proportion J_{ac}/J_{dc} est calculée.

Evaluation du risque de corrosion par courant alternatif

En utilisant cette technique de mesure, si le rapport de la densité de courant alternatif RMS à la densité de courant continu :

- est inférieur à 3, on considère que le risque de corrosion par courant alternatif est bas
- est entre 3 et 10, on considère que le risque de corrosion par courant alternatif est moyen, et il est conseillé de poursuivre les investigations
- est supérieur à 10, le risque de corrosion par courant alternatif est considéré comme élevé et des mesures immédiates de remédiation doivent être prises.

4.3. Échantillons, conception et installation

En appliquant des échantillons on doit considérer que leur résistance de dispersion sera modifiée par des paramètres physiques (la surface, la résistivité de sol) ainsi que par des paramètres chimiques (la formation de dépôts ou la formation de sels hygroscopiques causés par le courant de protection cathodique) (voir aussi le chapitre 2.)

Les découvertes des premières investigations des dégâts de corrosion sur des conduites ont montré une corrosion d'environ 1 cm² aux endroits où le revêtement fait défaut. Pour cette raison et pour des raisons pratiques, on recommande une surface de l'échantillon de 1 cm² pour le contrôle et pour l'évaluation du risque de corrosion par courant alternatif. La corrosion par courant alternatif survient principalement sur des petits / très petits défauts du revêtement, car une densité de courant plus haute est concentrée sur des plus petits défauts du revêtement. Si des plus grandes surfaces d'échantillon sont utilisées, le risque de corrosion dû à de plus petits défauts de revêtement ne peut pas être évalué sur base du critère de densité de courant ou sur base du critère de potentiel.

Différents types d'échantillons pour l'évaluation du risque de corrosion par courant alternatif peuvent être utilisés :

- échantillons portatifs non-permanents (par exemple échantillons tige) pour des mesures de densité de courant alternatif et de potentiel;
- échantillons enterrés permanents (par exemple échantillons de corrosion) pour l'évaluation de la corrosion par courant alternatif, la densité de courant alternatif, des mesures de potentiel, des mesures du développement de la résistance de dispersion.

4.3.1. Caractéristiques et installation d'échantillons portatifs non-permanents (mesures à court terme)

Des échantillons de tige d'acier recouverts, avec une surface de recouvrement connue (par exemple 1 cm²) sont souvent utilisés pour des mesures à court terme.

Afin de tester le même courant de protection cathodique et les mêmes interférences dues au courant alternatif que la conduite à l'étude, on introduit l'échantillon tige dans le sol près de la conduite et on l'y connecte électriquement via un fil de connexion. Les échantillons tige sont utilisés pour exécuter des mesures comme décrit dans 4.2.2.1. Techniques de mesure spécifiques sur site.

Leur forme permet l'insertion facile dans le sol et le bon contact électrique avec le sol. Un échantillon tige typique est représenté à l'image 4-A.

Les mesures avec les échantillons portatifs non-permanents ne tiennent pas compte des changements chimiques à long terme dus aux courants de protection cathodique (voir le chapitre 2.).

4.3.2. Caractéristiques et installation des échantillons enterrés permanents (mesures à long terme)

Les échantillons sont souvent utilisés pour l'évaluation à long terme de la probabilité de corrosion par courant alternatif. Ils sont aussi connus sous le terme d'échantillons de corrosion. L'échantillon de corrosion est installé dans le sol près de la conduite et y est connecté électriquement via un fil de connexion, afin d'éprouver le même courant de protection cathodique et les mêmes interférences dues au courant alternatif que la conduite à analyser. Souvent un jeu de trois échantillons de corrosion est installé au même emplacement. Des précautions doivent être prises afin :

- d'assurer un bon contact électrique à long terme entre l'échantillon et le sol;
- d'installer l'échantillon de corrosion dans les mêmes conditions de sol que la conduite;
- de positionner l'échantillon de corrosion et l'électrode de référence permanente l'un par rapport à l'autre;
- de prendre en considération l'influence sur l'échantillon due à des structures voisines, des gradients de potentiel ou d'autres échantillons;
- ne pas installer trop des échantillons au même emplacement.

Sur ces échantillons, des mesures spécifiques suivantes peuvent être exécutées (voir 4.2.2.) :

- mesures de potentiel;
- mesures de courant;
- mesures de la résistance de dispersion.

Après un certain temps (par exemple 12 mois), l'échantillon de corrosion est déterré pour examiner la corrosion. Si des marques de corrosion sont présentes, on peut s'attendre à de la corrosion de la conduite aux défauts de recouvrement. Des électrodes de référence qui sont installées pendant une longue période de temps peuvent fuir et diffuser la solution d'électrolyte dans le sol, changeant ainsi les caractéristiques du sol et augmentant la demande de courant de l'échantillon. Des échantillons de corrosion typiques avec leurs caractéristiques de construction sont représentés aux images 4-B, 4-C et 4-D.

Une installation typique de l'échantillon de corrosion est représentée à l'image 4-E.

4.4. L'emplacement des défauts de recouvrement et les caractéristiques du sol

Dans les sections qui sont le siège d'interférences (voir 4.1.2.), les actions suivantes pourraient être prises :

- étude de l'emplacement des défauts de recouvrement sur la section entière par des méthodes, capables de détecter de petits défauts de recouvrement (jusqu'à 1 cm²);
- mesure de la résistivité du sol et de la profondeur d'enfouissement de la conduite à l'emplacement des petits défauts de recouvrement, détectés par l'enquête;
- dégagement de la conduite à quelques défauts de recouvrement, où des calculs de courant alternatif induit indiquent des valeurs maximales, choisies selon le gradient de tension, la tension alternative ou des mesures de résistivité de sol;

- investigations complémentaires sur des petits défauts typiques de recouvrement par l'enregistrement de la tension alternative pendant 24 h et des mesures de résistivité du sol et de la profondeur de la conduite aux défauts de recouvrement;
- des tournées de recherche optimisées pour détecter des petites pertes de métal.

Si la corrosion est trouvée aux petits défauts de recouvrement, tous les défauts de recouvrement montrant des caractéristiques semblables doivent être dégagés et réparés.

La résistivité de sol

Une résistivité de sol basse ou très basse dans le voisinage de la conduite peut augmenter la corrosion par courant alternatif en permettant un courant alternatif de fuite élevé de la conduite vers le sol. La résistivité du sol peut être déterminée par la méthode Wenner à 4 points, soit sur le terrain ou en utilisant une prise de terre. La résistance de dispersion R_s (Ohm) d'un échantillon peut être calculée au moyen de l'équation :

$$R_s = \rho/2d$$

Avec d (m) = le diamètre de l'échantillon

ρ (Ohm x m) = la résistivité spécifique du sol

Au moyen de la résistance de diffusion de l'échantillon, le changement de résistivité de sol peut être contrôlé dans le temps.

Des précautions doivent être prises pour

- mesurer la résistivité de sol à la profondeur suffisante (sur le terrain)
- utiliser le sol au voisinage de la conduite (prise de terre).

Mesure de PH

Lorsqu'on mesure le pH, le niveau de pH à la surface de l'échantillon est très important. Cette valeur doit être déterminée immédiatement après l'excavation de l'échantillon, car la surface alcaline de l'échantillon est neutralisée très rapidement par le dioxyde de carbone de l'air. La meilleure pratique est d'utiliser les bandes d'indicateur de pH qui indiquent le pH avec une exactitude de 0,5 unité.

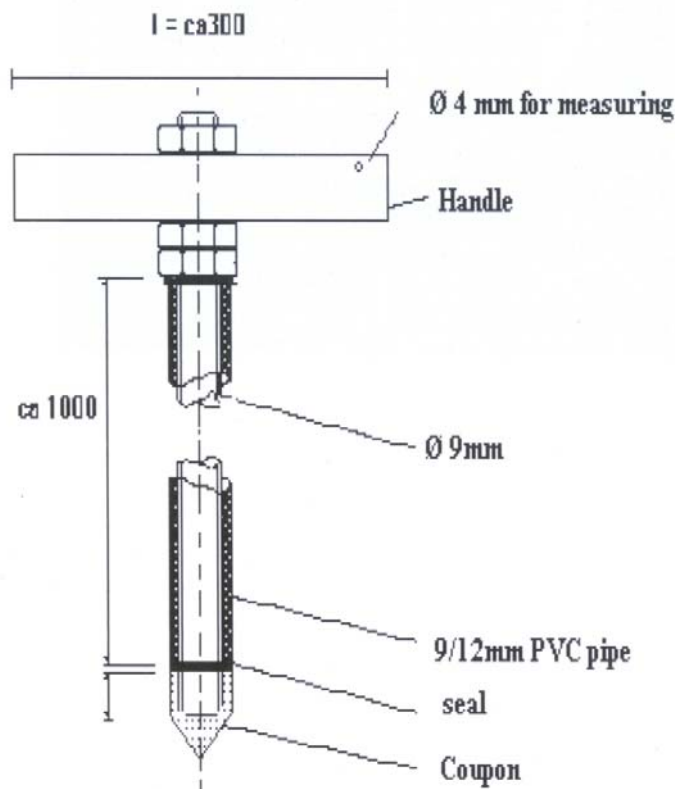


Image 4-A Echantillon tige



Image 4-B Echantillon de corrosion

Coupon for simulating a small coating fault

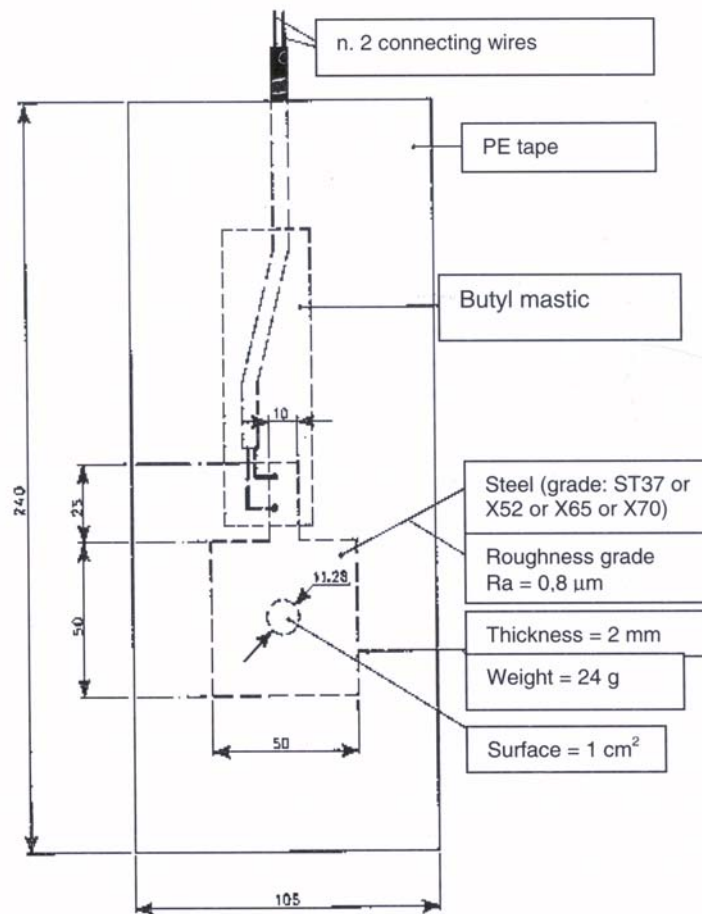


Image 4-C Echantillon de corrosion
Echantillon pour simuler un petit défaut de recouvrement

Le plat d'acier est couvert des deux côtés avec une bande de caoutchouc butyle PE. Avant l'application de la bande, le plat d'acier doit être peint avec une couche d'apprêt ("primer"). Au défaut, la couche d'apprêt ("primer") doit être enlevée après avoir appliqué la bande.

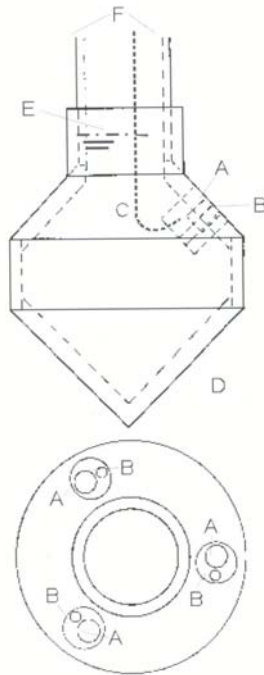


Image 4-D Echantillon de corrosion

Cet échantillon consiste en 3 cylindres ronds d'acier dont la surface en coupe transversale (A) de 1 cm² est inclinée à 45 ° par rapport à la surface de la terre. Ces cylindres d'acier sont moulés ensemble dans du PVC avec un filtre de verre aggloméré (B) et le câble connecté à l'arrière (C). Les cylindres d'acier sont pesés. Les sondes de mesure moulées sont collées dans une cavité ronde du corps en PVC (D). Les câbles sont amenés à la surface par le tube en PVC (E).

Après assemblage, la cavité du corps en PVC (D) est remplie jusqu'au niveau (E) avec une pulpe à haute viscosité, composée de bentonite et d'eau distillée. Pour la mesure de potentiel, une électrode de référence mobile CSE est mise dans la bentonite par le tube en PVC (F). La boucle de mesure de courant mène du CSE, à travers la bentonite, au filtre de verre aggloméré et plus loin au travers de l'interface de sol à la sonde de mesure.

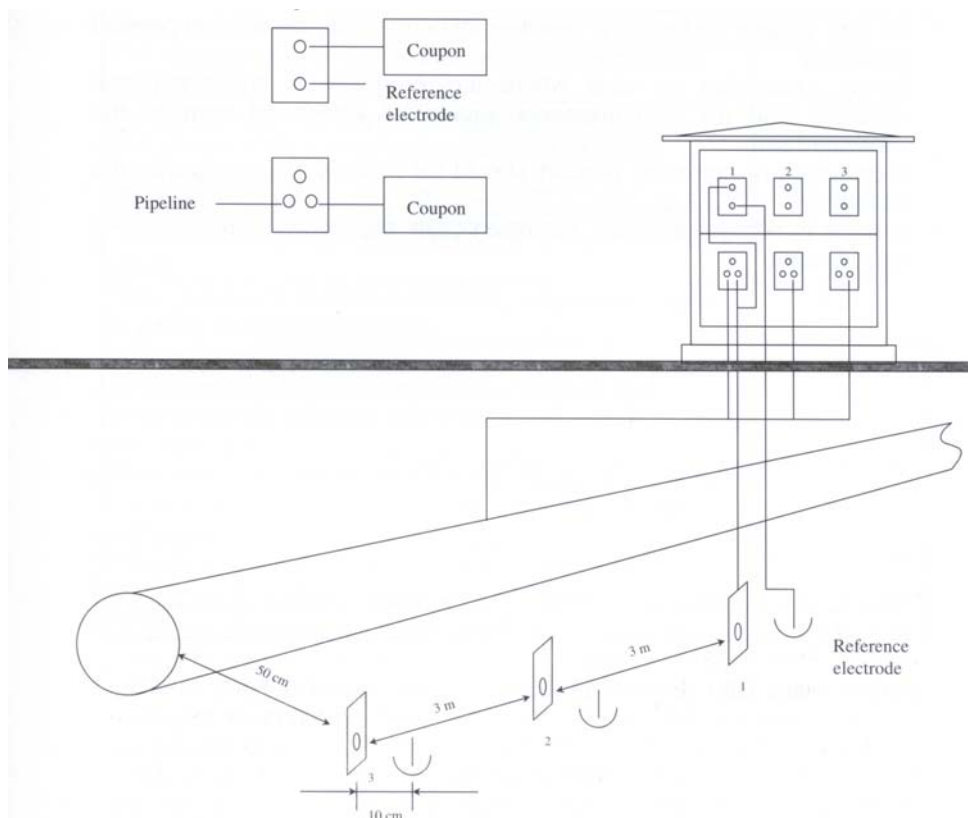


Image 4-E Installation typique des échantillons de corrosion

5. IDENTIFICATION D'UN CAS DE CORROSION PAR COURANT ALTERNATIF

On peut généralement découvrir un cas de corrosion par courant alternatif par la fuite de produit ou par des mesures ad hoc et des évaluations lors des fouilles. Quand la corrosion surgit sur une conduite enterrée à proximité de lignes à haute tension parallèles ou de systèmes de traction alimentés en courant alternatif, une vérification prudente de l'origine de la corrosion doit être faite. La présence réelle d'une tension de conduite - sol, due au courant alternatif, est généralement un pré-requis pour attribuer la corrosion au courant alternatif, mais des cas peuvent exister où la tension de courant alternatif (induction d'influence résistive) peut avoir été présente précédemment. Pendant des fouilles sur des sites où la corrosion de courant alternatif est soupçonnée, la résistivité du sol et des mesures de pH doivent être exécutées près du site creusé. Un échantillon de produits de corrosion doit être récolté et examiné en laboratoire. Pour reconnaître un cas de corrosion par courant alternatif, le questionnaire suivant peut être utilisé :

EVALUATION D'UN CAS DE CORROSION DE COURANT ALTERNATIF

Est-ce un cas de corrosion de courant alternatif ?

DONNEES	OUI	NON
Présence d'une tension de courant alternatif sur la conduite		
Présence d'un défaut de recouvrement (d'habitude de très petite taille - jusqu'à quelques cm ²)		
Présence d'une corrosion		
Mesures de P.C. (Protection Cathodique) ont montré des valeurs dans des critères acceptables		
Valeur de pH très haute (typiquement plus de 10)		
La forme de la corrosion est une fosse arrondie (comme un négatif d'une sphère)		
Le cratère de corrosion est beaucoup plus grand que le défaut de recouvrement		
Les produits de corrosion peuvent facilement être enlevés d'une seule pièce		
Après avoir enlevé les produits de corrosion, une couche noire dure est visible sur la surface de l'acier		
La résistivité du sol est basse / très basse		
La présence d'une grande zone décollée au-dessous du recouvrement (un halo est visible sur l'acier autour du cratère de corrosion)		
Présence d'une couche loin du secteur corrodé ou dans les produits de corrosion ayant de grandes quantités de carbonate de calcium		
Présence de magnétite dans les produits de corrosion (peut être vérifiée par un aimant permanent)		
Présence d'une formation de sol en pierres dures		

(*) si la plupart des réponses sont OUI, on peut conclure qu'il s'agit très probablement d'un cas de corrosion par courant alternatif.

6. REMEDIATION DE LA CORROSION PAR COURANT ALTERNATIF

Si les paramètres de production d'un redresseur de protection cathodique ne peuvent pas être mis en ordre pour obtenir les valeurs de protection mesurées selon le paragraphe 4.2.2.1, on doit donc appliquer des mesures de remédiation. Les mesures de remédiation contre la corrosion par courant alternatif visent à éviter des défauts de recouvrement ou à réduire la densité de courant alternatif aux défauts de recouvrement.

Les différentes méthodes peuvent être subdivisées comme suit :

- augmentation de la distance entre la conduite et les lignes à haute tension;
- configuration optimum des fils de phases et de terre;
- mise à la terre de la conduite;
- compensation de la tension induite;
- installation de joints isolants;
- réparation des défauts de recouvrement;
- échange du sol aux alentours de la conduite;
- utilisation de câbles de mise à la terre parallèles.

6.1 Augmentation de la distance entre la conduite et les lignes à haute tension / chemin de fer électrifié à haute tension

Cette mesure doit être considérée lors de la conception de la conduite ou de la ligne à haute tension / chemin de fer électrique. L'augmentation de la distance entre la conduite et la ligne à haute tension / chemin de fer électrique réduit le niveau de tension induite sur la conduite. L'image 6.1 montre les changements de tension induite selon la distance de cheminement parallèle.

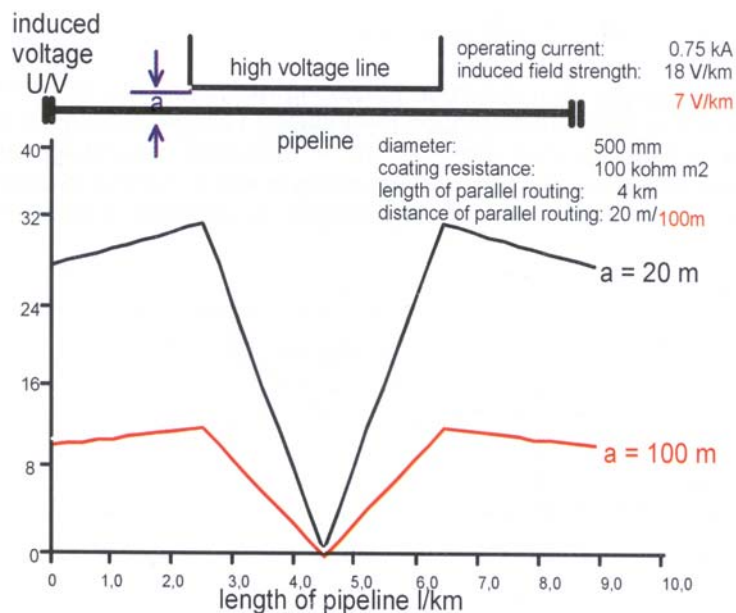


Figure 6.1 Influence sur la tension induite de l'augmentation de la distance entre une conduite et le fil de phase le plus éloigné d'une ligne de haute tension parallèle

6.2 Configuration optimum des fils de phase et de terre des lignes à haute tension / chemin de fer électrique

La conception du poteau à haute tension et la configuration des fils de terre sont des paramètres essentiels, quand on calcule la tension de courant alternatif induite, parce que c'est la différence géométrique de la distance de la conduite à chaque fil de phase, qui conditionne le calcul.

La manière "la moins coûteuse" pour réduire la tension induite est de transposer les fils de phase, ce qui signifie changer physiquement la position du fil de phase sur le poteau à haute tension, trois fois au moins, dans une zone d'interférences. Cette mesure inclut :

- configuration géométrique des phases R, S, T sur le poteau;
- configuration géométrique des fils (s) de terre;
- emplacement des poteaux de transposition.

6.3 Mise à la terre de la conduite avec des électrodes de terre

La mise à la terre correspond à une réduction de résistance de recouvrement de la conduite et est une mesure efficace pour réduire la tension induite. La réduction de la tension induite à moins de 10 V par exemple, exige une mise à la terre avec une résistance inférieure à quelques Ohm. La mise à la terre est bien connue pour protéger une conduite contre des tensions de contact inadmissibles. La figure 6.2 en indique le principe.

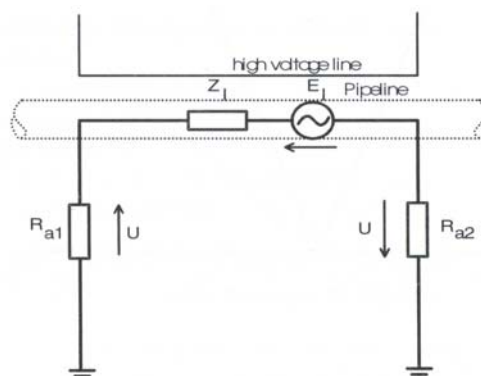


Figure 6.2 Circuit équivalent d'une conduite enterrée en interférence avec une ligne à haute tension

Z_L signifie l'impédance par unité de longueur de conduite, E_L la force des champs électriques induits par unité de longueur. Dans la figure 6.2, la résistance du revêtement et les sections de conduite dépassant le cheminement parallèle avec la ligne à haute tension sont négligées dans un but admissible de simplification. A la fin du cheminement parallèle, la conduite est mise à la terre avec des électrodes $R_{a1} = R_{a2} = R_a$.

Dans la pratique, des électrodes de terre concentrées aux extrémités d'un cheminement parallèle peuvent être utilisées ou une mise à la terre continue, c'est-à-dire que des électrodes de terre sont (plus ou moins) également distribuées le long de la conduite. Le choix des mesures appropriées tiendra compte de la résistance de terre nécessaire à la réalisation de la réduction de tension de courant alternatif induite souhaitée (par exemple en utilisant des programmes de simulation informatiques). Les considérations suivantes sont basées sur une terre concentrée d'une conduite en interférence avec une ligne à haute tension. Selon la figure 6.2, on a :

$$\frac{U}{R_a} = \frac{E_L}{2R_a + Z_L}$$

U est la tension entre la conduite et la terre éloignée :

$$U = \frac{E_L}{2 + Z_L / R_a}$$

Pour $R_a \gg Z_L$ (cela correspond généralement à une conduite non mise à la terre) donc $U = E_L/2$. Une mise à la terre efficace est réalisée, si $R_a = Z_L/2$, ce qui est généralement suffisant pour réduire les tensions induites aux tensions de contact admissibles. L'impédance d'une conduite en acier est de l'ordre de 0,5 Ω /km pour les fréquences techniques de 50 Hz et 16^{2/3} Hz. Ainsi la réduction de la tension d'interférence à un certain % d' E_L (comme il peut être nécessaire de réaliser une réduction suffisante de densité de courant alternatif) peut exiger une résistance de terre basse des électrodes de terre. Dans certaines conditions de sol (par exemple les couches de roches près de la surface), il peut être difficile de réaliser une résistance de terre assez basse.

Comme exemple d'installation possible de mise à la terre, des bandes de mise à la terre (par exemple en cuivre, en zinc) de certaines longueurs sont placées dans le sol et connectées à la conduite. La longueur de la bande doit être calculée pour réaliser la mise à la terre suffisante avec une résistance de terre de quelques Ohms. Les bandes peuvent être placées dans la même tranchée que la conduite enterrée, mais pour éviter l'influence défavorable des bandes de mise à la terre sur les mesures de défaut de recouvrement, on recommande leur installation longitudinalement à la conduite à quelques mètres de distance.

La mise à la terre de la conduite comme mesure de remédiation peut être faite en : - direct
- indirect

Le système de mise à la terre directe est réalisé en connectant directement la conduite et l'électrode de terre via des câbles au poste de test. L'utilisation du système de base direct augmente la valeur du courant de sortie du redresseur de protection cathodique parce que les électrodes de terre se comportent comme des défauts de recouvrement.

Le système de mise à la terre indirecte fonctionne avec une unité de séparation. L'unité est un dispositif électrique (cellule de Kirk, semi-conducteurs, excitateurs, unité de condensateurs etc) qui fournit la séparation électrique entre la conduite et la mise à la terre. Quelques unités peuvent être contrôlées par la tension induite, d'une telle façon, que les mises à la terre sont connectées seulement, quand la tension de courant alternatif induite atteint un certain niveau. En augmentant ce niveau par exemple en raison de l'influence de la tension de courant alternatif, l'unité permet de mettre suffisamment la conduite à la terre.

Dans certains systèmes ces unités peuvent être échantillonnées de manière synchrone avec les redresseurs de protection pour mesurer les potentiels classiques "on" et "off" de la conduite. Certains types d'unités de séparation susmentionnées peuvent influencer le processus de détermination du tracé de la conduite en raison de la décharge de courant alternatif vers la mise à la terre.

6.4 Compensation de tension alternative induite

6.4.1. Compensation totale

La réduction de tension induite peut être réalisée en introduisant des tensions alternatives E_1 et E_2 dans la connexion entre la conduite et les électrodes de terre R_{a1} et R_{a2} respectivement (figure 6.3), ces tensions présentant un déphasage de $\varphi = 180^\circ$ par rapport à la tension de courant alternatif conduite/sol à l'emplacement de l'installation.

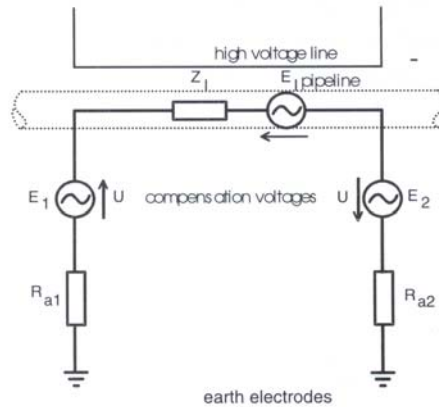


Figure 6.3 Circuit équivalent (simplifié) d'une conduite influencée par une haute tension avec un équipement de compensation de tension de courant alternatif

En se basant sur des conditions de simplification $R_{a1}=R_{a2}=R_a$ et $E_1=E_2=E$, cela donne $U=U_1=U_2$ et :

$$U = \frac{E_L + EZ_L / R_a}{2 + Z_L / R_a}$$

Dans le cas de $U=0$, qui correspond à une compensation complète de tension induite, cela devient :

$$E = -E_L \frac{R_a}{Z_L}$$

Si E_1 et E_2 sont ajustés de cette façon une compensation complète de la tension induite est possible. Le courant qui doit être fourni par les sources de courant alternatif E_1 et E_2 sera :

$$I = \frac{E_L}{Z_L}$$

Pour des applications pratiques la puissance P , exigée de E_1 et E_2 est importante. Dans les conditions de simplification mentionnées ci-dessus elle est :

$$P = EI = -E_L \frac{R_a}{Z_L} \frac{(-)E_L}{Z_L} = E_L^2 \frac{R_a}{Z_L^2}$$

Cela signifie que la puissance exigée augmente proportionnellement au carré de la tension induite et augmente aussi avec la diminution d'impédance par unité de longueur. Les considérations suivantes doivent indiquer l'ampleur de la puissance exigée.

Exemple 1

Cheminement parallèle de 4 km d'une conduite DN 800 avec une ligne à haute tension. La force des champs électriques induits est estimée à 15 V/km créant une tension totale $E_L = 60V$ au travers de la section de conduite subissant l'interférence. L'impédance est par unité de longueur $Z_L = 0,5 \Omega / km$; ce qui veut dire que l'impédance de la section interférée est $Z_L = 2 \Omega$. Les résistances de terre R_{a1} et R_{a2} sont estimées à 2 Ω chacune. La puissance P exigée d'un équipement de compensation est alors de 1.800 W.

Exemple 2

Cheminement parallèle de 20 km d'une conduite DN 300 avec une ligne à haute tension. La force des champs électriques induits est estimée à 15 V / km créant une tension totale $E_L = 300 V$ à travers la section de conduite subissant l'interférence. L'impédance est par unité de longueur $Z_L = 0,73 \Omega / km$; c'est-à-dire que l'impédance de la section interférée est $Z_L = 14,6 \Omega$. Les résistances de terre R_{a1} et R_{a2} sont estimées à 2 Ω chacune. La puissance P exigée d'un équipement de compensation est alors approximativement de 850 W. Dans de tels cas idéaux une compensation complète de tension de courant alternatif induite le long de la conduite complète, c'est-à-dire aussi à l'extérieur de la section de cheminement parallèle, pourrait être possible. Comme en pratique le contexte géographique à proximité ne correspond généralement pas à ces cas idéaux, il doit être tenu compte qu'une compensation complète ne sera pas réalisable. C'est pourquoi nous pouvons à peine espérer la compensation avec $U_{a.c.} = 0$. En outre, la puissance exigée sera extraordinairement importante en cas des sections de conduite courtes mais fortement interférées.

6.4.2. Compensation partielle

Les difficultés résultant d'une consommation électrique importante peuvent être surmontées si des compartiments de compensation sont connectés à la conduite via des diodes comme présenté à la figure 6.4.

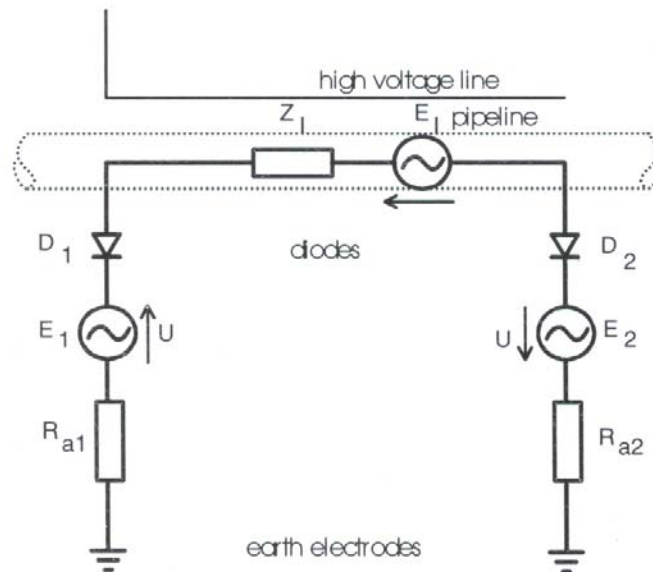


Figure 6.4 Diagramme équivalent (simplifié) d'une conduite influencée par une haute tension avec des compartiments de compensation et des diodes pour compenser la partie positive de tension de courant alternatif induite

Dans ces conditions la partie positive de la tension de courant alternatif induite est exclusivement compensée, ainsi la conséquence ne sera pas une réduction de la densité de courant alternatif dans un défaut de recouvrement. Cette méthode postule que la partie positive de la tension de courant alternatif provoque exclusivement de la corrosion. Ce principe correspond aux considérations mentionnées dans le chapitre 4.2.2.1 où nous avons estimé que la corrosion est réduite avec succès si le potentiel libre IR du défaut de recouvrement n'excède à aucun moment le potentiel de protection $U = -850$ mV.

La consommation électrique des compartiments de compensation correspond maintenant à un redresseur simple, qui est ajusté à une tension de sortie générant un potentiel de l'ordre de la tension de courant alternatif induite. L'inconvénient de cette méthode est clairement le sur-potentiel extrêmement négatif qui est établi sur la conduite et qui fluctue maintenant avec la tension de courant alternatif induite. Particulièrement, dans le cas des conduites à recouvrement bitumeux, il est nécessaire de considérer cela du point de vue interférence par courant continu. En cas d'acier à grande résistance (X80) cela peut aussi avoir de l'importance vis à vis de la fragilité de l'acier due à l'hydrogène.

6.5 Installation de joints d'isolement pour interrompre la conductibilité longitudinale des conduites

En principe une réduction de la tension induite peut être réalisée en utilisant des joints d'isolement, qui sont installés pour interrompre la conductibilité des conduites car la force des champs électriques dans la conduite est proportionnelle à la longueur de cheminement parallèle. Si cette méthode est utilisée, les points suivants doivent être considérés :

- l'installation du joint d'isolement dans la section conduite subissant l'interférence réduit la valeur maximale de tension de courant alternatif induite, qui est proportionnelle à la longueur de section interférée parallèle;
- les tensions de courant alternatif des deux côtés du joint d'isolement ont un changement de phase de 180° . La tension de courant alternatif mesurée sur le joint d'isolement est le double de la tension maximale.

Un exemple pratique d'installation de joints d'isolement consiste à isoler une branche de conduite d'une conduite principale interférée par une installation à haute tension pour empêcher la diffusion de tension de courant alternatif sur cette branche.

6.6 Réparation du recouvrement endommagé

Les conduites recouvertes de PE ont un taux de défaut de recouvrement d'environ 1 par km ou moins. Grâce aux méthodes connues de localisation des défauts de revêtement, ceux-ci peuvent être détectés et réparés. Il est nécessaire de se souvenir que le risque de corrosion par courant alternatif est plus important sur de petits défauts que sur des grands. Pour réaliser une protection suffisante contre la corrosion par courant alternatif, il faut vérifier qu'aucun défaut complémentaire ne surgit sur la conduite durant son utilisation ultérieure. Parce que l'on ne peut pas garantir des conditions parfaites et de valeur pendant la durée de vie entière d'exploitation de la conduite, cette mesure doit être combinée avec d'autres mesures de remédiation contre la corrosion par courant alternatif.

6.7 Changement du sol aux alentours de la conduite

La densité de courant alternatif à un défaut de revêtement peut être réduite en remplaçant le sol de faible résistivité aux alentours de la conduite par un sol de résistivité plus grande (par exemple du sable). C'est une procédure très coûteuse, particulièrement pour des conduites existantes. Elle ne peut seulement être prise en considération que sur des sections de conduite très petites. Comme l'évolution de la composition chimique du nouveau sol au cours du temps est inconnue, en raison de l'échange de composants avec le "vieux" sol environnant, l'efficacité à long terme de cette méthode est douteuse et doit donc être vérifiée avec des échantillons. Il est très important de se rappeler que, selon la composition chimique du sol, les sels hygroscopiques provenant de la réaction du courant de protection cathodique sur de petites/très petites interfaces de défaut de revêtement peuvent transformer des sables de haute résistivité en un matériau de faible résistivité.

6.8 Utilisation de câbles de terre parallèle

Si un fil de mise à la terre enterré est placé à côté de la conduite et n'est pas directement connecté, il affectera la tension induite, parce que une partie du champ électrique se concentrera sur le métal du fil de terre. Il provoquera une réduction de la tension de courant alternatif induite dans la conduite. Les bénéfices de cette méthode très coûteuse sont cependant pauvres à long terme car la réduction de tension induite obtenue est de seulement 5 %.

6.9 Résumé des mesures de remédiation

Le processus décisionnel pour l'application des mesures de remédiation de la corrosion par courant alternatif postule que la solution la moins chère est celle qui garantit une protection suffisante contre la corrosion par courant alternatif. Le tableau suivant récapitule les différentes mesures de remédiation au courant alternatif avec leurs avantages et leurs inconvénients.

Tableau 6.1 Résumé des mesures de remédiation

Mesure de remédiation	Avantages	Inconvénients
Augmentation du courant de sortie de PC (protection cathodique)	Bon marché Très facile à fournir	- Seulement possible en cas d'interférence très faible de courant alternatif
Augmentation de la distance entre la conduite et les lignes à haute tension / chemin de fer électrique		- Solution très efficace mais seulement possible lors de la réalisation de nouvelles conduites ou installations de systèmes sources d'interférences - Impossible pour des systèmes existants
Organiser les fils de phase et de terre des lignes à haute tension		- Possible seulement pour la mise en œuvre de nouvelles lignes à haute tension - La solution peut seulement

		être apportée par la compagnie d'électricité
Mise à la terre de la conduite	En général, solution bonne et efficace du point de vue du coût	- Des problèmes peuvent apparaître dans des sols à haute résistivité dus à une grande résistance de la mise à la terre
Compensation de la tension de courant alternatif		- Difficile à mettre au point - Coûts d'installation et d'exploitation élevés
Installation de joints d'isolement	Bonne possibilité de varier la configuration optimum par calcul et étude	- L'installation requiert une intervention directe sur la conduite en exploitation
Réparation des défauts de revêtement		- Nécessite des mesures complémentaires
Echange du sol à proximité de la conduite		- Comportement discutable des nouveaux remblais au cours du temps
Utilisation de fils de terre		- Coût élevé et efficacité faible

7 - REFERENCES

1 CIGRE Report: Guide on the influence of High Voltage AC Power Systems on Metallic Pipelines -1995

2 CCITT: Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified rail' lines. Vol III "Capacitive, inductive and conductive coupling: physical theory and calculation methods" - ITU Geneva 1989

3 CEI 9-34 "Effects of electromagnetic interferences caused by a.c. railway contact lines on pipelines. Admissible values and protection measures."

4 AfK Recommendation

5 IGU 1994 Milan - Fault location on pipeline coatings