

Utilisation de l'énergie solaire dans la protection cathodique de canalisations enterrées

F. Mohellebi ^{1*}, F. Hellal ², M. Khalfi ¹ et S. Kaci ¹

¹ Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles, Département de Génie Chimique

² Département de Métallurgie

Ecole Nationale Polytechnique,

10, Avenue Hassen Badi, El Harrach, Alger, Algeria

(reçu le 07 Janvier 2014 – accepté le 31 Mars 2014)

Résumé - Les applications industrielles principales de la protection cathodique concernent les canalisations enterrées ou immergées. Le choix d'une méthode de protection contre la corrosion électrochimique se fait d'une part, selon le milieu environnant et d'autre part, selon les considérations économiques. La protection cathodique 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. 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 et il correspond au seuil d'immunité. Deux types de systèmes de protection cathodiques sont couramment appliqués : Les systèmes de protection galvanique utilisent les anodes galvaniques, également appelées les anodes sacrificielles, qui sont électrochimiquement plus électronégatives que la structure à protéger et les systèmes à courant imposé, par le biais d'un générateur de courant qui débitera un courant continu de l'anode vers la structure à protéger. L'objet de cette étude est de dimensionner un système de protection cathodique d'un pipeline par soutirage de courant avec appoint électrique d'énergie solaire.

Abstract – Industrial applications of cathodic protection are very common in buried or submerged pipes protection. The choice of a given method of protection depends on the one hand, on the surrounding environment and on the other hand, on economic considerations. cathodic protection is usually inexpensive and effective over a long period of time when properly mastered and when there is a good knowledge of the environment conditions. The application of this technique aims to decrease the polarization potential of the metal to a level for which the corrosion rate is reduced significantly. In order for galvanic cathodic protection to work, the anode must possess a lower electrochemical potential than that of the cathode (the target structure to be protected). Two types of cathodic protection systems are commonly used: galvanic protection systems using galvanic anodes, also called sacrificial anodes, and the impressed current cathodic-protection systems where a current generator supplies a current from the anode to the structure to be protected. The purpose of this study is to size a cathodic protection system of a pipeline by drawing current with electric solar energy booster.

Mots clés: Corrosion - Canalisations enterrées - Protection cathodique - Soutirage de courant - Générateurs solaires.

1. INTRODUCTION

L'investissement dans la construction d'un pipeline consiste, comme pour toute réalisation industrielle, à consentir une dépense immédiate en vue d'obtenir des revenus futurs avec des charges d'exploitation et de réparation les moins élevées.

Les frais de construction d'un tel ouvrage sont toujours élevés. Il est alors important d'assurer la bonne gestion du capital ainsi investi. Il convient donc d'accroître au

* mohellebifaroudja@yahoo.fr

maximum la durée de vie de l'ouvrage et d'éviter les arrêts imprévus susceptibles d'entraîner des manques à gagner importants. Du fait de la corrosion, près de 15 à 20 % de la production mondiale en acier est détruite chaque année. Ceci correspond à une perte équivalente à 4 à 5% du produit interne brut de chaque pays industrialisé [1].

La protection cathodique est un moyen électrochimique efficace de lutte contre la corrosion. En effet, elle permet d'abaisser le potentiel de la structure métallique à protéger à un potentiel où la réaction de corrosion ne peut avoir lieu; ce potentiel est dit 'seuil d'immunité'.

La protection cathodique par soutirage de courant est la méthode préconisée dans ce travail. Elle consiste à mettre à profit l'effet d'un courant électrique injecté dans l'électrolyte à partir d'une anode déversoir. Nous avons utilisé pour cela une source de courant continu dont le pôle positif est relié à l'anode et le pôle négatif à la structure à protéger. Habituellement, l'alimentation des systèmes de protection cathodique se fait à partir des réseaux de distribution d'énergie électrique par l'intermédiaire des transformateurs- redresseurs.

En cas d'absence de tels réseaux ou pour d'autres raisons techniques ou économiques, il peut être intéressant de disposer de sources autonomes dont le lieu d'installation n'est plus tributaire d'un réseau. Le développement des générateurs solaires donne une nouvelle sécurité et une solution économique pour l'énergie nécessaire à la protection cathodique. L'Algérie est un pays riche en pétrole, en gaz mais aussi ... est très ensoleillé. Forts de cette réalité, nous avons, dans le cadre de cette recherche, tenté d'optimiser cette technique.

2. PROTECTION DES OUVRAGES ENTERRES

2.1 Principe de la protection cathodique

Le principe de la protection cathodique repose sur l'idée d'inverser le rôle électrochimique de l'ouvrage à protéger, en favorisant une réduction cathodique à son niveau, et en reportant la réaction d'oxydation sur une autre structure, dont on accepte a priori la dégradation. On comprend facilement la méthode de protection cathodique par l'utilisation des courbes de polarisation [2].

On représente conventionnellement les courbes de polarisation par la densité de courant i (A/m^2) en fonction du potentiel E (V) de la pile de corrosion (structure – milieu) mesuré par rapport à une électrode de référence (Fig. 1).

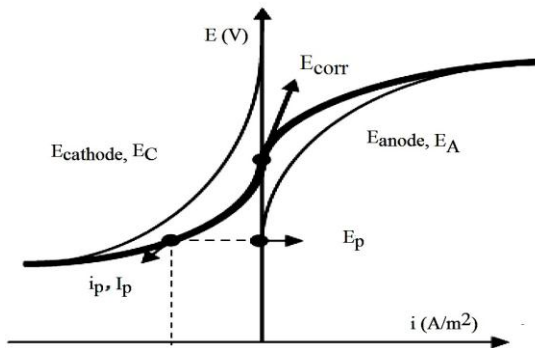


Fig. 1: Courbe de polarisation théorique

La courbe en trait gras est considérée comme étant la somme de deux courbes élémentaires, l'une caractérisant la réaction anodique et l'autre la réaction cathodique. Le point particulier noté (E_{CORR}) est représentatif de la corrosion naturelle du métal. Si on impose au métal de la structure un potentiel E_p inférieur au potentiel anodique E_A , le point où le courant anodique est nul, il n'y a plus de réaction d'oxydation possible. La structure est le siège seulement d'une réaction cathodique (réduction).

C'est le principe même de la protection cathodique. En contre partie, il est nécessaire de fournir des électrons en quantité suffisante, ceci se traduit par le courant de protection I_p . Il existe deux manières de réaliser la protection cathodique. Nous citerons la protection cathodique par anodes sacrificielles et la protection cathodique par courant imposé.

2.1.1 Protection par anodes sacrificielles

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 est un métal moins noble qui constitue l'anode. 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 la figure 2.

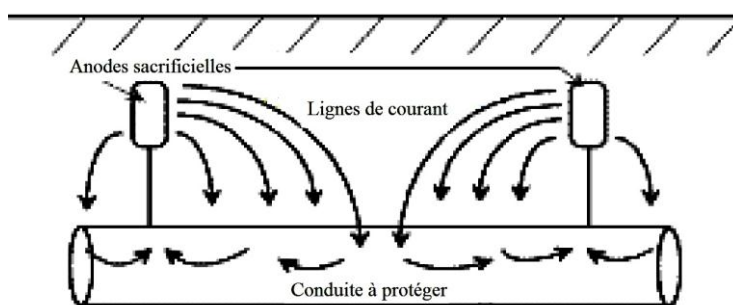


Fig. 2: Protection cathodique par anodes sacrificielles

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.

2.1.2 Protection par courant imposé (soutirage de courant)

La protection par courant imposé (ou de soutirage) utilise une source d'énergie électrique en courant continu qui débite dans un circuit comprenant (Fig. 3): ▀ un déversoir (ou masse anodique), ▀ l'électrolyte (sol ou eau) et ▀ 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 [3].

3. ETUDE DE LA PROTECTION CATHODIQUE PAR SOUTIRAGE DE COURANT AVEC APOINT DE L'ENERGIE SOLAIRE

3.1 Présentation de l'ouvrage

Les caractéristiques de la conduite à protéger sont résumées dans le **Tableau 1**.

Tableau 1: Caractéristiques de l'oléoduc

Type d'ouvrage matériau	Longueur Totale (km)	Diamètre Extérieur (m)	Epaisseur des tubes (mm)	Surface à protéger (m ²)	Résistance linéaire conduite (Ω/m)	Résistance d'isolement Pour 20 %. (Ω/m^2)	Résistance d'isolement au m.l. (Ω/m)
Oléoduc acier	300	0.762	10.31	718168.08	7.6×10^{-6}	8000	3341.8

3.2 Etude du tracé

L'étude du tracé révèle des points spéciaux, points où des mesures complémentaires concernant la protection cathodique doivent être prises. Il s'agit notamment:

- d'un croisement avec une ligne de distribution d'énergie électrique basse tension au niveau du point kilométrique (PK) 255.67. Un transformateur- redresseur pourrait être utilisé,

- de croisements avec d'autres structures métalliques enterrées aux points kilométriques (PK) 15 et 295. Une attention particulière est alors requise.

En outre, la conduite traverse des routes au niveau des points kilométriques (PK) 150 et 265. L'utilisation de gaines de protection mécanique s'avère indispensable.

3.3 Profil de résistivité

La résistivité du sol sur toute la longueur de l'oléoduc, mesurée selon la méthode des quatre terres [4], révèle deux zones bien distinctes (Fig. 3): une zone de grande résistivité (points kilométriques 0 et 130) où l'utilisation des déversoirs est impossible et une zone de faible résistivité (points kilométriques 135 et 300) où l'utilisation déversoirs de surface est possible.

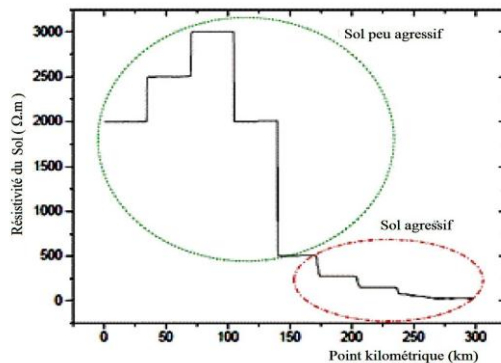


Fig. 3: Résistivité du sol en fonction du point kilométrique

Les éléments qui constituent un système de protection cathodique par courant imposé avec appoint d'énergie solaire sont les suivants (Fig.4) [5]. • Un système de soutirage, constitué d'un ou de plusieurs postes disposés dans un coffret comportant:

compteur électrique, disjoncteur, redresseur de tension de sortie réglable, voltmètre, ampèremètre. Le pôle négatif du redresseur est raccordé électriquement à la canalisation à protéger, le pôle positif à une masse anodique (ou déversoir) enterrée ou immergée; • Un générateur photovoltaïque constitué des éléments suivants: • Un ou des modules de cellules photovoltaïques, • Un système de régulation, • Un système de stockage, • Un onduleur pour les charges alternatives.

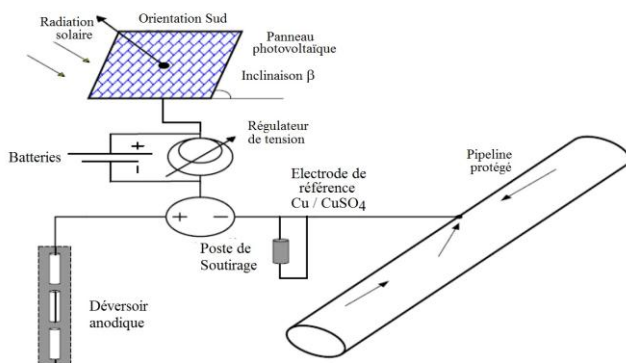


Fig. 4: Système de protection cathodique par appoint solaire

4. PRINCIPE DE LA PROTECTION ADOPTÉE

Le principe de la protection cathodique par courant imposé consiste à abaisser le potentiel du métal enterré par rapport au sol en dessous d'un seuil dit de protection. Les potentiels de l'acier revêtu dans les sols se situent habituellement entre -400 et -700 mV [6] par rapport à une électrode de référence Cu/CuSO_4 . En pratique, il est nécessaire d'assurer un abaissement du potentiel d'au moins 300 mV en tout point de la structure à protéger.

Cet abaissement du potentiel est obtenu en injectant dans ce métal, au point de soutirage, une densité de courant de protection difficile à appréhender, a priori. Cependant, compte tenu des expériences effectuées sur différents métaux, nous pouvons la définir par la valeur moyenne de la totalité du courant de protection divisée par la surface totale de l'ouvrage à protéger.

La notion de résistance d'isolement d'une canalisation est importante en protection cathodique, car elle influe directement sur l'intensité du courant de protection. Définie comme la résistance électrique envers le sol d'un mètre carré de canalisation revêtue, elle dépend de la nature du revêtement utilisé dont la résistivité est toujours élevée, mais surtout des défauts de ce revêtement. Il y a lieu de signaler que tout ouvrage métallique traversé par un courant électrique est considéré comme conducteur. De ce fait, il présente une résistance, au passage de ce courant, appelée résistance longitudinale. Cette dernière dépend de la nature du matériau et des dimensions des conduites.

Les équations de base conduisant au calcul des paramètres de la protection cathodique sont basées sur le courant de protection.

4.1 Calcul et dimensionnement

La protection cathodique repose sur deux paramètres essentiels, le potentiel et le courant de protection. Les formules utilisées pour le calcul du potentiel et du courant de protection cathodique sont celles dites 'lois des télégraphistes' [7] (Tableau 2).

Tableau 2: Lois des télégraphes

Formules générales	Formules pratiques
$E_x = E_s \operatorname{ch}(\alpha \times x) - I_s \times \gamma \times \operatorname{sh}(\alpha \times x) \quad (1)$	$I_x = \frac{E_s}{\gamma} \times \frac{\operatorname{sh}(\alpha(L-x))}{\operatorname{ch} \alpha \times L} \quad (5)$
$I_x = (E_0 / \gamma) \times \operatorname{sh}(\alpha \times x) + I_0 \times \operatorname{ch}(\alpha \times x) \quad (2)$	$E_x = E_s \frac{\operatorname{ch}(\alpha(L-x))}{\operatorname{ch} \alpha \times L} \quad (6)$
$E_s = E_L \times \operatorname{ch} \alpha \times L \quad (3)$	
$I_s = \frac{E_L}{\gamma} \times \operatorname{sh} \alpha \times L \quad (4)$	

Avec

E_s - Abaissement du potentiel à l'origine des abscisses ou des longueurs, V

I_s - Intensité du courant de soutirage à l'origine des abscisses ou des longueurs, V

E_x - Abaissement du potentiel au point d'injection à l'abscisse x , V

I_x - Intensité du courant au point d'injection à l'abscisse x , A

R - Résistance transversale d'isolement par mètre de conduite, Ω/m

r - Résistance longitudinale par mètre de conduite, Ω/m

α - Facteur d'atténuation, $1/m$, $\alpha = (r/R)^{1/2}$

γ - Résistance caractéristique de la conduite, Ω , $\gamma = \alpha \times r$.

4.1.1 Evolution de l'intensité de courant de protection (I_p) et du potentiel de protection (E_p) en fonction de la longueur à protéger et de la qualité de l'enrobage

Ces paramètres dépendent de la longueur à protéger (Figures 5 et 6) et de la résistance transversale de l'enrobage (Figure 7).

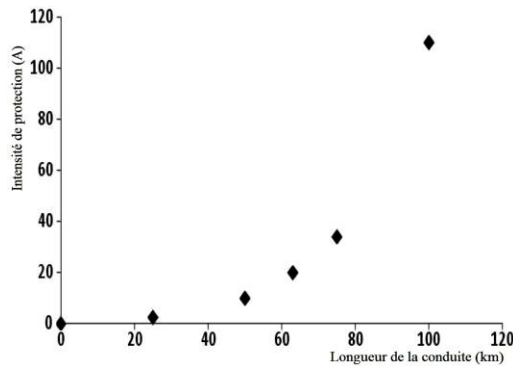


Fig. 5: Evolution du courant de protection suivant la portée de protection

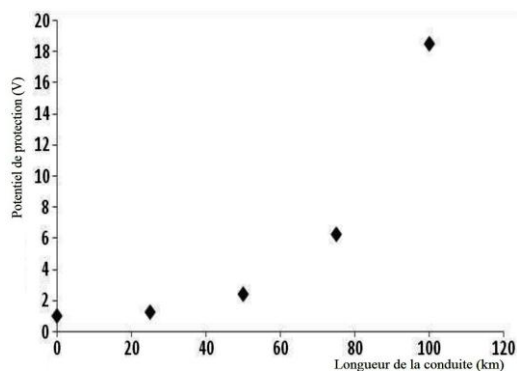


Fig. 6: Evolution du potentiel de protection suivant la portée de protection

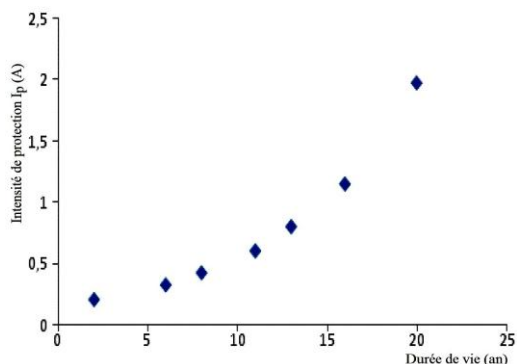


Fig. 7: Effet du vieillissement de l'enrobage sur l'intensité du courant protecteur

Sur la base des figures 5, 6 et 7, nous pouvons remarquer:

- Que l'abaissement du potentiel d'une conduite protégée en dessous d'une certaine valeur entraîne la formation excessive d'hydrogène ayant pour conséquence le décollement de l'enrobage et l'annulation de l'effet de protection. Il est déconseillé de porter le potentiel tube/sol en dessous de la valeur limite de $-2.5V$ et ce, afin d'éviter les problèmes de perte d'adhérence,

- Que la fonction $I_p = f(L)$ varie d'une façon exponentielle, ce qui nous permet de noter qu'un poste débitant 10 A. protège 50 km et que ce même poste débitant 20 A. ne protégera pas 100 km, mais une longueur plus faible du fait de l'atténuation exponentielle.

4.2 Critères de protection cathodique

Le critère de protection cathodique repose sur deux limites de la surtension cathodique η_c [8].

- Une limite inférieure $\eta_{inf} = -(U_h - U_R)$. Au point de soutirage, le potentiel d'injection ne doit pas être inférieur au potentiel U_h , correspondant à l'apparition excessive d'ions hydrogène favorisant la corrosion [8].

- Une limite supérieure $\eta_{\text{sup}} = -(U_S - U_R)$ - le potentiel de protection U_S doit être atteint au niveau de l'extrémité de la canalisation.

Selon des considérations expérimentales, la différence entre la surtension aux limites envisagées pour une canalisation est $\eta_{\text{sup}} - \eta_{\text{inf}} = 0.3 \text{ V}$.

La valeur minimale du potentiel de la conduite est de -2.5 V , ce qui donne:

$$E_s = -2.5 - (-0.55) = -1.95 \text{ V}$$

La valeur maximale du potentiel de la conduite est -0.85 V , ce qui donne:

$$E_L = -0.85 - (-0.55) = -0.3 \text{ V}$$

D'après les formules générales {eq. (3)} et {eq. (4)}, la longueur maximale protégée, suivant les critères de protection cathodique, est estimée par la formule suivante:

$$E_s = E_L \times (\alpha \times L) \Rightarrow L = (1/\alpha) \times \text{ch}^{-1}(E_s/E_L) \quad (7)$$

4.3 Dimensionnement des postes de soutirage

4.3.1 Cas des postes utilisant des générateurs solaires

- Dimensionnement des générateurs solaires

Dans le cas du dimensionnement des transfo-redresseurs, nous pouvons admettre un abaissement du potentiel conduite/sol de 0.3 V aux extrémités de la portée de protection par rapport à une électrode de référence Cu/CuSO_4 . Avec les générateurs solaires, il est préférable, pour plus de sécurité, d'assurer un abaissement de 0.5 V par rapport à la même électrode de référence Cu/CuSO_4 étant donné les faibles valeurs de potentiel d'injection mises en jeu.

Pour un nombre d'heures de pointe à l'emplacement des panneaux de 6.5 h/j , une tension optimale trouvée pour les générateurs solaires de 24 V , une intensité fournie par un module MSX de 3.5 A , une capacité de batterie de 100 Ah , 24 V , une latitude du lieu considéré de $\delta = 31.4^\circ$ avec des angles d'orientation s'échelonnant comme suit:

- * du 01\01 au 31\03 $\theta = 43.2^\circ$ orientation plein sud
- * du 01\04 au 30\06 $\theta = 14.1^\circ$ orientation plein sud
- * du 01\07 au 30\09 $\theta = 18.9^\circ$ orientation plein sud
- * du 01\10 au 31\12 $\theta = 48.5^\circ$ orientation plein sud.

Nous avons pu déterminer, d'une part, les caractéristiques des postes utilisant des générateurs solaires, ainsi que leur emplacement (**Tableau 3**) et d'autre part, le matériel nécessaire pour réaliser ces générateurs (**Tableau 4**).

Tableau 3: Détermination des caractéristiques des postes et leur emplacement

Poste	PK	Portée, km	Courant de protection, A	Courant majoré, A	Tension sortie, V	Type
1	2	17	2.753	3.556	24	Solaire
2	32	30	4.872	6.334	24	Solaire
3	62	30	4.872	6.334	24	Solaire
4	92	30	4.872	6.334	24	Solaire
5	116.5	19	2.963	3.817	24	Solaire
6	139	26	4.137	5.378	24	Solaire
7	168	32	5.256	6.833	24	Solaire
8	197	26	4.137	5.378	24	Solaire
9	255.67	90	15.825	20.572	40.57	Trans-Red

Tableau 4: Equipements nécessaire à la réalisation de ces générateurs solaires

Poste	1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre de modules	6	10	10	10	6	9	11	9
Nombre de batteries	7	12	12	12	7	10	13	10

En outre, en se basant sur l'étude technico-économique réalisée par nos soins, notre choix s'est porté sur l'utilisation le moins possible de puits anodique. Le **Tableau 5** met en relief le type de déversoir choisi sur tout le long de la conduite.

Tableau 5: Répartition des postes de soutirage

Poste	PK	Portée, km	Résistivité en surface, $\Omega.m$	Type déversoir
1	2	17	159	Lit
2	32	30	1382	Puits
3	62	30	5233	Puits
4	92	30	9420	Puits
5	116.5	19	234	Lit
6	139	26	122	Lit
7	168	32	84	Lit
8	197	26	98	Lit
9	255.67	90	226	Lit

- Dimensionnement des puits anodiques

Les puits anodiques sont rencontrés aux postes **2, 3 et 4** et pour ces derniers, la portée de protection est la même. Le niveau de la nappe phréatique étant le même, les trois puits auront donc les mêmes dimensions. Le **Tableau 6** donne l'emplacement et les dimensions des trois puits.

Tableau 6: Emplacement et dimensions des trois puits

	Poste	2	3	4
PK		32	62	92
Colonne d'anodes (m)		43.6	43.6	43.6
Profondeur du puits (m)		93.6	93.6	93.6
Nombre d'anodes		7	7	7
Espacement anodes (m)		7.01	7.01	7.1
Diamètre du puits (m)		0.300	0.300	0.300
Masse du backfill (t)		6.163	6.163	6.163

* les anodes utilisées sont en alliage ferro-silicium-chrome, de masse unitaire 23 kg et de dimensions (1525×38.1) mm.

Pour favoriser l'émission du courant, on crée un milieu conducteur autour de l'anode. Le déversoir est alors entouré d'un anolyte de remplissage appelé 'backfill' qui permettra une corrosion plus uniforme du déversoir, ce qui prolongera sa durée de vie. Chaque anode est enrobée dans un cylindre de backfill de profondeur 43.6 m et de 0.3 m de diamètre. La masse volumique du backfill est de 2000 kg/m³.

- Dimensionnement des déversoirs de surface

Les déversoirs de surface sont réalisés lorsque la résistivité du sol est faible et lorsqu'on dispose de suffisamment d'espace. Deux possibilités s'offrent, anode posée horizontalement, anode posée verticalement.

La procédure adoptée pour le choix du type de déversoir (de surface ou en profondeur) consiste à trouver la valeur-limite de la résistivité du sol, c'est-à-dire la

valeur au-dessous de laquelle le déversoir envisagé peut être installé. La pose horizontale est plus simple et demande beaucoup moins de moyens. La résistance d'un déversoir de surface, comprenant N anodes pré-backfillées, est donnée par les deux équations suivantes [1]:

$$R_{\text{déversoir.H}} = \frac{\rho_{\text{sol}}}{4\pi L} \times \left[\ln \left(\frac{L + \sqrt{d_{\text{anode}}^2 + L^2}}{-L + \sqrt{d_{\text{anode}}^2 + L^2}} \right) + \text{Ln} \left(\frac{L + \sqrt{(4 \times z - d_{\text{anode}})^2 + L^2}}{L + \sqrt{(4 \times z - d_{\text{anode}})^2 + L^2}} \right) \right] \quad (8)$$

Avec,

$$F = \frac{1}{4\pi L} \times \left[\ln \left(\frac{L + \sqrt{d_{\text{anode}}^2 + L^2}}{-L + \sqrt{d_{\text{anode}}^2 + L^2}} \right) + \text{Ln} \left(\frac{L + \sqrt{(4 \times z - d_{\text{anode}})^2 + L^2}}{L + \sqrt{(4 \times z - d_{\text{anode}})^2 + L^2}} \right) \right] \quad (9)$$

La tension du générateur solaire est donnée par l'équation (10),

$$U_g = 2 + (R_{\text{déversoir}} \times I_p) / 0.8 \quad (10)$$

En combinant les équations (8), (9) et (10), nous obtenons:

$$\rho_{\text{sol}} = \frac{0.8 \times (U_g - 2)}{F \times I_p} \quad (11)$$

Avec, $R_{\text{déversoir}}$, Résistance du déversoir, Ω ; d_{anode} , Diamètre de l'anode, m; z , Profondeur de pose de l'anode, m.

Les conditions limites d'utilisation d'un lit d'anode sont fixées par les valeurs suivantes:

- Longueur maximum admise pour un lit d'anode $L_{\text{max}} = 300$ m,
- Diamètre de lit $d = 0.4$ m,
- Profondeur limite admise $z = 3$ m,
- Tension du générateur solaire $U_g = 24$ V.

La figure 8 donne la résistivité limite de l'utilisation d'un lit d'anodes en fonction de la portée des postes.

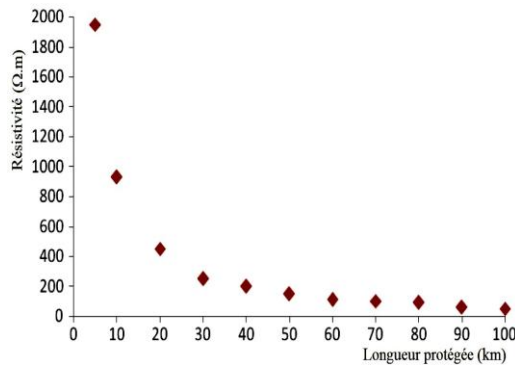


Fig. 8: Résistivité limite pour l'utilisation d'un déversoir de surface

Nous remarquons, d'après la figure 8, que pour des portées de 30 km, la résistivité limite se situe aux alentours de 250 $\Omega.m$.

Le **Tableau 7** donne les résultats des calculs portant sur le dimensionnement des déversoirs de surface.

Tableau 7: Dimensionnement des déversoirs de surface

Poste	1	5	6	7	8
PK	2	116.5	139	168	197
Longueur déversoir, m	66	120	80	67	20
Profondeur déversoir, m	3	3	3	3	3
Nombre d'anodes*	8	8	12	14	6
Espacement anodes, m	9.210	16.900	7.130	5.000	3.965
Diamètre déversoir, m	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Masse du backfill, t	21.12	38.40	25.60	21.44	6.40

* les anodes utilisées sont en alliage ferro-silicium-chrome, de masse unitaire 12.5 kg et de dimensions (1525×38.1) mm.

- Dimensionnement des câbles de liaison électrique

Les liaisons électriques entre le générateur, le déversoir, et la structure à protéger doivent être particulièrement soignées en vérifiant deux critères [9]:

- Une faible résistance électrique,
- Un très bon isolement par rapport au sol, particulièrement pour les liaisons allant vers les déversoirs.

Les câbles électriques les plus utilisés, pour connecter les différents éléments du système, sont ceux à double isolement type unipolaire avec isolation en polyéthylène, gaine de bourrage et enveloppe extérieure en PVC [10]. Les sections des câbles utilisés sont normalisées en fonction de l'intensité de courant circulant (**Tableau 8**).

Tableau 8: Section des câbles électrique en fonction de l'intensité de courant circulant [9]

Intensité de Courant, (A)	5	10	15	20	35	45	60
Section de câble Câble, (mm ²)	10	16	25	35	50	70	95
Résistance pour 100 m, (Ω.m)	174	112	71	51	36	26	19

Pour les déversoirs de profondeur, la longueur des câbles anodiques est donnée par les équations (12) et (13).

$$L_{\text{câblesA}} = (P_d - L_{\text{anode}}) \times N_{\text{anodes}} \times e (N_{\text{anodes}} - 1) / 2 + L_0 (N_{\text{anodes}} + 1) \quad (12)$$

$$e = (L_{\text{ca}} - L_{\text{anode}}) / (N_{\text{anode}} - 1) \quad (13)$$

Avec, $L_{\text{câblesA}}$ - Longueur totale des câbles anodiques, (m); P_d - Profondeur du déversoir, (m); N_{anodes} - Nombre d'anodes, L_{anode} - Longueur d'une anode, m; L_0 - Longueur du câble au-dessus du sol, (m), $L_0 = 10\text{m}$; L_{ca} - Longueur de la colonne d'anodes, (m); e - Espacement tête-à-tête entre les anodes dans la colonne d'anode, (m).

Pour les déversoirs de surface, la longueur des câbles anodiques est donnée par l'équation (13).

$$L_{\text{câblesA}} = 2L_{\text{ca}} + L_0 \quad (14)$$

Avec, L_{ca} : Longueur de la colonne d'anodes, (m); L_0 : Longueur du câble au-dessus du sol, (m); $L_0 = 10\text{ m}$.

Nous avons déterminé la longueur des anodes constituant le déversoir suivant deux méthodes: la méthode basée sur la consommation des anodes et la méthode basée sur la mesure de la résistance. La longueur des anodes est la valeur maximale calculée par les deux méthodes citées.

En utilisant les équations (12), (13) et (14), nous trouvons les dimensions des câbles mises en évidence par le **Tableau 9**.

Tableau 9: Dimensions des câbles de liaison

Poste	Câble Anode -Générateur		Câble Générateur -Conduite	
	Longueur, m	Section, mm ²	Longueur, m	Section, mm ²
1	142	16	110	16
2	577.27	10	110	16
3	577.27	10	110	16
4	577.27	10	110	16
5	250	10	110	16
6	170	16	110	16
7	144	16	110	16
8	50	16	110	16

*Les sections des câbles sont déterminées à partir du **Tableau 8**.

4.3.2 Cas du poste de soutirage à transformateur -redresseur

Le poste de soutirage situé au point kilométrique (PK) 255.67 assure une portée de protection de 90 km, comprenant deux bras $L_1 = 44.33\text{ km}$ et $L_2 = 45.67\text{ km}$. L'alimentation électrique de ce poste énergie est assurée par un transfo-redresseur. La résistivité électrique du sol au niveau de l'emplacement du déversoir est de $226\ \Omega\cdot\text{m}$, ce qui permet l'utilisation d'un déversoir de surface.

Afin de ne pas avoir un abaissement de potentiel trop élevé au point d'injection dans le cas de transfo-redresseur, l'abaissement du potentiel à l'extrémité du bras de protection sera $E_0 = 0.3\text{ V}$.

L'intensité nécessaire à la protection des deux bras sera:

$$I = (E_0 / \gamma) \times [\text{sh}(\alpha \times L_1) + \text{sh}(\alpha \times L_2)] \quad (15)$$

D'où $I = 18.825\text{ A}$. avec un courant majoré I_{maj} de 20.572 A . En effet, une marge de sécurité de 30 % sur l'intensité de courant est nécessaire pour assurer une longue durée de vie au redresseur.

Toutes les caractéristiques concernant le dimensionnement du poste de soutirage à transfo-redresseur obtenues la base de nos calculs sont données dans le **Tableau 10**.

Tableau 10: Caractéristiques relatives au dimensionnement du transfo-redresseur

Caractéristiques								
I_{maj} (A)	Nb. anodes	Masse unitaire Anode (kg)	Espacement tête à tête (m)	Tension de sortie redresseur (V)	Masse du coke (tonne)	Dimension câble-conduite-générateur	Dimension anode-générateur	TR
20.572	42	12.5	6.42	40.57	84.80	110 m 50 mm ²	540 m 50 mm ²	60V 30A

4. CONCLUSION

La protection cathodique par soutirage de courant est l'une des techniques les plus efficaces de lutte contre la corrosion des ouvrages enterrés. Ce mode de protection nécessite une source d'énergie électrique. Lorsque l'on dispose, à proximité, d'un réseau de distribution, le transfo-redresseur est d'usage. Le problème se pose en cas d'éloignement de tels réseaux des installations à protéger.

Dans le cas de la protection d'ouvrages traversant des zones désertiques, l'utilisation de générateurs solaires s'impose. L'utilisation rentable et rationnelle des générateurs solaires dans les systèmes de soutirage doit faire l'objet d'une étude d'engineering qui doit tenir compte de deux aspects, l'un se référant au coté technique et ce, pour la conception et le dimensionnement du système et l'autre se référant au coté économique afin d'assurer un bon rapport qualité/prix.

Ce travail a été réalisé en partant de ce principe et en se fixant l'objectif de déterminer les paramètres optimaux dans l'utilisation de générateurs photovoltaïques dans la protection cathodique de canalisations enterrées. Les résultats obtenus sont spécifiques à l'ouvrage proposé à l'étude.

REFERENCES

- [1] H.H. Uhlig, '*Uhlig's Corrosion Handbook*', Second Edition, Edited By R. Winston Review, CANMET Materials Technology Laboratory, Ottawa, Ontario, Canada, John Wiley & Sons Inc., 2000.
- [2] D. Talbot and J. Talbot, '*Corrosion Science and Technology*', CRC Press LLC, New York, USA, 1998.
- [3] API, '*Cathodic Protection of Underground Petroleum Storage Tanks and Piping Systems*', API Recommended Practice 1632, Third Edition, May 1996, American Petroleum Institute, 2002.
- [4] W. von Baeckmann, W. Schwenk and W. Prinz, '*Handbook of Cathodic Corrosion Protection*', Third Edition, Elsevier Science, 1997
- [5] S. Kharzi, M. Haddadi and A. Malek, '*Dimensionnement d'un Système de Protection Cathodique Alimenté par Energie Solaire: Elaboration d'une Configuration Standard avec quatre Modules Photovoltaïques*', Colloque National sur l'Energie Solaire Proceedings, Béjaïa, Algérie, pp. 61 – 66, 2006.
- [6] Rapport, '*La Protection Cathodique- Guide Pratique*', Chambre Syndicale de la Recherche et de la Production du pétrole et du gaz naturel. Comité des techniciens. Edition Technip, France 1986.
- [7] C. Basalo, '*Les Canalisations d'Eau et de Gaz, Corrosion, Dégradation et Protection*', Technique et Documentation – Lavoisier, Paris, 1987.
- [8] M. Khalfi et S. Kaci, '*Utilisation de l'énergie Solaire dans la Protection Cathodique de Canalisations Enterrées*', Projet de Fin d'Etudes, Département Génie Chimique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 1996.
- [9] Rapport, '*Cahier des Charges Protection Cathodique*', Entreprise Nationale d'Engineering Pétrolier, ENEP, Alger, 1994.