

13/96  
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التربية الوطنية

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT

GENIE CHIMIQUE

## PROJET DE FIN D'ETUDES

### SUJET

# UTILISATION DE L'ENERGIE SOLAIRE DANS LA PROTECTION CATHODIQUE DE CANALISATIONS ENTERREES

Proposé par :

Mr S. DEBBACHE

Etudié par :

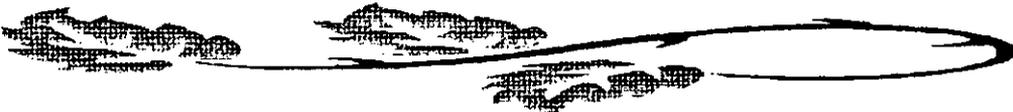
Mr M. KHALFI  
Mr S. KACI

Dirigé par :

Mr S. DEBBACHE  
Mme F. MOHELLEBI  
Mr F. HELLAL

PROMOTION

95 / 96



## REMERCIEMENTS



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

A l'issue de la présentation de notre travail, nous nous rendons compte que sans les éclairages et les orientations qui nous ont été donnés par Mr S. DEBBACHE, chargé de recherche au centre de soudage et de contrôle non destructif, nous n'aurions pu mener à bien notre étude. Nous tenons donc à remercier particulièrement monsieur S. DEBBACHE qui nous a dirigé et suivi pendant toute cette étape.

Nos plus vifs remerciements sont adressés à Mme F. MOHELLEBI, chargé de cours à l'ENP, qui nous a assisté et suivi tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous tenons à remercier également Mr F. Hellal, chargé de cours à l'ENP qui nous a beaucoup aidé par ses orientation et ses précieux conseils.

Que Mme S. HADDOUM, chargé de cours à l'ENP, trouve ici nos remerciements pour avoir fait l'honneur de présidé notre jury.

Nos remerciements s'adressent également à Mr M. ZERGOUG, chargé de recherche au centre de soudage et contrôle non destructif, qui nous a honoré par sa présence entant que jury.

Le présent travail à été réalisé au sein du centre de soudage et de contrôle non destructif de Cheraga. Nous tenons à remercier Mr Z. CHERROUF, chargé de recherche et directeur du centre, de nous avoir permis de réaliser notre travail dans un milieu plein de savoir et de connaissances.

Nous ne saurons oublier tous ce qui ont contribués de près ou de loin à la réalisation de ce travail, en particulier, DALILA, M.BENZOHRA, BENMOULOUD et melle ACAIBOU.

*Samir & Mohamed*

## RÉSUMÉ

La lutte contre la corrosion est un besoin aussi bien économique que de sécurité, la protection cathodique est l'une des moyens les plus efficaces et les plus connus de lutte. L'application de la protection cathodique sur des structures longiforme nécessite la présence d'une source d'énergie électrique. Dans le cadre de ce travail nous donnerons un exemple pratique de conception et de dimensionnement d'un système de protection cathodique en utilisant des générateurs photovoltaïque comme source d'énergie électrique.

## ABSTRACT

The world wide importance of cathodique corrosion protection to protect objects and pipelines is well know. In most cases a full corrosion protection can only be performed with an electrochemical cathodique corrosion protection system. But all of this systems require energy from electrical energie sources like utility grids. Photovoltaic will be one of most economical solution for small and sised installations as well as for larger instalations in very remote areas.

# SOMMAIRE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

## INTRODUCTION

1

### Partie I :

## RAPPELS DE CORROSION

### Chapitre 1 : La corrosion et ses aspects

- 1.1. Définition 2
- 1.2. Aspects morphologiques de la corrosion 3
- 1.3. Potentiel et courant de corrosion 4

### Chapitre 2 : Agressivité des sols vis-à-vis des métaux ferreux

- 2.1. Introduction 5
- 2.2. Caractérisation d'un sol 5
- 2.3. Corrosion par formation de piles 7
- 2.4. Corrosion par les courants vagabonds 11
- 2.5. Corrosion bactérienne 11

### Chapitre 3 : Moyens de lutte contre la corrosion et leurs principes

- 3.1. Introduction 13
- 3.2. Inventaire des moyens 13
- 3.3. Critère de protection cathodique 15
- 3.4. Variantes de la protection cathodique 16

## Partie II

# LA PROTECTION CATHODIQUE PAR SOUTIRAGE DE COURANT

## Chapitre 4 : Notion et élément de bases de la protection cathodique par soutirage de courant

4.1. Introduction	18
4.2. Notions préliminaires	18
4.3. Equations de bases	20
4.4. Constitution des systèmes de protection cathodique par soutirage de courant	22

## Chapitre 5 : Conception et dimensionnement des systèmes de soutirage de courant

5.1. Dimensionnement des déversoirs anodiques de courant	35
5.2. Dimensionnement de la source d'énergie	36
5.3. Dimensionnement des câbles de liaison électrique	41
5.4. Exemple de calcul	43

## ETUDE D'UN CAS PRATIQUE

1. Données de l'étude	46
1.1. Présentation de l'ouvrage à protéger	46
1.2. Résultats de l'étude de tracé	46
2. Considération générale concernant l'évolution des paramètres de protection le long de l'ouvrage longifoforme	48
2.1. Evolution de l'intensité de courant de protection en fonction de la longueur à protéger	48
2.2. Influence de la résistance transversale sur l'intensité du courant de protection	49
2.3. Evolution du potentiel le long d'une conduite sous protection	51
3. Calcul de la portée de protection assurée par le transformateur-redresseur	53
4. Optimisation des portées de poste de soutirage à générateurs solaires	54
4.1. Position du problème	54
4.2. Optimisation de l'utilisation du couple générateur solaire - puits anodique	54
4.3. Optimisation de l'utilisation du couple générateur solaire - déversoirs horizontal	61
5. Critère de choix du type de déversoir	64
6. Choix de l'emplacement des postes de soutirage de courant	66
7. Dimensionnement des poste de soutirage de courant	70
8. Considération supplémentaire concernant la protection cathodique	77
8.1. Gaines de protection	77

8.2. Protection contre les influences électrique dues au voisinage	
8.3. Joints isolants	80
<b>9. Contrôle de la protection cathodique</b>	<b>81</b>
9.1. Mesure du potentiel	81
9.2. Mesure du courant	81
<b>CONCLUSION</b>	<b>84</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	
<b>ANNEXES</b>	

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# INTRODUCTION

## **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 donc important d'assurer la bonne gestion du capital ainsi investi. Dans ce but, il convient d'accroître au maximum la durée de vie de l'ouvrage et d'éviter les arrêts imprévus susceptibles d'entraîner des manques à gagner importants.

En effet, dans le sol, les métaux élaborés par l'homme ont tendance à revenir à l'état de minerai dans lequel ils étaient initialement. Ce phénomène est appelé communément **corrosion**.

Il a été estimé que 15 à 20% de la production mondiale en acier est détruite chaque année par la corrosion ; 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".

Il y a deux façons d'abaisser le potentiel d'une structure métallique en dessous du seuil d'immunité. La première est de relier électriquement la structure à protéger à des masses d'un métal moins noble qui vont se corroder préférentiellement. La seconde consiste à mettre à profit l'effet d'un courant électrique injecté dans l'électrolyte à partir d'une anode déversoir. On utilise 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. On parle alors d'un système à soutirage de courant. [ 1 ]

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.

Pour que l'utilisation des générateurs solaires dans les systèmes de soutirage soit rentable elle doit être optimisée, c'est dans cette direction que notre travail est axé.

Dans notre pays, il est important de maîtriser et de développer les méthodes de la lutte anticorrosion au même rythme que celui du développement de l'industrie nationale. Ce développement doit se faire en exploitant l'ensemble des ressources naturelles et humaines. L'Algérie est un pays riche en, pétrole, gaz, et... soleil !

**PARTIE I**

**RAPPELS DE CORROSION**

## **CHAPITRE 1**

# **LA CORROSION ET SES ASPECTS**

## 1.1. Définition

La corrosion est la destruction des métaux sous l'action du milieu ambiant. Cette destruction est le résultat de réactions de nature chimique ou électrochimique qui se déroulent à la surface de séparation métal - milieu ambiant. Ce sont généralement des réactions d'oxydation de métaux. [ 2 ]

### 1.1.1. Corrosion sèche [ 2 ]

La corrosion sèche est produite par l'attaque d'un métal par un gaz à haute température. La nature des réactions mise en jeu est chimique. C'est l'oxydation qui est de loin la plus fréquente.

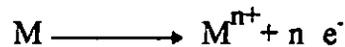
### 1.1.2. Corrosion humide [ 1,3 ]

L'immense majorité des problèmes de corrosion rencontrés est liée à la présence d'eau au contact des métaux. C'est le cas des environnements naturels, eau douce, eau de mer, les sols. Les différents phénomènes de corrosion humide, qui se traduisent par une grande diversité de formes d'attaque, sont tous d'origines électrochimiques.

La corrosion électrochimique se ramène à l'étude des piles.

Une pile de corrosion comprend essentiellement :

- \* Une partie métallique anodique, siège de réaction d'oxydation (corrosion)



- \* Une partie métallique cathodique, siège de réaction de réduction



- \* Ces deux parties métalliques sont plongées dans un électrolyte et liées électriquement

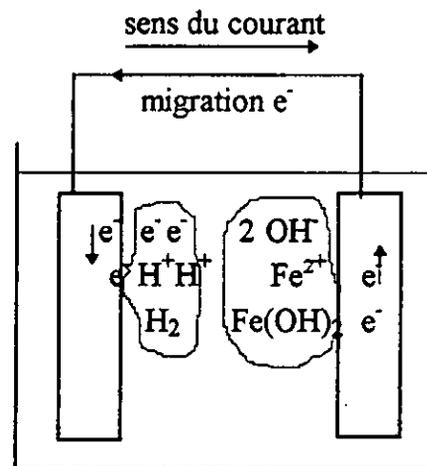


Figure - 1 - représentation schématique de la corrosion du fer

## 1.2. Aspects morphologiques de la corrosion [ 2 ]

D'une manière générale l'examen à l'oeil nu, à la loupe ou au microscope, permet d'identifier quatre types de corrosion :

### 1.2.1. Corrosion uniforme

C'est une corrosion qui se développe sur toute la surface du métal et à une vitesse presque identique en tous ces points, les propriétés mécaniques intrinsèques au métal ne sont pas modifiées.

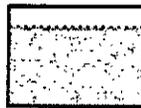


Figure - 2 - corrosion uniforme

### 1.2.2. Corrosion par piqûre et crevasses

Il s'agit de corrosion localisée, on observe en certains points du métal une progression très rapide de la corrosion. Il y a alors formation de piqûres ou de crevasses. Ce type de corrosion est très dangereux car il peut aboutir à la perforation du métal.

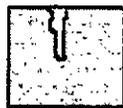


Figure - 3 - Corrosion par piqûre .

### 1.2.3. Corrosion intergranulaire

Elle se caractérise par une dissolution préférentielle d'éléments dissous au niveau des joints de grains du métal. Pratiquement invisible à l'oeil nu, elle conduit au déchaussement du métal et en modifie considérablement les caractéristiques mécaniques.

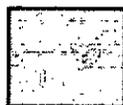


Figure - 4 - Corrosion intergranulaire.

### 1.2.4. Corrosion transgranulaire

Ce type de corrosion est caractéristique des corrosions sous contraintes. Il se manifeste par la progression de fines fissures dans une direction perpendiculaire à celles des contraintes principales de tensions.

Cette corrosion est pratiquement invisible à l'oeil nu. Elle affecte très dangereusement les propriétés mécaniques du métal et peut se développer de manière extrêmement rapide.

## 1.3. Potentiel et courant de corrosion [ 2 ]

### 1.3.1. Potentiel de corrosion

Les phénomènes qui aboutissent à la corrosion des métaux au contact d'un électrolyte sont régis par des réactions électrochimiques analogues à celles que l'on rencontre dans les piles.

La notion de pile conduit tout naturellement à une autre notion, celle de potentiel. Les électrochimistes considèrent que la force électromotrice d'une pile est la différence de deux termes relatifs à deux demi - piles. La mesure du potentiel d'une des demi - piles constituée par le métal en examen nécessite donc la connaissance du potentiel de l'autre demi - pile qui constitue ainsi la référence de la mesure. Le potentiel du métal mesuré par rapport à une électrode normale à hydrogène est appelé « potentiel d'électrode ». Ce potentiel mesuré dans une solution normale d'un des sels du métal, et sous une pression de un bar est appelé « potentiel normal d'électrode ».

Lorsqu'un métal ou alliage se corrodé dans un milieu quelconque, il ne peut s'établir un état d'équilibre au sens thermodynamique du terme. Le potentiel que prend le métal n'est donc pas calculable par des relations d'électrochimie, mais peut être mesuré par rapport à une électrode de référence. Ce potentiel fonction d'un très grand nombre de paramètres liés au métal et au milieu corrosif est appelé « potentiel de dissolution ». Lorsque la valeur de ce potentiel se stabilise après un temps plus ou moins long, on parle de « potentiel de corrosion ».

### 1.3.2. Courant de corrosion

L'échange d'électrons entre le métal corrodé, et donc oxydé, et l'élément réduit s'accompagne de déplacement de charges électriques dont le nombre par unité de temps exprime donc un courant dit « courant de corrosion ». La détermination de ce courant peut se faire de différentes manières, par mesure dans certains cas, ou par calcul à travers des méthodes utilisées par les électrochimistes.

**CHAPITRE 2**

**AGRESSIVITE DES SOLS  
VIS-A-VIS DES METAUX FERREUX**

## 2.1. Introduction [ 2 ]

Pour évaluer les caractères de corrosivité d'un sol ou pour rechercher les causes d'un cas de corrosion et expliquer son processus, les lois fondamentales de l'électrochimie sont insuffisantes à elles seules. Les considérations complémentaires nécessaires ne peuvent être puisées que dans l'expérience acquise dans l'étude de nombreux cas concrets.

## 2.2. Caractérisation d'un sol [ 2,4,5 ]

Les sols présentent un certain nombre de caractères propres qui permettent de les distinguer, de les classer et enfin d'en évaluer l'agressivité. On ne citera que les plus reconnaissables et les plus directement accessibles à la mesure.

### 2.2.1. Facteurs physiques

#### a) Nature géologique

Elle nous permet de classer les sols en : sol végétal, argiles, et tourbe.

#### b) Texture du sol

La texture du sol est définie d'après la proportion des éléments constitutifs, classés par granulométrie.

En effet, on peut distinguer les sols à texture très fine caractérisée par une teneur élevée en argiles, et les sols légers, à savoir :

- Les sols légers où se localiseront les plages cathodiques des macropiles et la corrosion locale sera généralement faible.
- Les sols lourds où se localiseront les plages anodiques des grandes macropiles (corrosion par piles géologiques). Ces sols sont propices à l'activité des bactéries sulfato - réductrices.

#### c) Humidité

Sans constituer à vrai dire un facteur intrinsèque du sol, l'humidité est un facteur complémentaire, qui va jouer un rôle important dans les processus de corrosion, par son incidence sur la résistivité et sur l'aération.

La mesure de l'humidité est simple : elle est obtenue par détermination de la perte de poids dans un étuvage prolongé à 105 °C.

On considère généralement qu'une humidité de 20 % est un facteur défavorable du point de vue de l'agressivité.

## 2.2.2. Composition chimique

On distingue dans un sol les constituants solubles et les constituants insolubles. Ces derniers forment des squelettes minéraux tels que ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ , ...). Les constituants solubles vont former avec l'eau du sol l'électrolyte intervenant dans le processus de corrosion. Ce sont essentiellement des sels formés des cations  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{H}^+$ , et des anions  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$ . Tous ces éléments vont influencer la résistivité du sol.

Une attention particulière est portée aux chlorures et sulfates qui sont des éléments nocifs, tant par l'abaissement de résistivité qu'ils entraînent que par l'action dépassivante pour les chlorures, et l'intervention des sulfates dans les processus de corrosion bactérienne. L'effet défavorable (du point de vue de l'agressivité) de ces anions ne se manifeste qu'au-delà d'un certain seuil de concentration : [ 2 ]

100 mg/ Kg pour  $\text{Cl}^-$

200 mg/ Kg pour  $\text{SO}_4^{2-}$

Les carbonates et les bicarbonates sont des éléments qui jouent, par leur effet tampon, et à la consolidation des produits de corrosion du fer améliorant ainsi sa passivation en milieu aéré.

## 2.2.3. Facteurs électriques et électrochimiques

### a). Résistivité

La connaissance de la résistivité du sol ou du liquide en contact avec la structure métallique est un élément essentiel pour la lutte contre la corrosion et la mise en place des dispositifs de protection cathodique en particulier.

En effet, la résistivité du sol est une donnée intégrante car elle rend compte de la teneur en sels dissous et de la teneur en eau. On peut donc dire que la valeur de la résistivité est un critère important, sinon décisif, d'appréciation de l'agressivité d'un sol.

Une classification assez communément admise de la corrosivité en fonction de la résistivité est donnée dans le tableau 1 suivant : [ 2 ]

Tableau N°1 : Classification de l'agressivité d'un sol selon sa résistivité

Résistivité du sol en $\Omega \cdot m$	Corrosivité
$\rho < 500$	très élevée
$500 < \rho < 2000$	élevée
$2000 < \rho < 5000$	moyenne
$50000 < \rho < 100000$	faible
$\rho > 100000$	très faible

La résistivité est un paramètre facilement mesurable par plusieurs méthodes existantes. On ne citera que la méthode de quatre terres qui est la plus utilisée. (figure N° 5)

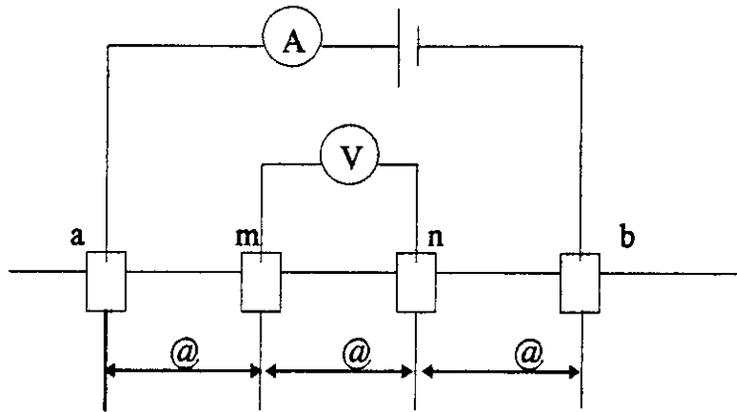


Figure - 5 - Méthode des quatre terres

Quatre piquets sont alignés et enfoncés dans le sol à faible profondeur avec un écartement @ entre piquets. On alimente les piquets extérieurs à l'aide d'un générateur de courant basse fréquence. On mesure l'intensité I du courant et la différence de potentiel entre les piquets intérieurs. D'après la théorie et si l'on admet que l'électrolyte est uniforme, la résistivité est donnée par la formule suivante : [ 2,5 ]

$$\rho = 2 \pi @ \left( \frac{\Delta V}{I} \right) \quad ( 2 . 1 )$$

- Où : @ : Distance entre piquets (mètre)  
 $\Delta V$  : Différence de potentiel entre les piquets m et n (volt)  
 I : Intensité entre les fiches a et b (Ampère)  
 $\rho$  : Résistivité ( $\Omega.m$ )

### b) . pH

Les sols naturels ont généralement un pH compris entre 4 et 8. La mesure du pH bien que délicate, est possible. Elle est utile surtout lorsque le pH dépasse les limites habituelles, révélant ainsi un sol ayant reçu des apports étrangers. En effet un bas pH peut être l'indice d'une pollution par des déchets industriels acides ou d'une acidification par oxydation (certains sulfures).

## 2.3. Corrosion par formation de piles

La présence d'eau plus ou moins riche en sels dissous permet de considérer le sol comme un électrolyte. On peut donc dire que la corrosion de structures métalliques enterrées résulte de l'activité de piles dites « piles de corrosion ».

On est amené alors à distinguer deux processus : [ 2 ]

### a). Le processus anodique dans les sols

La réaction anodique est celle de l'oxydation du métal (ionisation)



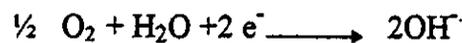
Le potentiel de la réaction anodique est donné par la formule de Nernst

$$E_A = E^{\circ}_{Fe} + (0.059 / 2) \log [Fe^{2+}]$$

Ce processus évolue généralement sans freinage dans les sols lourds et humides.

### b). Le processus cathodique dans les sols

Les réactions de réduction sont la base du processus cathodique. Le processus cathodique le plus fréquemment rencontré est de loin celui de l'ionisation de l'oxygène



### 2.3.1. Micropiles et macropiles de corrosion dans les sols

La structure métallique et le sol constituent les éléments d'une pile en considérant le sol comme électrolyte et la structure comme électrode. Selon les dimensions de ces électrodes on distingue [ 2 ] :

- # Les micropiles responsables de ce que l'on peut désigner comme corrosion absolue.
- # Les macropiles responsables de ce que l'on peut désigner comme corrosion relative.

#### a). Micropiles de corrosion ( corrosion absolue ) [ 2 ]

On désigne par micropiles de corrosion, les piles dans lesquelles les plages anodiques et cathodiques sont très petites et sinon pratiquement confondues du moins très proches les unes des autres.

Souvent dans le sol, les micropiles qui ont pu s'établir tout au début de l'ionisation vont céder la place à de petites piles dans lesquelles anodes et cathodes se différencient même si elles restent imbriquées.

La corrosion par micropiles, encore appelée corrosion absolue, est une corrosion régulière uniforme, elle est due à l'agressivité absolue du sol envers la structure métallique.

#### b). Macropiles de corrosion ( corrosion relative )

On désigne par macropiles de corrosion, des piles dans lesquelles les plages anodiques et cathodiques sont de dimensions macroscopiques, nettement différenciées, et de surfaces relatives pouvant être très différentes.

Ces macropiles résultent toujours de l'existence, à la surface d'une structure métallique, de deux plages présentant des potentiels différents. Les plages anodiques où se portera la corrosion sont celles à plus bas potentiel. [ 2 ]

Les causes d'apparition de macropiles sont nombreuses on distingue:

**1. Macropiles liées à l'aération différentielle [ 1,2,6 ]**

Les différences d'approvisionnement en oxygène créent des piles relevant du phénomène d'aération différentielle. Les plages de métal fortement aérées, anoblies (relèvement du potentiel) et fonctionnent comme cathode vis - à - vis des plages à plus bas potentiel où l'oxygène n'accède pas, ou peu, lesquelles deviennent des anodes. (figure 6)

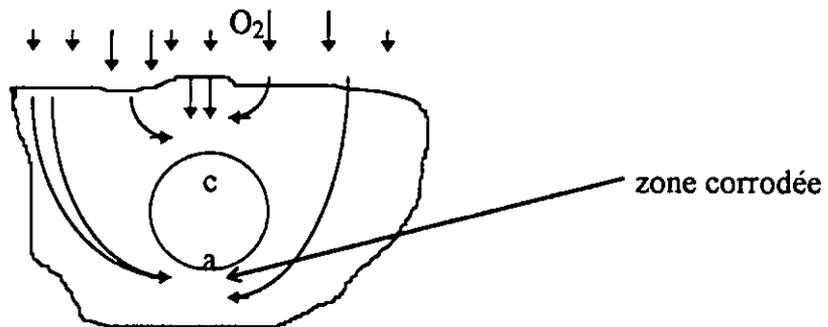


Figure - 6 - Schématisation de la corrosion par aération différentielle

**2. Macropiles liées à des hétérogénéités de composition [ 2,3 ]**

Ces piles, dites aussi piles de concentrations, souvent associées aux piles d'aération différentielles, peuvent être engendrées par des variations locales dans la composition chimique, dans les concentrations, le pH, etc. du sol autour de la structure. (figure 7)

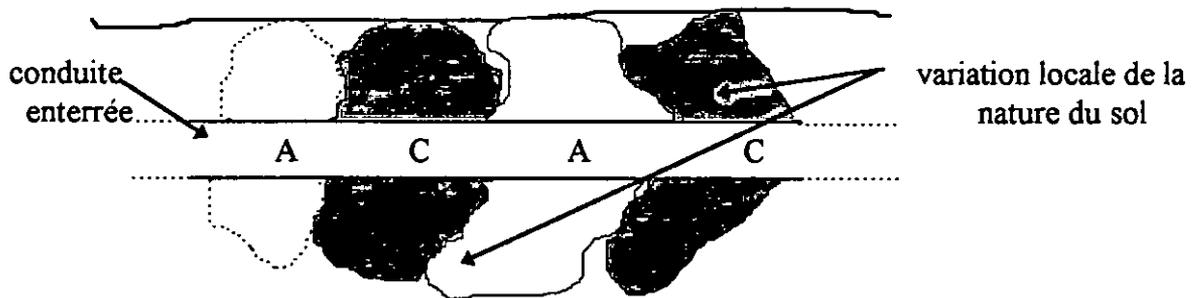


Figure - 7 - Corrosion liée à des hétérogénéités de composition.

**3. Macropiles liées à des couplages galvaniques avec des métaux nobles « piles galvaniques » [ 1,2 ]**

L'association au sein d'un même électrolyte de deux métaux de potentiels électrochimiques différents, non isolés électriquement l'un de l'autre constitue une macropile dans laquelle le métal présentant le plus bas potentiel constitue l'anode et se corrode. (figure 8)

A titre d'indication le tableau suivant donne des potentiels courants de différents matériaux dans le sol mesurés par rapport à une électrode de  $Cu \setminus CuSO_4$ .

Tableau N° 2 : Potentiel naturel de différents matériaux dans le sol. [ 1 ]

Matériaux	Potentiel ( v )
Charbon, coke, graphite	+ 0.1
Fonte à forte teneur en silicium	+ 0.1
Cuivre, laiton, bronze	+ 0.1
Fonte	- 0.2
Acier doux rouillé	+ 0.1 à -0.2
Acier doux propre	- 0.2 à -0.5
Aluminium	- 0.5
Zinc	- 0.8
Magnésium	- 1.3

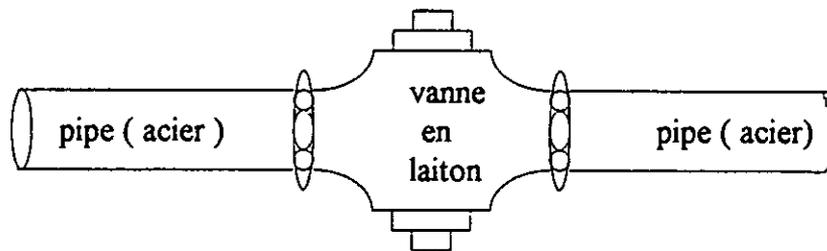


Figure - 8 - Configuration pouvant engendrer une corrosion galvanique

#### 4. Macropiles de grandes étendues ( corrosion relative du tracé ) ou «piles géologiques» [ 2,3 ]

L'agressivité relative est l'action de l'ensemble des sols sur l'ensemble complexe de la canalisation. Elle est due à des couples de grandes dimensions pour lesquels la canalisation et le sol servent surtout de conducteurs et qui s'exercent sur de grandes distances. (figure 9)

En effet on observe le phénomène de piles géologiques lorsqu'une canalisation traverse des strates de terrains de propriétés différentes. Chaque élément de la canalisation considéré par nature de sol formera une demie pile. Les demies piles sont placées dans des électrolytes en contact entre eux et la continuité électrique est assurée par la canalisation elle-même.

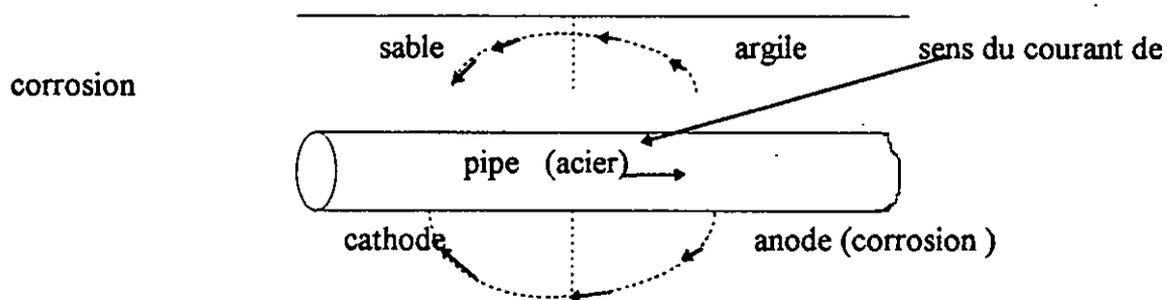


Figure - 9 - Schématisation d'une pile géologique

## 2.4. Corrosion par les courants vagabonds [ 2 ]

Les corrosions résultant de l'influence de courants vagabonds relèvent encore du phénomène de corrosion relative en ce sens qu'il existe également des plages anodiques et des plages cathodiques bien distinctes. Il ne s'agit plus de macropiles mais d'électrolyse sous, l'influence d'un courant qui trouve son origine à l'extérieure de la structure. Cette situation se rencontre lorsqu'une structure enterrée se trouve placée dans un champ électrique créée par des courants continus circulants dans le sol. Dans la mesure où la structure constitue pour le courant un chemin de moindre résistance, une partie des courants circulants dans le sol sont dérivés par la structure.

Les plages où le courant entre dans la structure sont le siège de réaction cathodique, tandis - que les plages où le courant quitte la structure sont le siège de réactions anodiques entraînant la dissolution du métal.

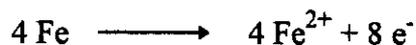
## 2.5. Corrosion bactérienne [ 2 ]

Dans certaines circonstances, la corrosion des structures métalliques enterrées peut être accélérée par l'activité de certaines bactéries, les plus connues étant les bactéries Sulfato - réductrice qu'on rencontre dans les milieux anaérobies et sulfatés.

L'activité biologique des bactéries réductrices des sulfates est associée à la réduction des sulfates par l'hydrogène cathodique.

L'ensemble des mécanismes peut se résumer comme suit :

\* processus anodique:



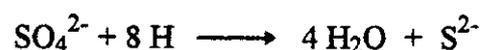
\* dissolution électrolytique de l'eau :



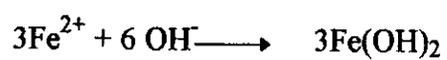
\* processus cathodique ( en milieu neutre privé d'oxygène ):



\* processus biochimique de dépolarisation cathodique :



\* processus secondaire ( produit de corrosion ) :



\* soit globalement



## CHAPITRE 3

# MOYENS DE LUTTE CONTRE LA CORROSION ET LEURS PRINCIPES

### **3.1. Introduction**

La nécessité d'une protection contre la corrosion des structures métalliques n'a plus besoin d'être démontrée.

Dans la protection des ouvrages, on distingue, selon le mécanisme de fonctionnement, les protections passives ( revêtement ) et les protections actives (électriques).

### **3.2. Inventaire des moyens [ 1,2,5 ]**

Les moyens de lutte contre la corrosion peuvent être classés comme suit :

#### **3.2.1. Choix adéquats des matériaux**

Le choix des matériaux permet d'éviter ou de limiter la corrosion. On peut choisir, lorsque le coût le permet, des matériaux ou alliages passifs prenant naturellement un état d'immunité dans le milieu corrosif en question.

#### **3.2.2. Contrôle du milieu corrosif**

Le contrôle de certains paramètres physico - chimiques, comme la température, le pH (alcalinisation), le dégazage, le pouvoir oxydant ( désaération, addition de produits oxydants...) peut réduire l'agressivité d'un sol.

#### **3.2.3. Emploi d'additifs chimiques à faible concentration**

L'emploi d'inhibiteurs de corrosion et de bactéricides peut réduire également l'agressivité d'un sol . Les inhibiteurs sont généralement utilisés pour la protection interne et dans les milieux où il n'y a pas de chlore.

#### **3.2.4. Traitement de surface et revêtement**

La constitution d'une barrière aussi parfaite que possible entre le milieu agressif et le métal peut réduire la corrosion. On distingue les peintures, les revêtements organiques et les revêtements métalliques.

#### **3.2.5. Protection électrique**

La modification du comportement électrochimique d'un métal dans le milieu corrosif par l'intermédiaire d'un courant électrique peut réduire fortement la corrosion sinon l'annuler.

### a) Protection anodique

La protection anodique consiste à maintenir le potentiel d'un alliage passivable dans un domaine de passivité stable en élevant son potentiel sous l'effet d'un courant anodique. La protection anodique nous permet de diminuer la vitesse de corrosion d'un métal mais pas de l'annuler.

$E_{pas}$  : potentiel de passivation  
 $I_{pas}$  : courant de passivation

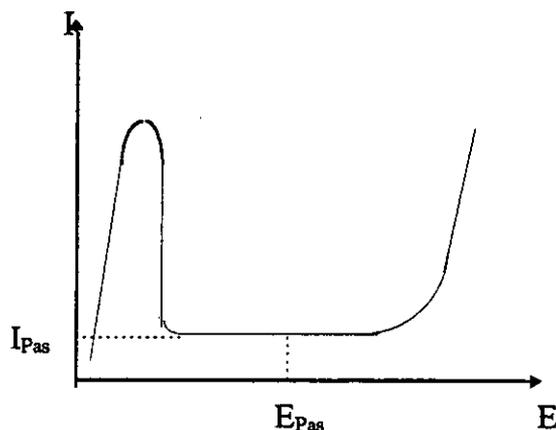


Figure - 10 - Diagramme de polarisation d'un métal passivable

### b). Protection cathodique

La protection cathodique consiste en l'abaissement du potentiel du métal à un niveau suffisamment bas pour que la corrosion soit éliminée ceci sous l'effet d'un courant cathodique. La courbe intensité - potentiel ( figure 11 ) permet d'explicitier l'ensemble des phénomènes de corrosion.

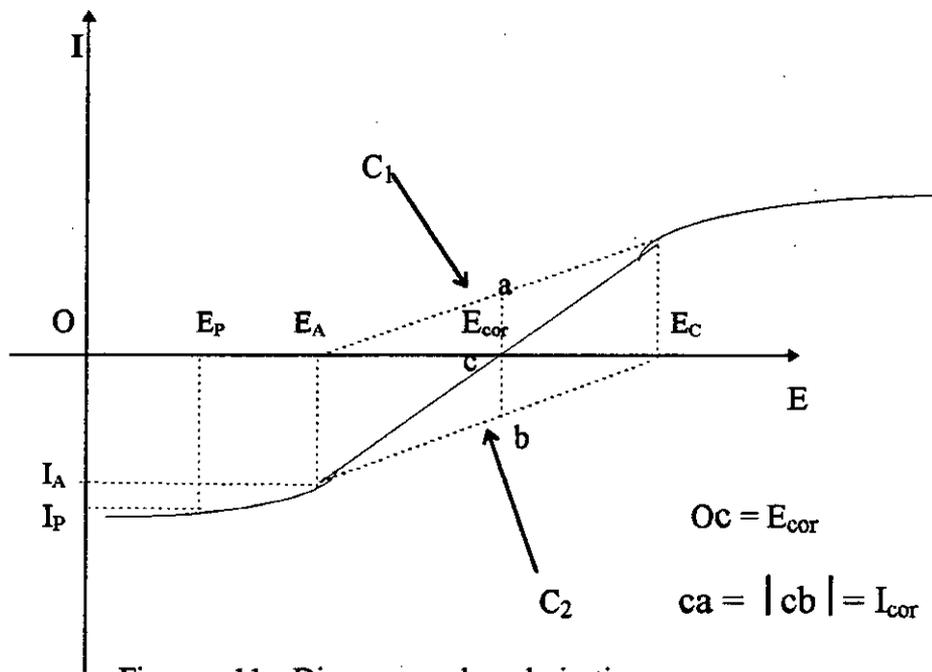


Figure - 11 - Diagramme de polarisation

Cette courbe globale en trait continu est la somme de deux courbes élémentaires. L'une caractéristique des réactions anodiques ( $C_1$ ), l'autre caractéristique des réactions cathodiques ( $C_2$ ). Le potentiel de corrosion est  $E_{cor}$ . Le point "c" est représentatif de la corrosion naturelle du métal. Si par un artifice on impose au métal un potentiel  $E_p$ , le point figuratif sur la courbe où le courant anodique est nul, il n'y a pas de réaction de oxydation. On a alors réalisé la protection cathodique du métal en contre partie il est nécessaire de fournir, par un système extérieur, des électrons en quantité suffisante, ce flux d'électrons est mesuré par l'intensité  $I_p$ .

### 3.3. Critère de protection cathodique

Si le principe est simple, l'application est plus difficile. C'est pourquoi les praticiens ont adoptés plusieurs critères de protection cathodique souvent basés sur l'expérience. Le critère le plus utilisé est le critère de potentiel car c'est le plus aisé à appréhender.

Les études faites par M.POURBAIX ont permis de déterminer le seuil théorique d'immunité d'un métal plongeant dans une solution en équilibre avec ces ions. Ce seuil est déterminé à l'aide des diagrammes construits par ce dernier. Ce sont des diagrammes théoriques dont la construction est basée sur les équilibres chimiques et électrochimiques.

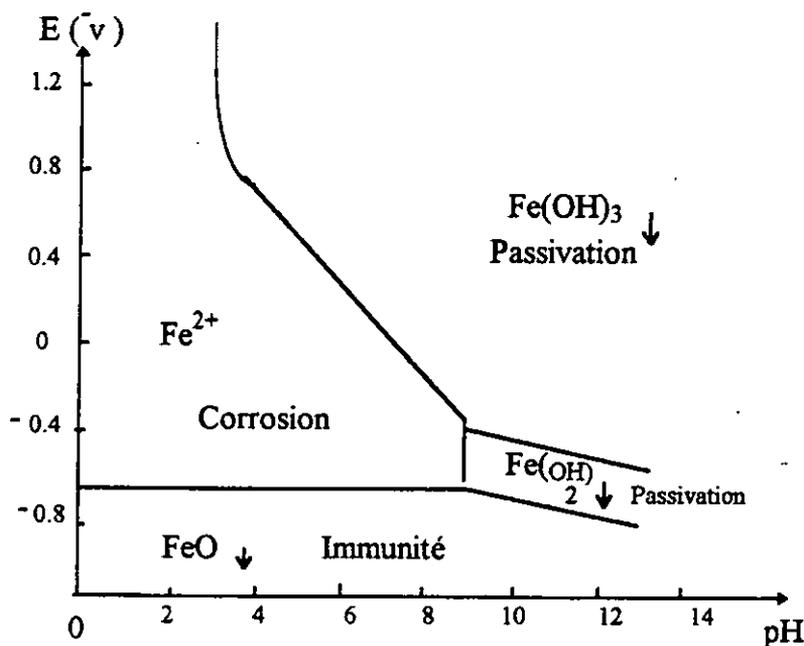


Figure - 12 - Diagramme de POURBAIX pour le fer

Le national bureau of standard (NBS) aux Etats-Unis a fait de nombreux essais tant en laboratoire que dans des sols naturels très divers et a admis pour l'acier dans le sol la valeur de seuil d'immunité de - 0.850 volt ( $Cu/CuSO_4$ ), ce chiffre est retenu dans le document standard de (NACE) (national association of corrosion engineers).

### 3.4. Variantes de la protection cathodique [ 1,2 ]

#### 3.4.1. Protection cathodique par anode sacrificielle

Ce mode de protection met à profit le phénomène de corrosion bimétallique en connectant électriquement la structure à protéger à des masses d'un métal moins noble (aluminium, zinc, ou magnésium dans le cas de l'acier ) celles ci vont se corroder préférentiellement et fournir un courant cathodique à la structure. L'emploi de ce système est bien approprié aux électrolytes très conducteurs, c'est à dire aux milieux dont la résistivité est inférieure à  $50 \Omega.m$ .

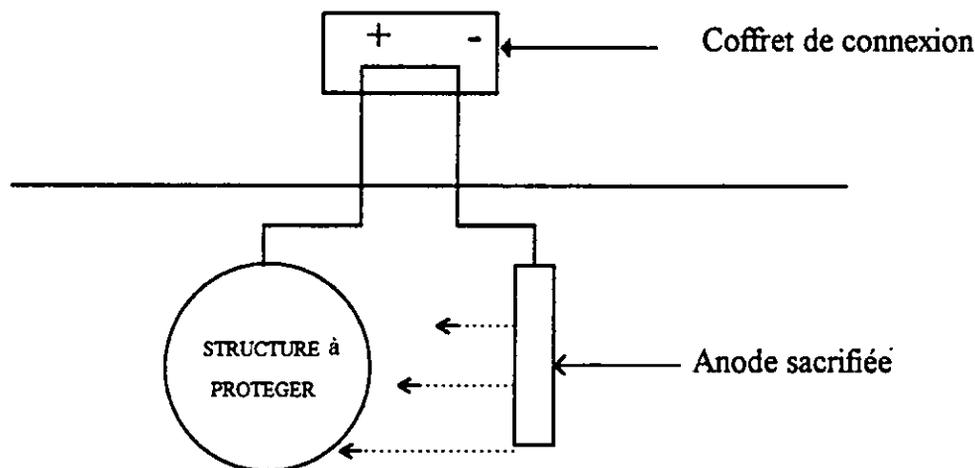


Figure - 13 - Protection par anodes sacrificielles

#### 3.4.2. Drainage du courant

Les drainages de courant sont des appareils destinés à protéger les canalisations enterrées contre les risques d'électrolyse dus à la présence dans le sol de courants vagabonds. Dans ce cas, le réseau est protégé contre les courants vagabonds sans qu'il soit nécessairement partout à l'abri des corrosions dues à l'agressivité du sol.

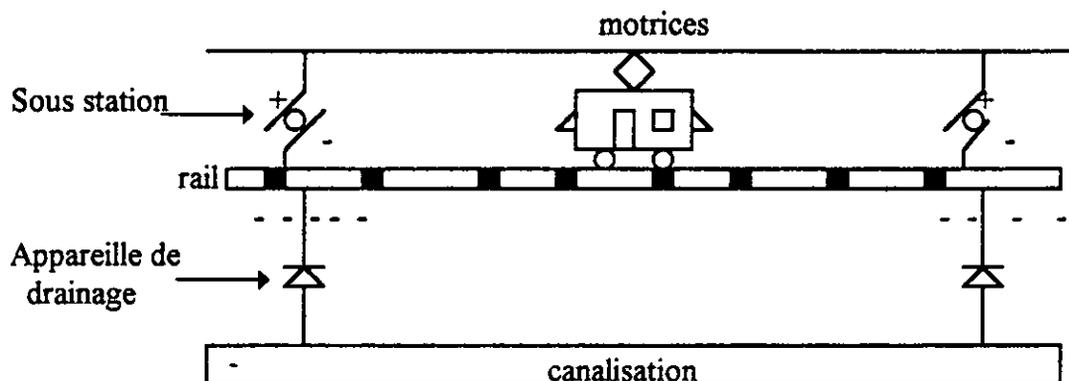


Figure - 14 - Schématisation d'un drainage de courant : La canalisation est électro négative par rapport au sol sur toute la longueur

### 3.4.3. Soutirage de courant ( courant imposé )

C'est le mode de protection le plus utilisé, mais c'est le plus délicat à réaliser sur les canalisations. L'abaissement du potentiel des canalisations est obtenu en reliant un ou plusieurs points de la structure métallique à protéger au pôle négatif d'une source électrique de courant continu.

Le circuit électrique se constitue alors :

- De la borne ( + ) de sortie du redresseur reliée à l'anode.
- De la borne ( - ) reliée à la canalisation à protéger.

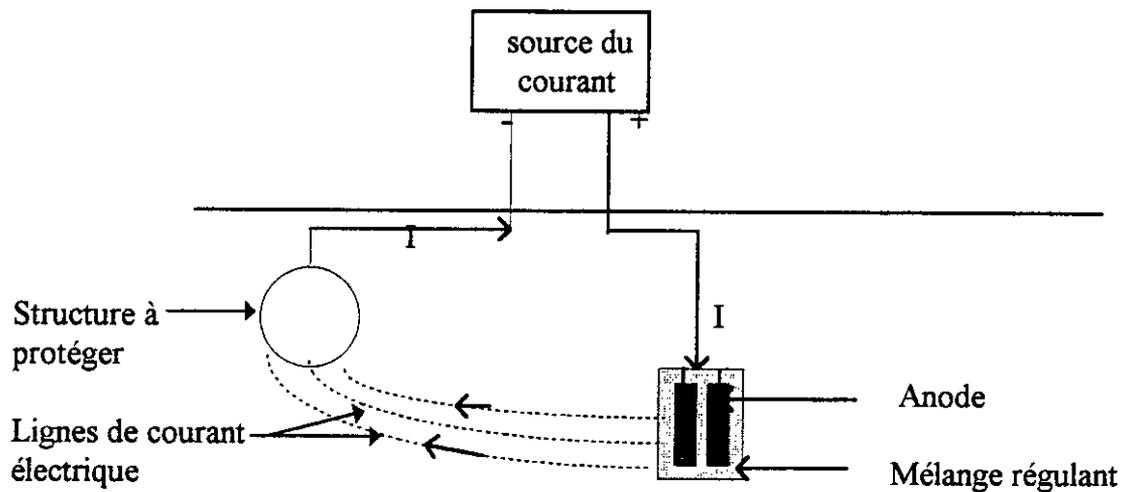


Figure - 15 - La protection cathodique par soutirage de courant

**PARTIE II**

**LA PROTECTION CATHODIQUE PAR  
SOUTIRAGE DE COURANT**

## **CHAPITRE 4**

# **NOTIONS ET ÉLÉMENTS DE BASE DE LA PROTECTION CATHODIQUE PAR SOUTIRAGE DE COURANT**

## 4.1. Introduction

Les phénomènes de corrosion rencontrés dans la plupart des cas sont de nature électrochimique, les moyens de lutte les plus efficaces contre la corrosion sont eux aussi de nature électrochimique. La protection cathodique par soutirage de courant consiste à modifier, par l'action d'un courant électrique, les réactions métal - électrolyte de manière à éliminer toute réaction à l'exception des réactions de réduction.

Les éléments de base nécessaires à l'application pratique de cette technique vont être développés dans ce qui va suivre.

## 4.2. Notion préliminaire

L'objet de ce paragraphe est d'essayer d'expliquer les principales notions entrant dans la conception et le dimensionnement des systèmes de protection cathodique et de montrer la constitution de ces derniers.

### 4.2.1. Potentiel de protection

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.

Des études expérimentales faites par NACE ( congrès corrosion avril 1984 New Orléans)[ 2 ], ont montré que les potentiels de l'acier (revêtu ) dans les sols se situent habituellement entre -400 et -700 mV par rapport à une électrode de référence Cu / CuSO<sub>4</sub>.

Ceci revient à dire qu'il faut obtenir des potentiels de -700 à -1000 mV qui englobent la valeur du critère (-850 mV). Il semblerait que, d'après PEABODY, ce critère, s'il n'assure pas la protection complète, couvrira la majorité des problèmes de corrosion.

*En pratique, il est donc nécessaire d'assurer un abaissement du potentiel d'au moins 300 mV ( Cu / CuSO<sub>4</sub>) en tout point de la structure à protéger.[ 2,3 ]*

### 4.2.2. Densité de courant de protection

L'abaissement du potentiel d'un métal à une valeur donnée est obtenu en injectant dans ce métal une densité de courant nécessaire à cet abaissement. La densité de courant est l'intensité de courant qui entre dans le métal par unité de surface du métal protégé.

Sur un ouvrage enterré et compte tenu des nombreuses hétérogénéités de la structure et du sol, la densité de courant nécessaire est difficile à appréhender. Mais néanmoins, des expériences ont permis d'évaluer la densité de courant de protection pour plusieurs métaux dans différents milieux. En fait, elle est définie par une valeur moyenne égale à la totalité du courant de protection divisée par la surface totale de l'ouvrage à protéger.[ 2,7 ]

#### 4.2.3. Potentiel d'injection

Dans le cas des structures longilignes ( pipeline ), le potentiel d'injection est défini comme étant l'abaissement du potentiel qu'on doit assurer au point de soutirage, afin d'avoir aux extrémités de la conduite des valeurs conformes au critère de protection. (  $< -850$  mV par rapport à une électrode de référence Cu / CuSO<sub>4</sub> ).

#### 4.2.4. Courant de protection

Il est défini comme étant l'intensité de courant totale nécessaire, à injecter dans la structure afin d'assurer un abaissement du potentiel conforme au critère de protection (  $< -850$  mV / Cu / CuSO<sub>4</sub> ).

#### 4.2.5. Résistance transversale de l'enrobage

La résistance d'isolement R exprimée en  $\Omega \cdot m^2$  est la résistance électrique envers le sol d'un mètre carré de canalisation revêtue. En fait, cette résistance ne dépend pas de la nature du produit de revêtement utilisé (bitume, polyéthylène ...etc.) dont les résistivités sont toujours très élevées, mais elle dépend surtout des défauts de ce revêtement. En effet, c'est à l'endroit des trous dans le revêtement que le métal est en contact avec le sol et ce sont les seuls points où le courant de protection peut pénétrer dans la canalisation. la notion de résistance d'isolement d'une canalisation est donc très importante en protection cathodique, et elle doit être utilisée avec beaucoup de précaution car elle influe directement sur l'intensité du courant de protection. [ 2 ]

#### 4.2.6. Résistance longitudinale

Les ouvrages métalliques traversés par le courant de protection sont considérés comme des conducteurs, tout conducteur présente une résistance au passage d'un courant électrique. Dans le cas des canalisations, cette résistance est appelée résistance longitudinale et dépend de la nature du matériau et des dimensions des conduites.

### 4. 3. Equations de bases

Le calcul des paramètres de la protection cathodique est basé sur le courant de protection. Dans la protection cathodique des ouvrages enterrés, on peut classer les structures à protéger en deux familles, les structures compactes (concentrées) et les structures longilignes.

#### 4. 3.1. Cas des structures compactes

Dans le cas de structure compactes, le courant de protection est déterminé en exploitant la notion de densité de courant de protection. En effet, à chaque type de couple métal - milieu ambiant communément rencontré sur le terrain correspond une densité de courant de protection déterminée expérimentalement. Connaissant la surface totale à protéger, on peut déterminer le courant de protection par la formule suivante. [ 2 ]

$$I = i * A \quad ( 4.1 )$$

où : I : Intensité du courant de protection ( A )  
 i : Densité du courant de protection ( A / m<sup>2</sup> )  
 A : Surface totale de la structure métallique à protéger ( m<sup>2</sup> )

#### 4. 3.2. Cas des structures longilignes

Dans le cas précédent, on considérait la résistance électrique de l'ouvrage comme négligeable. Dans le cas des structures longilignes comme les canalisations, il faut tenir compte de cette résistance qui provoque un effet d'atténuation du courant.

Les formules mathématiques dites « lois des télégraphistes » donnent l'intensité et le potentiel d'injection en tenant compte des résistances linéaire et transversale de la structure. [ 2,4,7 ]

$$I_x = \frac{E_0}{\gamma} \operatorname{sh}(\alpha * x) + I_0 \operatorname{ch}(\alpha * x) \quad ( 4.2 )$$

$$E_x = E_0 \operatorname{ch}(\alpha * x) + \gamma I_0 \operatorname{sh}(\alpha * x) \quad ( 4.3 )$$

Où : x : longueur de la canalisation à protéger ( m )  
 E<sub>x</sub> : abaissement du potentiel au point x ( V )  
 E<sub>0</sub> : abaissement du potentiel qu'on doit assurer au point x = 0 ( V )  
 I<sub>x</sub> : intensité du courant à injecter au point x ( A )  
 I<sub>0</sub> : intensité du courant au point x = 0 ( A )

$\alpha$  : coefficient d'atténuation de la conduite (  $m^{-1}$  )  
 $\gamma$  : résistance caractéristique de la conduite (  $\Omega$  )

$$\alpha = \sqrt{(r / R)} \qquad \gamma = \sqrt{r R}$$

$r$  : résistance longitudinale de un mètre de conduite (  $\Omega \cdot m^{-1}$  )  
 $R$  : résistance transversale de l'isolement de la conduite (  $\Omega \cdot m$  )

Remarques :

La résistance transversale R est supposée homogène tout le long de la structure.  
 L'abaissement du potentiel est la différence entre le potentiel initial du métal dans le sol au point de mesure et le potentiel pris sous l'effet du courant de protection.  
 r, la résistance ohmique d'un mètre de conduite est calculée par la formule classique.

$r = \rho_m \cdot l / s$  où l : longueur de la conduite ( m )  
 $\rho_m$  : résistivité du métal ( 15 à 25 .  $10^{-8} \Omega \cdot m$  pour l'acier ).  
 s : section du métal de la conduite (  $m^2$  ).

L'intensité de courant à l'extrémité de la conduite, opposée au soutirage (limite de la protection), sera nulle.

Pour une conduite de longueur L finie, les formules deviennent

$E_L = E_0 \operatorname{ch} \alpha L$	( 4.4 )
$I_L = \frac{E_0}{\gamma} \operatorname{sh} \alpha L$	( 4.5 )

Où  $I_L$  : intensité de courant de protection ( A )  
 $E_L$  : abaissement du potentiel au point d'injection ( v )  
 $E_0$  : abaissement du potentiel à l'extrémité de la conduite ( v )

Le développement des équations ( 4.2 et 4.3 ) est donné dans l'annexe I.

## 4.4. Constitution des systèmes de protection cathodique par soutirage de courant

Contrairement à d'autres modes de protection cathodique ( anodes sacrificielles, drainage de courant ), le soutirage de courant permet de protéger de grandes surfaces de structures métalliques. [ 7 ]

Quand la structure longiforme ( canalisation ) à protéger est assez longue, on prévoit plusieurs postes de protection distribués le long de la structure métallique. Chaque poste de protection cathodique comporte les éléments essentiels suivants :

- ☛ Générateur de courant.
- ☛ Déversoir de courant.
- ☛ Les liaisons électriques.

Dans ce qui va suivre on va donner un bref aperçu sur chaque élément.

### 4.4.1. Générateurs de courant

Les générateurs de courant conçus pour la protection cathodique doivent débiter sur les anodes un courant continu et en permanence pendant la durée de vie estimée pour la structure à protéger.

Du point de vue de dimensionnement, il est recommandé de surdimensionner ces générateurs afin d'assurer une durée de vie importante au système.

#### a) . Transformateurs ~ redresseurs [ 2 , 7 ]

Lorsqu'on dispose de l'énergie électrique, on utilise comme générateur, un transformateur-redresseur relié au réseau électrique et se composant de:

- Un transformateur abaisseur de tension.
- Un dispositif de redressement constitué par un pont de diodes au silicium.
- Un ampèremètre et un voltmètre permettant de contrôler la tension et l'intensité du courant continu de sortie.

Il existe des transformateurs - redresseurs à régulation automatique où l'intensité et la tension de sortie sont contrôlées automatiquement.

Ces générateurs à transformateurs-redresseurs peuvent protéger des sections de conduites pouvant atteindre 100 km de longueur dans certains cas, mais il faut qu'on ait un abaissement du potentiel conduite/sol au point d'injection suffisamment fort. Ce fort abaissement peut avoir des effets nuisibles tel que le décollement de l'enrobage.

L'utilisation des transformateurs - redresseurs est liée à la disponibilité d'un réseau de distribution de l'énergie électrique.

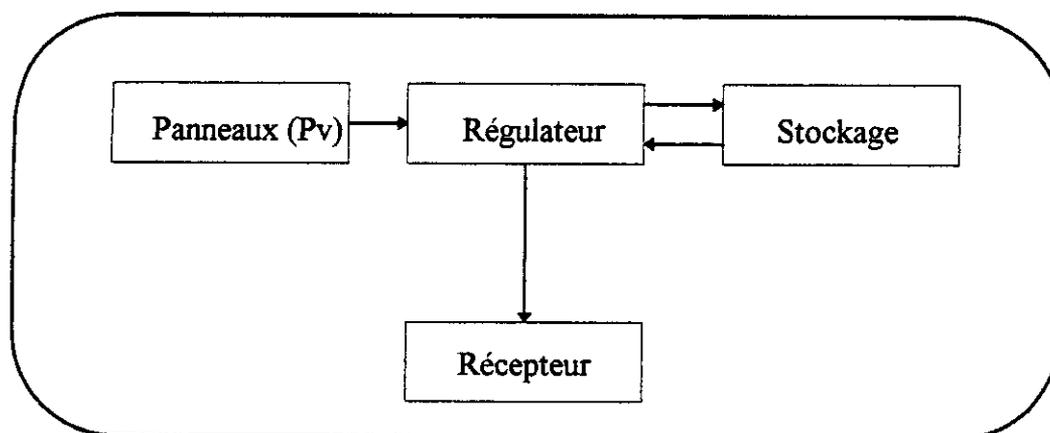
## b). Générateurs solaires

### 1. Généralités

Le soutirage de l'énergie électro-solaire est réalisé à l'aide des panneaux de cellules photovoltaïques. Ces panneaux captent l'énergie solaire, qui est transformée en courant continu. Ce courant électrique, par l'intermédiaire d'un régulateur, charge une batterie qui a pour mission de stocker l'énergie électrique. Cette énergie est restituée aux périodes de moindre éclaircissement.

Suivant leur importance et leur consommation de puissance, les installations solaires comportent un nombre plus ou moins élevé de panneaux solaires et de batteries d'accumulateurs.

Il est possible de concevoir différents montages pour alimenter un récepteur électrique. Dans le cas de la protection cathodique, il faut prévoir un montage qui permet d'avoir en permanence un courant continu, pour cela on doit utiliser un système de stockage d'énergie muni d'un dispositif de réglage et de protection. [ 8,9 ]



### 2. Constitution des générateurs solaires

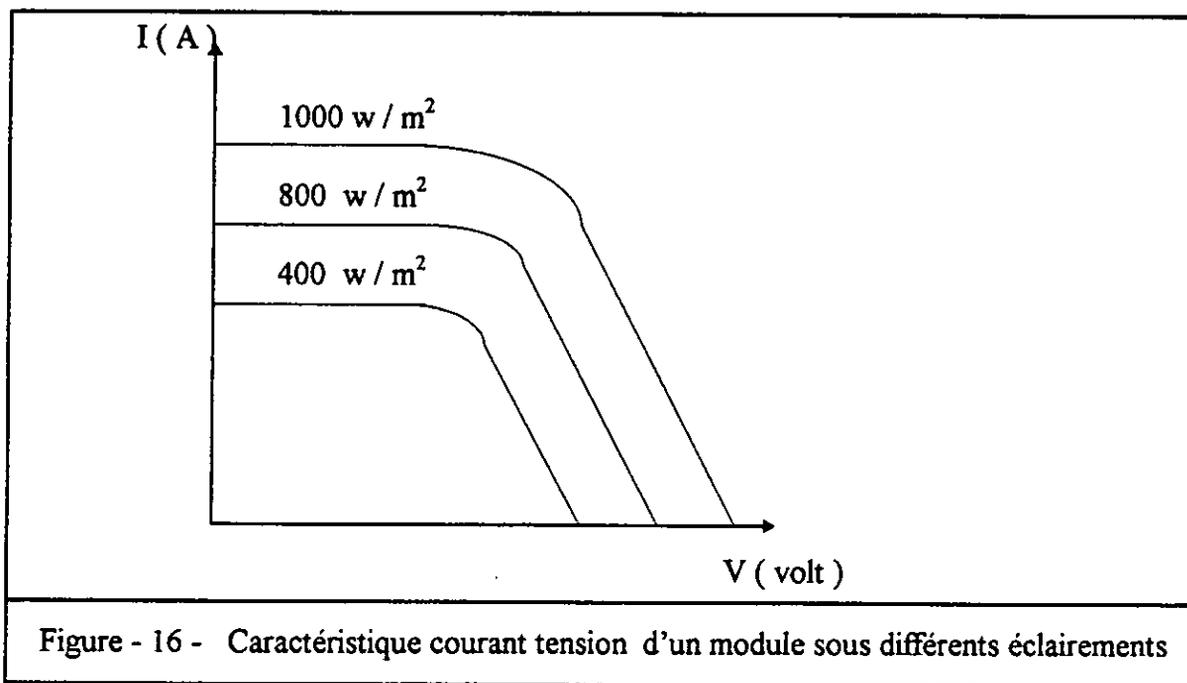
- **Cellule** : les cellules photovoltaïques ou encore les photopiles sont les seuls responsables de la transformation directe de l'énergie solaire sous forme de lumière en électricité. Cette transformation est réalisée en faisant appel aux propriétés des matériaux semi-conducteurs sous forme mono ou polycristallins ou amorphe. Actuellement les semi-conducteurs les plus utilisés sont :

- Le silicium mono ou polycristallin ( plus de 90% de la production des photopiles ).
- Le silicium amorphe.

Exposée à un flux de photons (présence de lumière ), une cellule photovoltaïque peut être considérée comme une source de courant variable, qui a une tension utilisable de 0.45 V environ. [ 8 ]

• *Module photovoltaïque* : l'énergie fournie par une seule cellule ne suffit pas à l'alimentation directe d'un équipement électrique, c'est pourquoi les cellules sont connectées électriquement « montage en série » et assemblées en modules pour constituer des systèmes résistants, hermétiques, et de puissance suffisante.

Toutes les photopiles solaires utilisées pour la production de puissance sont commercialisées regroupées dans un module. Suivant le nombre et le type des photopiles, chaque module est caractérisé par sa courbe ( I, V ) (Figure 16), permettant de déterminer les conditions de travail du module en fonction de l'ensoleillement, la température et la tension de fonctionnement. [ 8,11 ]



Un module photovoltaïque doit assurer les fonctions suivantes : [ 11 ]

- Protection des cellules contre les intempéries.
- Protection mécanique.
- Connexion électrique avec l'extérieur.
- Support.

• *Panneaux photovoltaïques* : la puissance des modules s'exprime en watt - crête : c'est la puissance que peut fournir un module quand il est fermé sur sa charge optimale, sous un éclairement de  $1 \text{ K w / m}^2$  et à  $28 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Commercialement les puissances des modules disponibles s'échelonnent entre quelques watts - crête et une centaine de watt - crête ( 30 - 120 ). Pour obtenir des puissances supérieures (pour répondre aux besoins de la charge ), il est nécessaire de connecter un certain nombre de modules en série et / ou en parallèle et réunis sur une même structure porteuse, appelée panneau photovoltaïque ( Figure 17 ). [ 8 ]

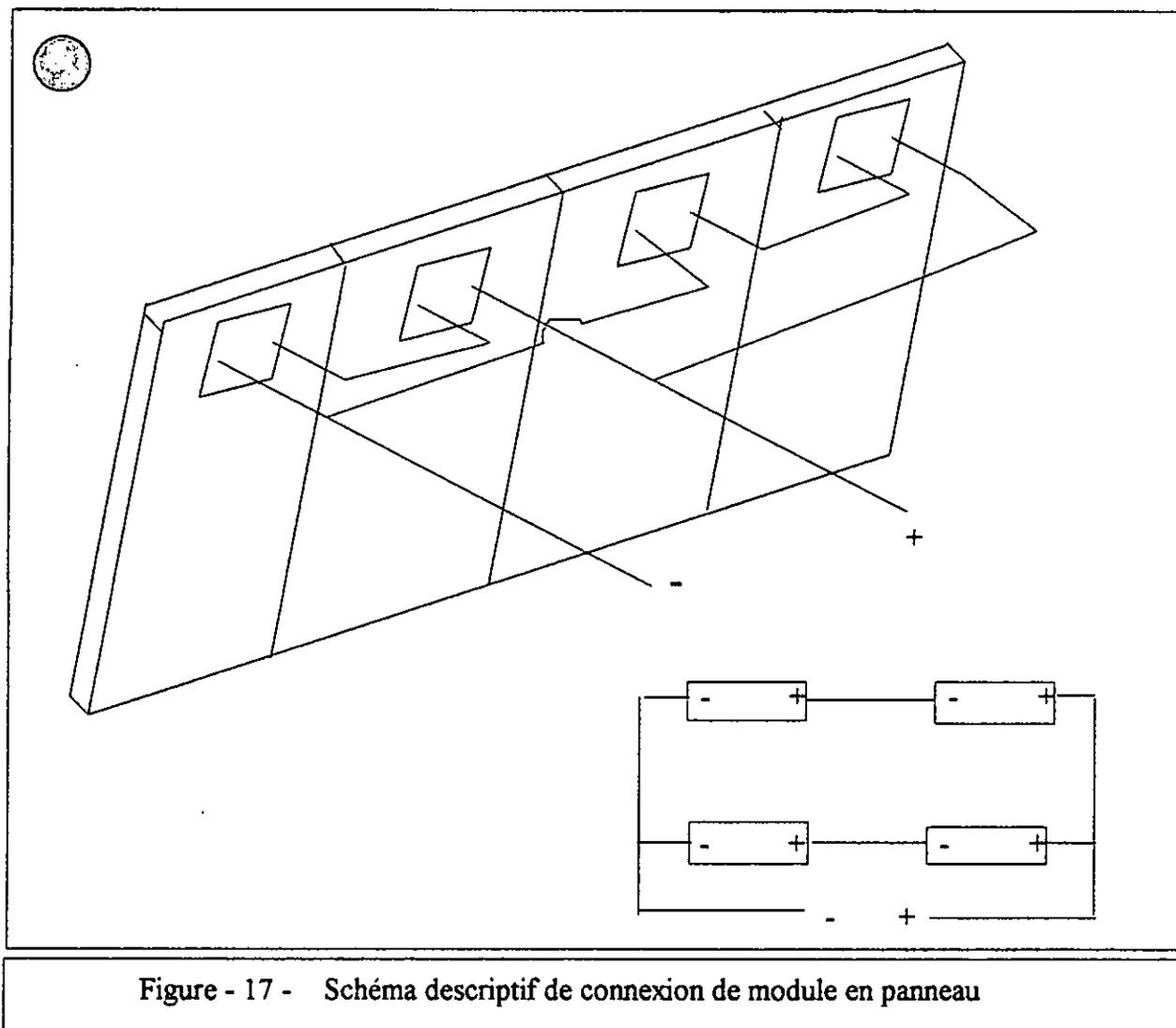


Figure - 17 - Schéma descriptif de connexion de module en panneau

- *Système de stockage* : toute installation photovoltaïque doit comprendre un système de stockage généralement constitué d'accumulateurs chimiques où l'énergie électrique est convertie et stockée moyennant des réactions électrochimiques réversibles.

Les batteries au plomb sont les plus courantes et les moins onéreuses.

La caractéristique essentielle d'une batterie est sa capacité d'accumuler de l'énergie électrique, cette capacité exprimée en Ampère heures (A.h), varie selon les conditions d'utilisation ( courant et tension de décharge, température ... ).

La capacité nominale  $C_n$  d'une batterie est spécifiée pour une durée de décharge de 10 heures. La décharge d'une batterie ne doit pas être prolongée. En effet, le nombre de cycles de charge et décharge d'un accumulateur, donc de sa durée de vie, dépend de la profondeur de décharge. C'est ainsi que pour assurer une durée de vie de cinq ans à une batterie, en supposant la décharger une fois par jour, la profondeur de décharge ne devra pas excéder 40% de la capacité nominale. [ 12 ]

- *Système de régulation de charge* : ou encore appelé contrôleur de gestion d'énergie est toujours indispensable, surtout dans sa version de base qui consiste à commuter l'énergie vers les accumulateurs en évitant autant leur décharge prolongée que leur surcharge. [ 12 ]

### 3. Avantages et inconvénients de soutirage électro - solaire : [ 1 ]

La figure N° 18 représente un schéma simplifié d'un poste de soutirage de courant par un générateur solaire. Les principaux avantages de l'utilisation de ce type de générateur peuvent être résumés comme suit :

- ☞ La simplicité : les cellules photovoltaïques délivrent un courant continu qui élimine le redresseur.
- ☞ L'économie d'exploitation : puisqu'il n'y a aucun besoin d'énergie externe.
- ☞ La fiabilité : accrue, notamment vis-à-vis des dégâts occasionnés par la surtension propagée par les lignes électriques. En outre, le matériel est entièrement statique donc d'usure réduite.
- ☞ La sécurité : le courant électrique est à basse tension donc pas de risque d'électrocution.
- ☞ La modularité : l'investissement est ajusté au besoin et peut être étalé dans le temps, le système peut être étendu à n'importe quel moment.

Comme inconvénients on peut citer :

- ☞ Le risque de vol de module. Le risque de dégradation dû à la malveillance.
- ☞ La limitation pratique de la puissance à quelques centaines de watts.

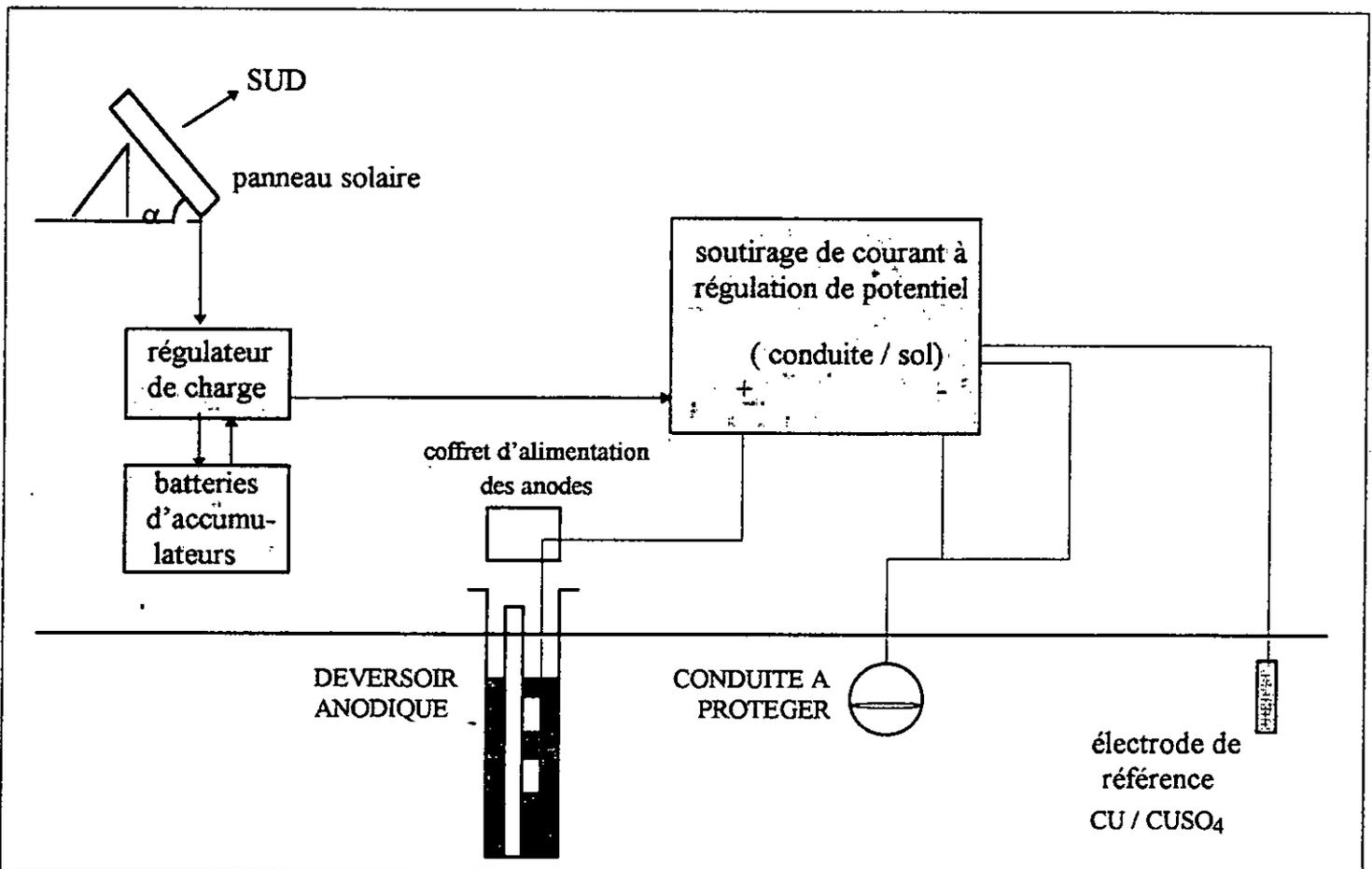


Figure - 18 - Schématisation d'un soutirage électrosolaire

## 4.4.2. Déversoirs anodiques de courant

### a). Généralités

Les déversoirs anodiques de courant sont constitués de masses métalliques sacrifiées branchées à la borne positive du générateur de courant. Ils doivent être conçus de manière :

A n'être consommés qu'après un nombre d'années déterminé, en général le plus grand possible.

A ne présenter qu'une faible résistance de contact avec le sol de manière à ne nécessiter qu'une faible force électromotrice et à limiter donc la puissance du générateur de courant ainsi que la consommation de l'énergie électrique.

Le premier objectif est atteint en faisant un choix approprié des matériaux constituant les anodes. Ce choix doit être fait de manière à diminuer la consommation par unité de courant. Le second objectif est atteint :

- En installant les déversoirs dans des zones à faible résistivité électrique.
- En utilisant des formes de déversoirs présentant de grandes surfaces de contact avec le sol.
- En posant les anodes dans des milieux appropriés à faible résistivité électrique tels que la bentonite et la poussière de coke ( $\rho < 100 \Omega \cdot \text{cm}$ ).

Dans certains cas, pour limiter la résistance de terre du déversoir, on est amené à réaliser des puits atteignant la centaine de mètres de profondeur. [ 3,13 ]

### b). Choix des matériaux constituant les anodes [ 1,2 ]

Plusieurs types d'anodes sont d'usage dans les déversoirs anodiques et le choix sur l'anode à utiliser se fait à partir d'un certain nombre de critères, à savoir :

- Le milieu de pose des anodes.
- La consommation des anodes.
- La densité de courant admissible.
- Le prix.

Les anodes sont classées en trois grandes familles :

1. Les anodes à forte consommation: ce sont généralement des ferrailles telles que les rails en fer, les tubes en acier, . . . etc.

- Milieu : convient à tous les milieux.
- Densité de courant admissible : pas de limite.
- Masse volumique :  $7.8 \text{ g / cm}^3$ .

L'inconvénient de ces anodes réside dans leur taux de consommation très élevé ( $9 \text{ kg / A / an}$ ). Leur utilisation peut être intéressante, notamment lorsque des rebuts existent aux alentours de la structure à protéger, mais dans le cas contraire il est plus rentable d'utiliser d'autres types d'anodes de taux de consommation plus faible.

2. Les anodes à faible consommation : on trouve dans cette famille les anodes en Graphite, Ferro - silicium , Argent ou en Magnétite. Les plus utilisées sont les anodes en Ferro-silicium.

◆ Les anodes en Ferro - Silicium : Ce type d'anodes est constitué par une fonte comprenant 14 à 15 % de Silicium. Dans le cas de l'utilisation en milieu contenant du Chlore, une addition de 4 à 5 % de Chrome est nécessaire.

La consommation du Ferro-Silicium dépend de la densité de courant à laquelle il est soumis et de la nature du milieu où se trouvent ces anodes ( tableau 3 ).

Tableau N° 3 : Consommation moyenne du ferro-silicium pour différentes densité de courant. [ 2 ]

MILIEU	DENSITE DE COURANT ( A / m <sup>2</sup> )	CONSOMMATION MOYENNE ( Kg / A.an)
eau douce	10 à 30	0.2
eau de mer	10 à 100	0.5
terrain humide avec backfill à boue de coke	10 à 100	0.3
terrain sec avec backfill à boue de coke	10 à 100	0.15

La durée de vie des anodes est fonction de la densité du courant imposée aux anodes. C'est ainsi, pour chaque intensité de courant, correspond une durée de vie déterminée pour les anodes ( tableau 4 ).

Tableau N° 4 : Intensité de courant pour une durée de vie de 10 ans, de certaines anodes en ferro - silicium de différentes géométrie. [ 2 ]

TYPES D'ANODES LONGUEUR (m), DIAMETRE(cm)		MASSE ( K g )	INTENSITE DE COURANT POUR UNE DUREE DE VIE DE 10 ANS ( A )
1.525	3.8	12.5	1
1.525	5.1	22.7	2
1.525	7.62	50.1	6

◆ Les anodes en magnétite : les anodes en magnétite sont utilisées dans tous les milieux et elles présentent un taux de consommation acceptable mais leurs inconvénients résident dans leurs fragilités lors de leurs manutentions.

3. Les anodes à très faible consommation : ce type d'anode est constitué par un mélange d'un métal qui sert de support tel que le Tantale ou le Titane et du Platine dont la consommation est très faible. Mais l'inconvénient majeur de ces anodes réside dans leur prix très élevé .

### c) . Différents types d'installation des anodes

Suivant l'évolution de la résistivité électrique du sol, on prévoit différents montages des anodes afin de diminuer le maximum possible la résistance de terre et limiter la tension de sortie du générateur.

#### 1. Déversoir de surface

Les déversoirs de surface sont réalisés lorsque la résistivité électrique du sol est faible en surface et lorsqu'on dispose suffisamment de terrain.

Anodes posées verticalement : Le procédé de ce mode de pose consiste à enterrer les anodes verticalement dans un trou creusé au fond d'une tranchée à une profondeur comprise entre un et deux mètres selon la nature du terrain ( figure 19 ).

Dans ce cas, la résistance de terre des anodes est calculée à partir de la formule de DWIGHT qui donne la résistance de terre d'une anode posée verticalement près de la surface. [ 1 ]

$$R_v = \frac{\rho}{2 \pi L} \left( \ln \frac{8 L}{d} - 1 \right) \quad ( 4 . 6 )$$

Avec :

$R_v$	: résistance de terre	( $\Omega$ )
$\rho$	: résistivité du sol en	( $\Omega.m$ )
$L$	: longueur de l'anode	( m )
$d$	: diamètre de l'anode	( m )

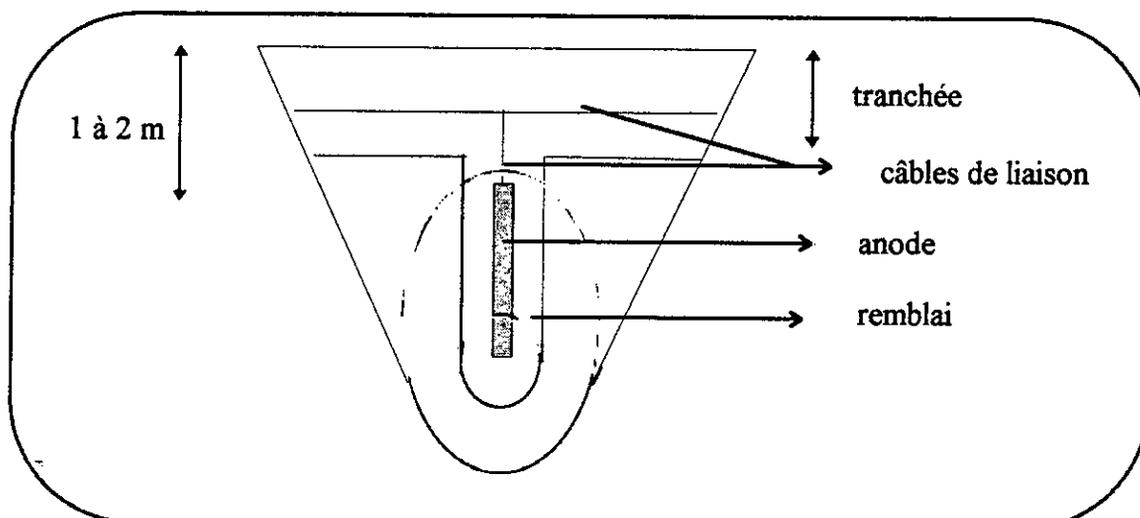


Figure - 19 - Schéma de pose d'une anode verticale

La connexion de plusieurs anodes en parallèle est parfois nécessaire pour abaisser la résistance de terre du déversoir (figure 20).

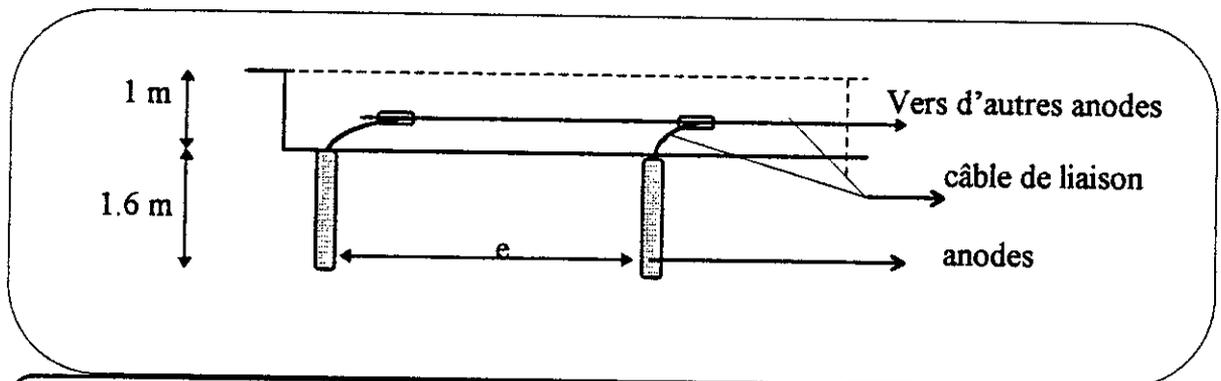


Figure - 20 - Schéma de pose de N Anodes verticales

Pour N anodes posées verticalement la résistance de terre du déversoir devient : [ 7 ]

$$R_v = \frac{\rho}{\pi N} \left( \frac{1}{2L} \left( \ln \frac{8L}{d} - 1 \right) + \frac{1}{e} \left( \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{N} \right) \right) \quad (4.7)$$

Avec : e : Espacement entre anodes ( m ).  
N : Nombre d'anodes.

Ou bien

$$R_v = \frac{\rho}{2 \pi L N} \left( \ln \frac{8L}{d} - 1 + \frac{2L}{e} \ln (0.656 N) \right) \quad (4.7)$$

Anodes posées horizontalement : Au cours des dernières années, parallèlement au déversoirs verticaux, les déversoirs horizontaux sont fréquemment utilisés. La pose horizontale des anodes est plus simple et demande beaucoup moins de moyens (figure 21). La résistance de terre des déversoirs horizontaux est légèrement plus élevée, mais elle est largement compensée par les avantages que cette solution procure du point de vue de la construction car on peut adapter très facilement la résistance de terre, en prolongeant la longueur du lit d'anodes ( figure 21 ). [ 7 ]

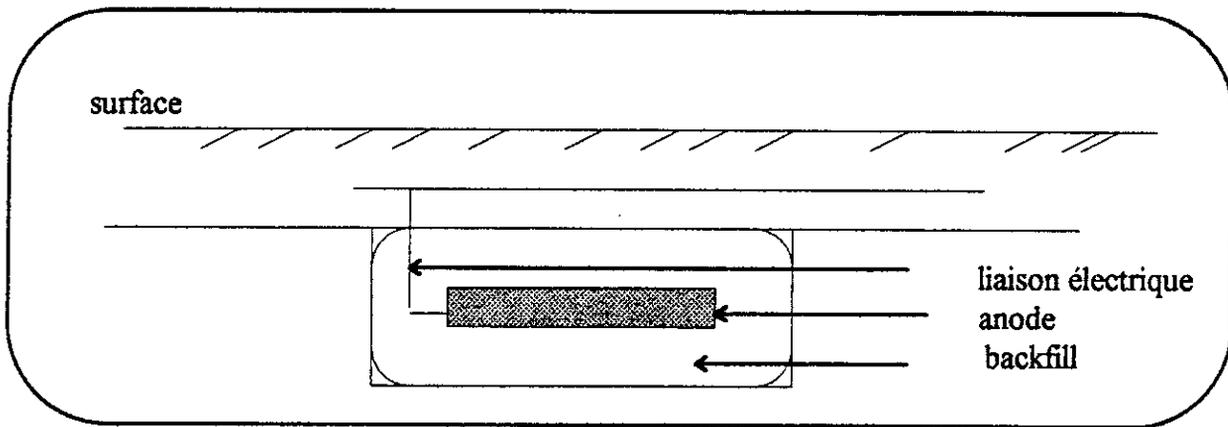


Figure - 21 - Schéma de pose d'une anode horizontale

Dans ce cas, la résistance de terre est donnée par la formule suivante [ 7,14 ] :

$$R_h = \frac{\rho}{4 \pi L} \left( \ln \frac{L + \sqrt{d^2 + L^2}}{-L + \sqrt{d^2 + L^2}} + \ln \frac{L + \sqrt{(4 * t - d)^2 + L^2}}{-L + \sqrt{(4 * t - d)^2 + L^2}} \right) \quad (4.8)$$

- Avec :
- $R_h$  : Résistance du déversoir horizontal (  $\Omega$  ).
  - $L$  : longueur de l'anode ( m ).
  - $t$  : Profondeur de pose de l'anode ( m ).
  - $d$  : diamètre de l'anode et de son backfill ( m ).

## 2. Déversoirs de profondeur :

On a recours à ce genre de déversoirs lorsque :

- Il est impossible, par un déversoir de surface d'obtenir une répartition convenable du courant sur la structure à protéger.
- Il y a risque important d'interférences sur les structures voisines.
- La résistivité du sol en surface ne permet pas d'obtenir une valeur acceptable de la tension à la sortie du générateur.
- On doit travailler dans des zones habitées.

Le procédé consiste à forer un trou profond de manière à atteindre un sol présentant une faible résistivité et réaliser ensuite une colonne de longueur suffisante à recevoir le nombre d'anodes prévu ( figure 22 ). [ 1,3 ]

Dans ce cas la résistance du déversoir est donnée par la formule ( 4 . 6 ) : [ 1,13 ]

$$R_s = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \frac{8 L}{d} - 1 \right)$$

- Où :
- $R_s$  : résistance du déversoir (  $\Omega$  )
  - $L$  : longueur de la colonne d'anodes ( m )
  - $d$  : diamètre du déversoir ( m )
  - $\rho$  : résistivité du sol (  $\Omega \cdot m$  )

Il existe des cas où il est difficile d'avoir une résistance de terre faible quelque soit le type installation du déversoir. Dans ces cas l'utilisation d'un mélange régulateur à faible résistivité appelé backfill est indispensable, le matériau le plus utilisé pour cela est la poussière de coke de pétrole de résistivité  $\rho < 100 \Omega \cdot cm$ .

L'avantage de l'utilisation du backfill, en plus de l'homogénéisation de la corrosion des anodes et l'augmentation de la durée de vie de ces dernières, est la diminution de la résistance de terre des déversoirs.

Exemple : Soit un sol de résistivité  $\rho = 20 \Omega \cdot m$ , et une anode dont les dimensions sont les suivantes  $L = 1.525 m$ ,  $d = 0.15 m$ , posée verticalement sans backfill

La résistance de terre est :

$$R_{s1} = 7.09 \Omega$$

Supposons maintenant que notre anode soit mise dans un backfill qui est contenu dans un tube dont les dimensions sont les suivantes  $L = 3 m$  et  $d = 0.3$  mètres, donc la résistance de terre de notre déversoir devient :

$$R_{s2} = 3.58 \Omega$$

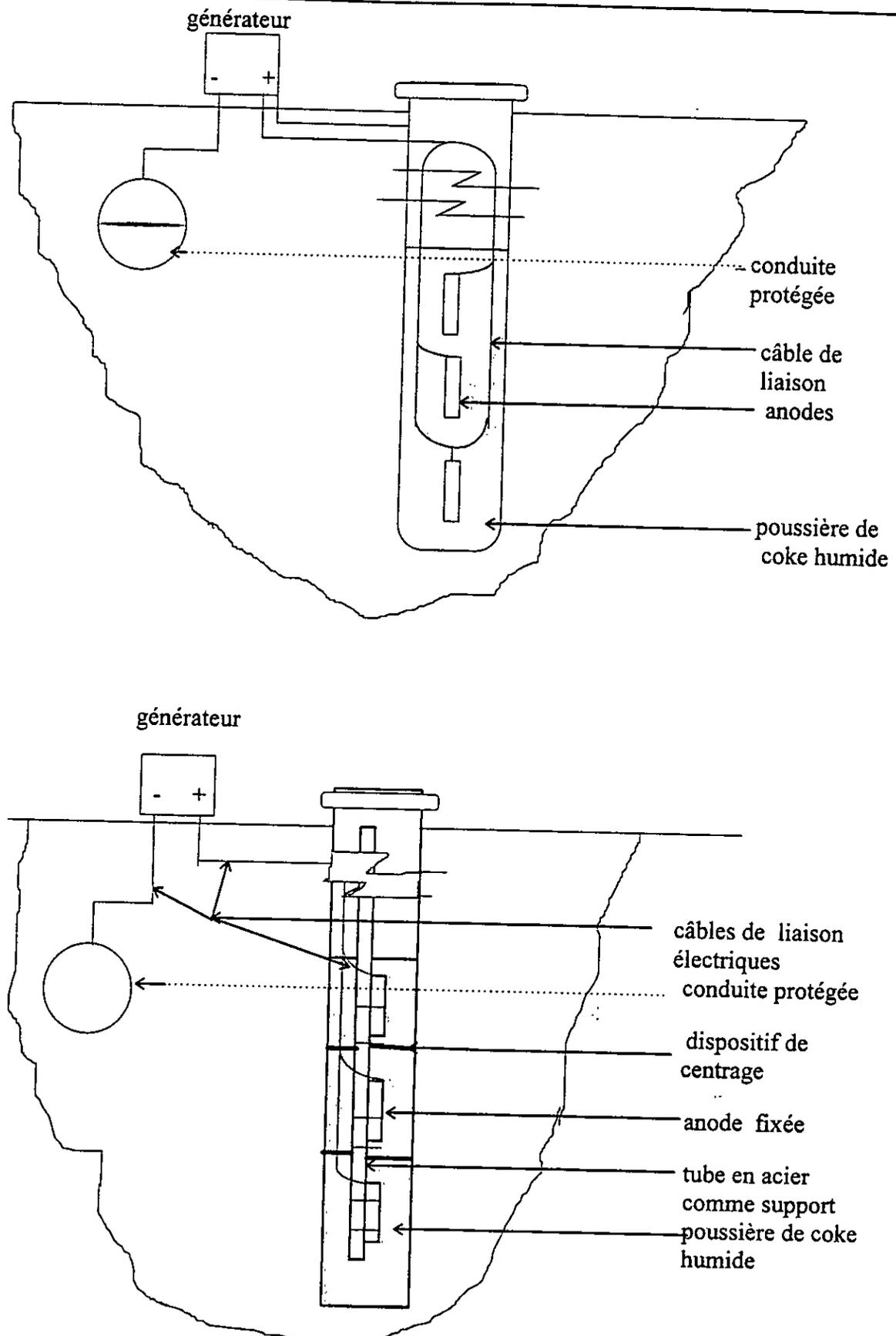


Figure - 22 - Schémas représentatifs d'un déversoir de profondeur

### 4.4.3. Câbles de liaison

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

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

De nos jours, 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 extérieur en PVC. [ 7 ]

Les sections des câbles utilisés sont normalisées en fonction de l'intensité de courant nécessaire à la protection ( tableau 5 ). [ 7 ]

Tableau N° 5 : Section des câbles électriques en fonction de l'intensité de courant circulant

Intensité de courant en ( A )	5	10	15	20	35	45	60
section de câble en ( mm <sup>2</sup> )	10	16	25	35	50	70	95
résistance pour 100 m en ( m Ω )	174	112	71	51	36	26	19

**Remarque :** En plus de ces éléments cités, ils existent d'autres équipements complémentaires tels que.

1. Les appareils de coupures : Ce sont de simples interrupteurs.
2. Les appareils de protection : Lorsque le poste est raccordé à un réseau de distribution, un disjoncteur doit être installé pour la protection contre les surtensions.
3. Les appareils de mesure qui ont pour mission d'indiquer :

- \*La tension d'alimentation.
- \*La tension d'utilisation.
- \*L'intensité débitée.
- \*Le potentiel structure - sol.

**CHAPITRE 5**

**CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT  
DES SYSTÈMES  
DE PROTECTION CATHODIQUE**

## 5.1. Dimensionnement des déversoirs anodiques de courant

Le dimensionnement des déversoirs anodiques de courant revient essentiellement à calculer la masse anodique nécessaire et la profondeur à laquelle seront implantées les anodes, en fixant comme objectif l'assurance d'une durée de vie prévue pour l'installation.

### 5.1.1. Calcul du nombre d'anodes nécessaire

Plusieurs méthodes ont été élaborées pour déterminer le nombre d'anodes nécessaire pour assurer la durée de vie prévue pour l'installation, utilisant l'intensité de courant que ces anodes doivent débiter, et leur consommation par ampère et par an.

#### a) Méthode basée sur la consommation des anodes

Suivant le type d'anodes utilisées on trouve différentes valeurs donnant la consommation. L'équation utilisée pour déterminer le nombre d'anodes est la suivante [ 1,7 ]:

$$N = I * C_{An} * D_{Vic} / M_u \quad ( 5 . 1 )$$

- N : Nombre d'anodes.  
 I : Intensité de courant de protection ( Ampère )  
 C<sub>an</sub> : Consommation du type d'anodes choisi ( kg / Ampère . an )  
 D<sub>vic</sub> : Durée de vie prévue pour les anodes ( an )  
 M<sub>u</sub> : Masse unitaire des anodes ( kg / anode )

#### b). Méthode basée sur la durée de vie des anodes sous une intensité de courant donnée :

Le tableau N° 4 recommande pour les anodes ferro - silicium - chrome et pour une durée de vie de 10 ans une intensité de courant "I" en ( ampère / anode ). En se basant sur ces données on peut calculer le nombre d'anodes nécessaires pour assurer une durée de vie avec plus de sécurité. [ 2 ]

Exemple : soit

- L'intensité de courant de protection est de 5 ampères.
- La durée de vie prévue pour ces anodes est de 20 ans.
- La consommation des anodes Fe - Si - Cr est de 0.4 kg / A . ans.
- Pour les mêmes anodes et pour une durée de vie de 20 ans le fournisseur d'anodes recommande une intensité de courant moyenne de 0.5 A / anode.

- N<sub>1</sub> = 4 anodes de M<sub>u</sub> 12.5kg calculé par la formule.  
 N<sub>2</sub> = 10 anodes de M<sub>u</sub> 12.5kg recommandé par le fournisseur.

Pour plus de sécurité il est préférable d'utiliser la seconde estimation.

### 5. 1.2. Calcul de la longueur et profondeur du déversoir

L'hypothèse de calcul est basée sur la diminution de la résistance du déversoir à la plus faible valeur possible pour éviter une tension trop élevée aux bornes du générateur de courant (économie d'énergie, sécurité du personnel, ...etc.), on admet comme très bonne une résistance de 1 ohm, une valeur de 2 à 3 ohms restant très acceptable. [ 1 ]

Pour assurer cette faible résistance au déversoir, il faut choisir l'emplacement des anodes à des zones de faible résistivité si cela est possible, sinon il faut bien choisir le type d'installation à mettre en œuvre.

Suivant le type d'installation choisi, la résistance du déversoir est calculée par les formules correspondantes citées au chapitre 4.

En fixant comme objectif d'abaisser la résistance du déversoir à de faibles valeurs, on peut déterminer les dimensions de ce dernier.

### 5. 2. Dimensionnement de la source d'énergie

Le dimensionnement du générateur de protection cathodique nécessite la détermination des paramètres nominaux tels que le courant et la tension de sortie. Ces derniers sont fixés avec une marge suffisante de sécurité par rapport à la tension et au courant réels de protection.

Si la valeur du courant de protection est directement issue des équations des télégraphistes, la tension du générateur est donnée par l'équation suivante [ 2,7 ] :

$$U = \frac{R_a \cdot I}{0.8} + 2 \quad ( 5.2 )$$

Où U : La tension à la sortie du générateur ( V )  
 R<sub>a</sub> : La résistance du déversoir ( Ω )  
 I : L'intensité de courant de protection ( A )

#### 5. 2.1. Transformateurs redresseurs

Les transfo - redresseurs destinés à débiter sur les anodes sont commercialisés à différentes puissances réglables jusqu'à des valeurs très élevées. En tenant compte des résultats de calcul de l'intensité du courant et de la tension de sortie, on peut fixer les caractéristiques du transfo - redresseur à utiliser, en appliquant un coefficient de sécurité. Ce dernier tient compte en particulier du vieillissement du revêtement, des défauts possibles et de l'augmentation de la consommation due à des adjonctions ou interconnexions. Afin d'assurer une longue durée de vie au transfo - redresseur on a intérêt à ne pas le faire fonctionner à sa puissance maximale. [ 13 ]

## 5. 2.2. Générateurs solaires

Le dimensionnement d'une installation photovoltaïque consiste en premier lieu à calculer le nombre de modules qu'on doit utiliser dans un panneau, ainsi que le nombre de batteries nécessaire afin d'assurer une autonomie au système pour un nombre estimé de jours non ensoleillés.

Pour pouvoir réaliser ces calculs, on doit connaître les données météorologiques sur l'ensoleillement à l'emplacement prévu pour les générateurs solaires, ainsi que l'intensité et la tension désirées à la sortie. [ 15 ]

Les étapes de calcul sont les suivantes :

1. Calcul de la consommation journalière de l'énergie électrique : Le besoin en énergie électrique par jour est donné par l'équation suivante:

$$C_J = I * 24 \quad ( 5.3 )$$

- $C_J$  : La consommation journalière ( Ampère heures / jour )  
 $I$  : L'intensité de courant de protection ( Ampères )  
 24 : Le nombre d'heures par jour ( heures / jour )

2. Calcul de l'énergie fournie par le module : La caractéristique essentielle d'un module est l'énergie qu'il peut fournir sous un ensoleillement donné. Une étude météorologique de l'emplacement prévu permettra de calculer ou estimer le nombre d'heures de pointe, qui est défini comme étant la durée d'ensoleillement moyenne en heures par jour pour les mois les moins ensoleillés. Ce nombre d'heures de pointe est calculé à partir des données d'irradiation de base relative au site d'installation. Il est d'environ 6.5 à 7.5 h / jour, pour la plupart des régions du sud algérien. [ 16 ]

L'énergie fournie par un module peut être calculée par l'équation suivante :

$$Q_{(réelle)} = h_p * I_M * 0.7 \quad ( 5.4 )$$

- $Q_{(réelle)}$  : énergie fournie par un module quand il débite à sa puissance maximale (Ah / J)  
 $h_p$  : nombre d'heures de pointe ( h / J )  
 $I_M$  : intensité de courant à la sortie du module dans les conditions de court circuit (A)  
 0.7 : C'est un coefficient de sécurité qui tient compte de la sécurité météo, du vieillissement du module, de l'influence salissure, et du coefficient d'intégration.

3. Calcul du nombre de modules nécessaire : Le nombre de modules est lié directement à la tension désirée à la sortie du générateur et à la consommation journalière d'énergie.

Suivant les caractéristiques du module choisi on doit mettre en série dans une branche un nombre de modules, qui nous permet d'avoir la tension d'utilisation aux bornes de générateur. [ 8 ]

Exemple : Si on utilise un module type PWP351 ( 2.17 A - 13.8V ), et si on veut avoir à la sortie une tension de 24V, on doit utiliser deux modules dans chaque branche figure - 23 -

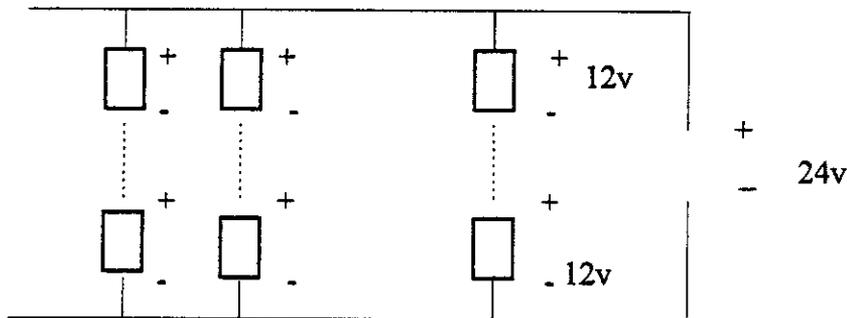


Figure - 23 - N modules type PWP351

Par contre si on utilise le PWP800 [ 1.9A - 32.8v ] et pour la même tension de sortie, on utilisera un module dans chaque branche ( figure 24 )

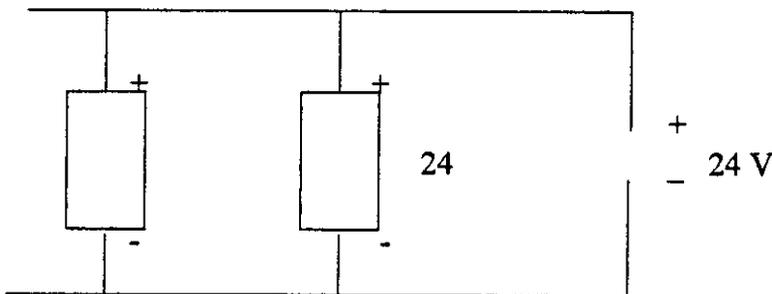


Figure - 24 - N / 2 modules type PWP 800

Le nombre de branches en parallèles dans un panneau pour avoir l'énergie journalière nécessaire est :

$$N_{br} = C_J / Q_{(réelle)} \quad ( 5.5 )$$

$N_{br}$  : Le nombre de branches en parallèles

$C_J$  : La consommation journalière ( A h / J )

$Q_{(réelle)}$  : L'énergie journalière délivrée par un module ( A h / J )

4. Calcul de la capacité et du nombre de batteries : La capacité totale des batteries est calculée en fonction du nombre de jours d'autonomie prévue pour le système. Pour assurer une autonomie de  $N_J$  jours (  $N_J$  ) nous avons : [ 15 ]

- L'énergie restituée par le système pendant les  $N_J$  est définie comme suit

$$E_r = N_m * N_J * Q_{(réelle)} * 0.4 \quad ( 5.6 )$$

Où :

- $E_r$  : énergie restituée ( A . h )
- $N_J$  : nombre de jours non ensoleillés ( Jours )
- 0.4 : représente le rendement minimal d'un module.
- $N_m$  : nombre de modules dans une branche.

- La capacité totale à prévoir avec une profondeur de décharge maximum de 30% est donnée au régime de C/100 comme suit : [ 15 ]

$$C_{bt} = ( N_J * C_J - E_r ) / 0.3 \quad ( 5.7 )$$

$C_{bt}$  : Capacité totale en ( A . h ).

0.3 : représente le taux de décharge maximale qui est fixé à 30% pour augmenter la durée de vie des batteries.

Le régime C/100 veut dire que la décharge se fait en 100h.

- Le nombre de batteries nécessaire est donc :

$$N_b = C_{bt} / C_b \quad ( 5.8 )$$

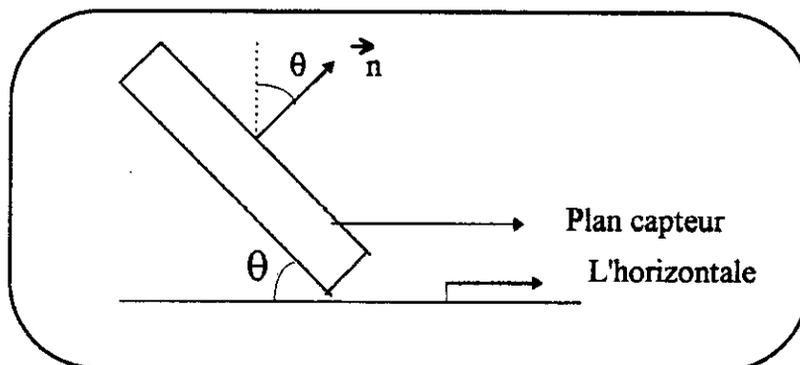
$C_{bt}$  : Capacité totale pour assurer une autonomie de  $N_J$  ( A . h ).

$C_b$  : Capacité d'une batterie ( A . h / batterie ).

5. Détermination de l'angle et de l'Orientation optimale du champ capteur : En énergie solaire, la connaissance de l'angle d'inclinaison d'un capteur solaire et son orientation est indispensable pour l'utilisation d'une installation quelconque.

En général l'angle "  $\theta$  " est compté entre la verticale au lieu et la normale sortante "  $\vec{n}$  " au plan capteur.

L'angle "  $\theta$  " ainsi que l'orientation ( qui ne peut être que plein sud ou plein nord ) sont définis sur la figure N° 25 suivante :



Plusieurs méthodes et formules ont été établies pour la détermination de l'angle d'inclinaison optimale et de l'orientation en fonction de la latitude du lieu considéré. La plus simple est celle qui est basée sur l'utilisation d'un diagramme circulaire et un disque (voir annexe III) qui a été mis au point pour déterminer un certain paramètre "  $\beta$  ", puis à l'aide d'un calcul simple, on peut déterminer l'inclinaison et l'orientation du panneau pour un lieu quelconque du territoire national. [ 15 ]

La méthode de l'utilisation de diagramme est la suivante : Il s'agit de

Repérer la latitude "  $\delta$  " exacte du lieu.

Lire la valeur de "  $\beta$  " en suivant les étapes suivantes :

- Centrer le disque sur le diagramme.
- Mettre la ligne de référence du disque en face de jour de début de la période de fonctionnement prévue pour le champ capteur, les périodes peuvent prendre effet au début d'un mois ou, le 15 de ce mois.
- Lire la valeur de paramètre "  $\beta$  " qui est indiquée sur le disque.

Calculer la valeur de l'angle optimal à partir de l'une des deux équations suivantes :

$$\text{- Période } \leq 4 \text{ mois} \quad \theta = (\beta / 10) + \delta - 20 \quad ( 5.9 )$$

$$\text{- Période } > 4 \text{ mois} \quad \theta = (\beta / 10) + 0.936 (\delta - 20) \quad ( 5.10 )$$

Déterminer l'orientation du champ capteur :

- Si la valeur de "  $\theta$  " est positive, le panneau doit être orienté plein sud.
- Si la valeur de "  $\theta$  " est négative, le panneau doit être orienté plein nord.

Remarque : Le fait de pouvoir, en un lieu donné, intervenir périodiquement sur l'inclinaison du champ capteur est économiquement très important. En effet, l'énergie collectée par un plan dont l'inclinaison est corrigée une fois tous les deux mois durant l'année, est supérieure de 40% à celle collectée par le même plan à inclinaison fixe durant la même période. Il serait donc préférable de réaliser des structures de soutien des panneaux qui permettent la correction d'angle. [ 15 ]

### 5. 3. Dimensionnement des câbles de liaison électrique

Pour éviter les interactions, l'utilisation des câbles à gaine métallique est déconseillée. La nature de l'isolant des câbles est déterminée suivant le milieu ( tenue en hydrocarbures, à l'eau de mer, au sol, ...etc ). Dans la plupart des cas un câble isolé au PVC est suffisant.

#### 5. 3.1. Dimensionnement des câbles ( conduite - générateur )

La distance minimale entre le déversoir et la conduite est de 100 mètre afin d'éviter l'influence anodique du premier sur la deuxième qui se traduit par une dépolarisation de cette dernière [ 13 ]. D'un autre côté, le générateur est installé généralement le plus près possible du déversoir de courant, il faut donc prévoir une longueur de câble ( conduite - générateur ) d'environ 110 mètres. Les sections des câbles sont déterminées en fonction de l'intensité du courant circulant ( tableau N° 5 ).

#### 5. 3.2. Le dimensionnement des câbles ( anodes - générateur )

Le montage des anodes doit être réalisé en parallèle, car en cas de défaut sur une anode, c'est seulement l'anode concernée qui ne fonctionnera pas et non pas tout le déversoir. Les câbles des anodes sont raccordés dans un coffret relié au générateur, la longueur de ces câbles sera calculée suivant le type d'installation des anodes.

Pour les déversoirs de profondeur, il faut prévoir un câble pour chaque anode, qui monte de l'anode jusqu'au coffret d'alimentation ( figure 26 ). [ 13 ]. La longueur totale de ces câbles peut être déterminée pour un puits par la formule suivante

$$L_{C.A} = (P_p - 1) n - n(n - 1) / 2 * e + 10(n + 1) \quad ( 5. 11 )$$

$L_{C.A}$	: longueur totale des câbles anodiques	( m )
$P_p$	: profondeur du déversoir	( m )
$n$	: nombre d'anodes	
$l$	: longueur d'une anode	( m )
$e$	: espacement tête à tête entre les anodes	( m )
$10(n+1)$	longueur du câble au-dessus du sol	( m )

Pour les déversoirs de surfaces ( figure 27 ): la longueur du câble anodique est calculée en fonction de la longueur de lit d'anode comme suit :

$$L_{C.A} = 2L + 10 \quad ( 5. 12 )$$

Où  $L$  : longueur de lit d'anode  
 10 : longueur du câble au-dessus du sol

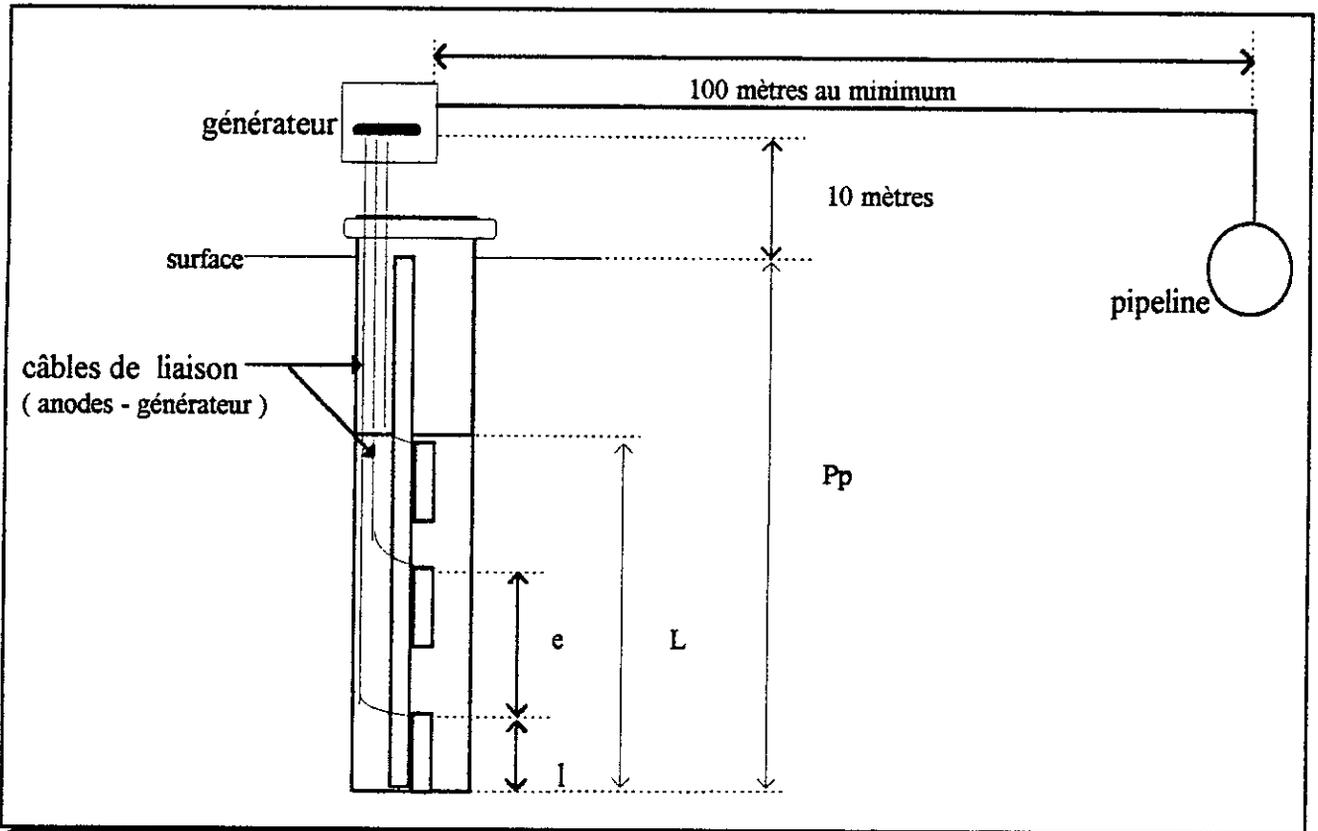


Figure - 26 - Schéma représentatif du câblage électrique dans le cas d'un puits

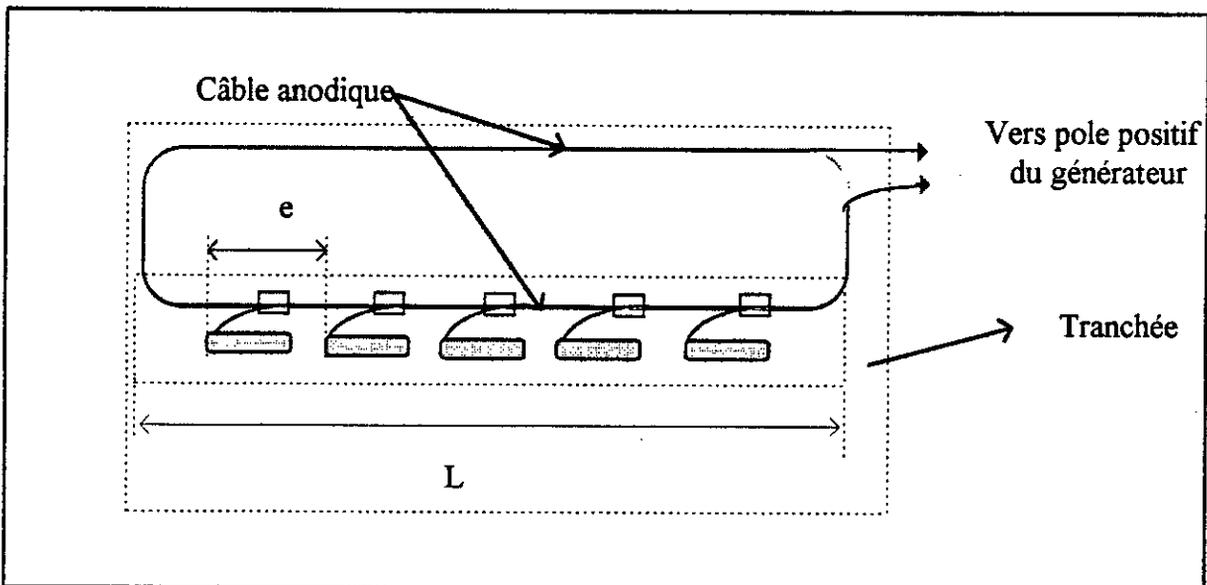


Figure - 27 - Schéma représentatif du câblage électrique dans le cas d'un lit

## 5. 4. Exemple de calculs

### Hypothèse de calcul :

- . Le déversoir doit débiter une intensité de 20 A .
- . La durée de vie prévue pour l'installation est de 10 ans.
- . On veut limiter la tension du générateur à 24 V.
- . La résistivité de sol mesurée à l'emplacement du déversoir est de 5000  $\Omega$  .m.
- . Les anodes utilisées sont les anodes Fe - Si - Cr.

### **Calcul du nombre d'anodes nécessaire**

Le fournisseur d'anodes recommande pour les anodes Fe - Si - Cr et pour une durée de vie de 10 ans, une intensité de :

1 A / anode de masse unitaire 12.5 kg .

2 A / anode de masse unitaire 23 kg.

Donc pour une intensité de 20 A et une durée de vie de 10 ans il faut

$$n_1 = 20 \text{ anodes de } M_u \text{ 12.5 kg}$$

$$n_2 = 10 \text{ anodes de } M_u \text{ 23 kg}$$

L'espacement tête à tête entre les anodes dans le déversoir, est le seul critère de choix entre les différentes dimensions d'anodes. Car dans le cas de faible espacement il y a naissance de phénomène d'interférence entre les anodes, qui fausse les résultats de calcul de la résistance du déversoir.

Un espacement compris entre 5 et 12 mètres est acceptable. [ 3 ]

### **Choix de type d'installation du déversoir**

La valeur de résistivité du sol (5000  $\Omega$  . m ) ne permet pas d'utiliser un déversoir de surface ce qui nous oblige à réaliser un déversoir de profondeur. Où toute la colonne d'anodes doit être noyée dans l'eau issu du puits foré dans la nappe phréatique. La résistivité au niveau de la nappe phréatique est beaucoup moins importante de 80  $\Omega$ .m. Il faut également utiliser un mélange régulant.

. Résistance du déversoir : Pour limiter la tension de générateur à 24 V, il faut avoir une résistance très faible qui est calculée comme suit :

$$R_a = \frac{(U - 2) * 0.8}{I}$$

pour  $U = 24 \text{ V}$  et  $I = 20 \text{ A}$        $R_a = 0.88 \Omega$

La profondeur du déversoir : Pour ce type de déversoir on a

$$R_a = \frac{\rho}{2 * \Pi * L} \left( L n \frac{8 * L}{d} - 1 \right)$$

Où : L est la longueur de la colonne d'anodes.

d est le diamètre du déversoir, il est de l'ordre de 0.3 à 0.4 m.

$\rho$  est la résistivité du sol ( 80  $\Omega \cdot m$  ).

Par itération on trouve que pour  $R_a = 0.88 \Omega$  il faut que la longueur de la colonne d'anodes soit de 102 m. Le niveau hydraulique de la nappe phréatique est estimé à 30 m de la surface, soit une profondeur totale du déversoir de

$$P_p = 132 \text{ m}$$

L'espacement tête à tête entre les anodes dans la colonne d'anode est calculé comme suite :

$$e = (L - l) / (n - 1)$$

l : longueur d'une anode ( 1.525 m ).

n : nombre d'anodes.

Si on utilise 20 anodes de  $M_a$  12.5 kg l'espacement entre anodes serait de 5.28 m.

Par contre, si on utilise 10 anodes de  $M_a$  23 kg l'espacement sera de 11.16 m.

Dans ce cas l'utilisation des deux types d'anodes est justifiée.

## Calcul du générateur solaire

### Hypothèse de calculs

- Il nous faut un générateur de puissance ( 20 A et 24 V ).
- Le nombre d'heures de pointe à l'emplacement du panneau a été estimé à ( 7 h / J ).
- Les modules utilisés ont les caractéristiques suivantes  
puissances de 120 Wc par module [  $I_M = 3.5 \text{ A}$  et  $V = 24 \text{ V}$  ]
- Les batteries utilisées ont les caractéristiques suivantes  
capacité et tension pour chaque batterie [  $C_b = 100 \text{ Ah}$  et  $V = 24 \text{ V}$  ].

La consommation journalière :

$$C_J = I * 24$$

$$C_J = 480 \text{ Ah / J}$$

L'énergie journalière fournie par module :

$$Q_{(réelle)} = h_p * I_M * 0.7$$

$$Q_{(réelle)} = 17.15 \text{ Ah / J}$$

Le nombre de branches en parallèle :

$$N_{br} = C_J / Q_{(réelle)}$$

$$N_{br} = 28 \text{ branches}$$

Le nombre de modules en série dans une branche est : 1 module (24 v)

Le nombre de modules total :

$$N_m = 28 \text{ modules}$$

Capacité des batteries pour assurer une autonomie au système de 4 jours :

L'énergie restituée pendant les 4 jours :

$$E_r = N_m * N_J * Q_{(réelle)} * 0.4$$

$$E_r = 768.32 \text{ Ah}$$

La capacité totale à prévoir avec une profondeur de décharge maximale de 30% est

$$C_{bt} = ( N_J * C_J - E_r ) / 0.3$$

$$C_{bt} = 1151.68 \text{ Ah}$$

Le nombre de batteries nécessaire :

$$N_b = C_{bt} / C_b$$

$$N_b = 12 \text{ batteries}$$

**PARTIE III**

**ETUDE D'UN CAS PRATIQUE**

***DE PROTECTION D'UN OUVRAGE AU MOYEN DE  
GENERATEURS SOLAIRES ET DE  
TRANSFORMATEUR - REDRESSEURS***

## 1. Données de l'étude

### 1.1. Présentation de l'ouvrage à protéger

Le cas pratique qui nous a été proposé à l'étude est une conduite dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Type d'ouvrage : Oléoduc
- Matériau : Acier
- Longueur totale : 300 km
- Diamètre extérieur : 0.762 m
- Epaisseur des tubes : 10.31 mm
- Surface à protéger : 718168.08 m<sup>2</sup>
- Résistance linéaire de la conduite :  $7.6 * 10^{-6} \Omega / m$
- Résistance d'isolement (pour 20 ans) : 8000  $\Omega.m^2$ .
- Résistance d'isolement au mètre linéaire : 3341.8  $\Omega.m$

### 1.2. Résultats de l'étude du tracé

#### a)- Les points spéciaux

Les points spéciaux sont des points le long du tracé où des mesures complémentaires concernant la protection cathodique doivent être prises. L'étude du tracé révèle l'existence des points spéciaux suivants :

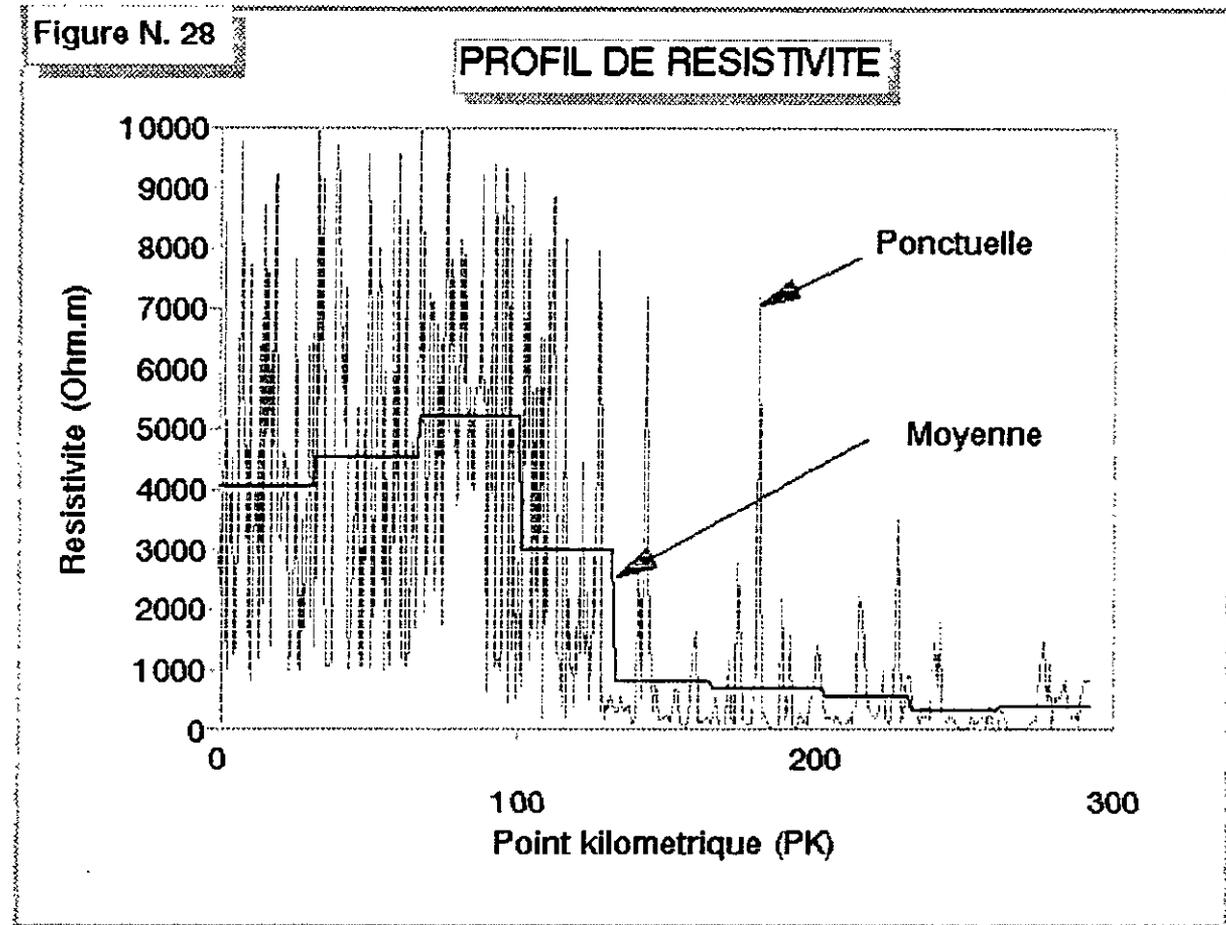
L'existence d'un croisement avec une ligne de distribution de l'énergie électrique au niveau du point kilométrique ( PK ) 255.67.

La conduite traverse des routes au niveau des PK 150 et 265.

Des croisements avec d'autres structures métalliques enterrées sont observés au PK 15 et 295.

### b)- Profil de résistivité

La mesure de la résistivité électrique du sol le long du tracé a été effectuée par la méthode des 4 terres, les résultats de cette opération sont représentés sur la figure N° 28 :



### c)- Interprétation des résultats de l'étude de tracé

On remarque à partir des valeurs de la résistivité qu'on peut diviser le tracé de la conduite en deux grande parties :

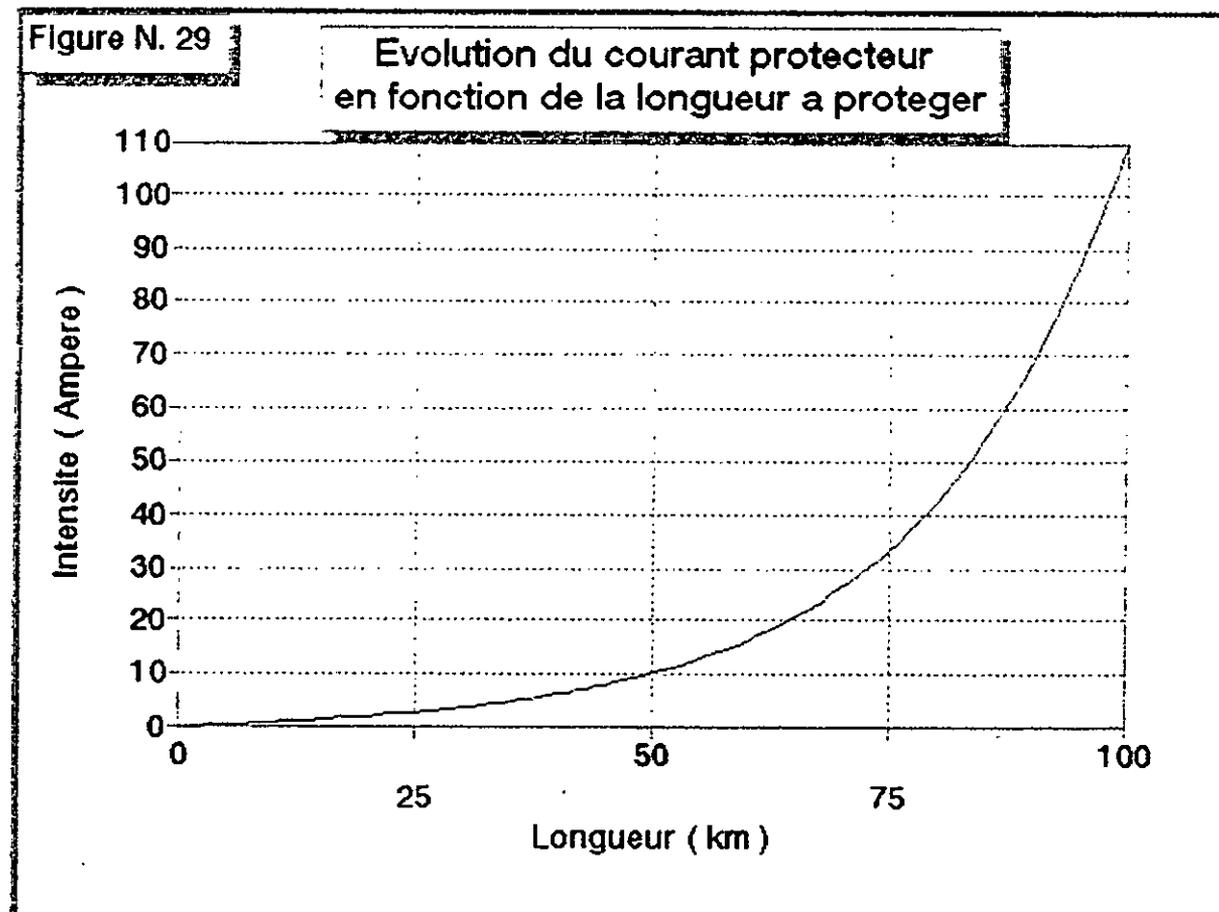
- Dans la première partie [ PK 0 , PK 130 ], on trouve des valeurs très élevées de la résistivité du sol où l'utilisation des déversoirs de surfaces parait impossible.
- Dans la seconde partie [ PK 135 , PK 300 ], la résistivité est assez faible ce qui favorise l'utilisation des déversoirs de surfaces.
- L'existence d'une ligne électrique basse tension au Point kilométrique 255.67 permet l'utilisation d'un transformateur - redresseur à ce niveau.
- L'existence de traversées de routes au PK 150 et 265 exige l'utilisation des gaines de protections mécanique à ces niveaux.
- Une attention particulière doit être portée pour les PK 15 et 295, où l'existence des croisements avec d'autres structures métalliques enterrées a été notée.

## 2. Considérations générales concernant l'évolution des paramètres de protection le long de l'ouvrage longiforme

La conception et le dimensionnement des systèmes de protection cathodique pour les structures longilignes (pipeline) sont basés sur les équations mathématiques des télégraphistes, qui donnent l'intensité et le potentiel nécessaires à la protection. Ces derniers dépendent essentiellement de la longueur protégée et de la résistance transversale de l'enrobage.

### 2.1. Evolution de l'intensité de courant de protection en fonction de la longueur à protéger

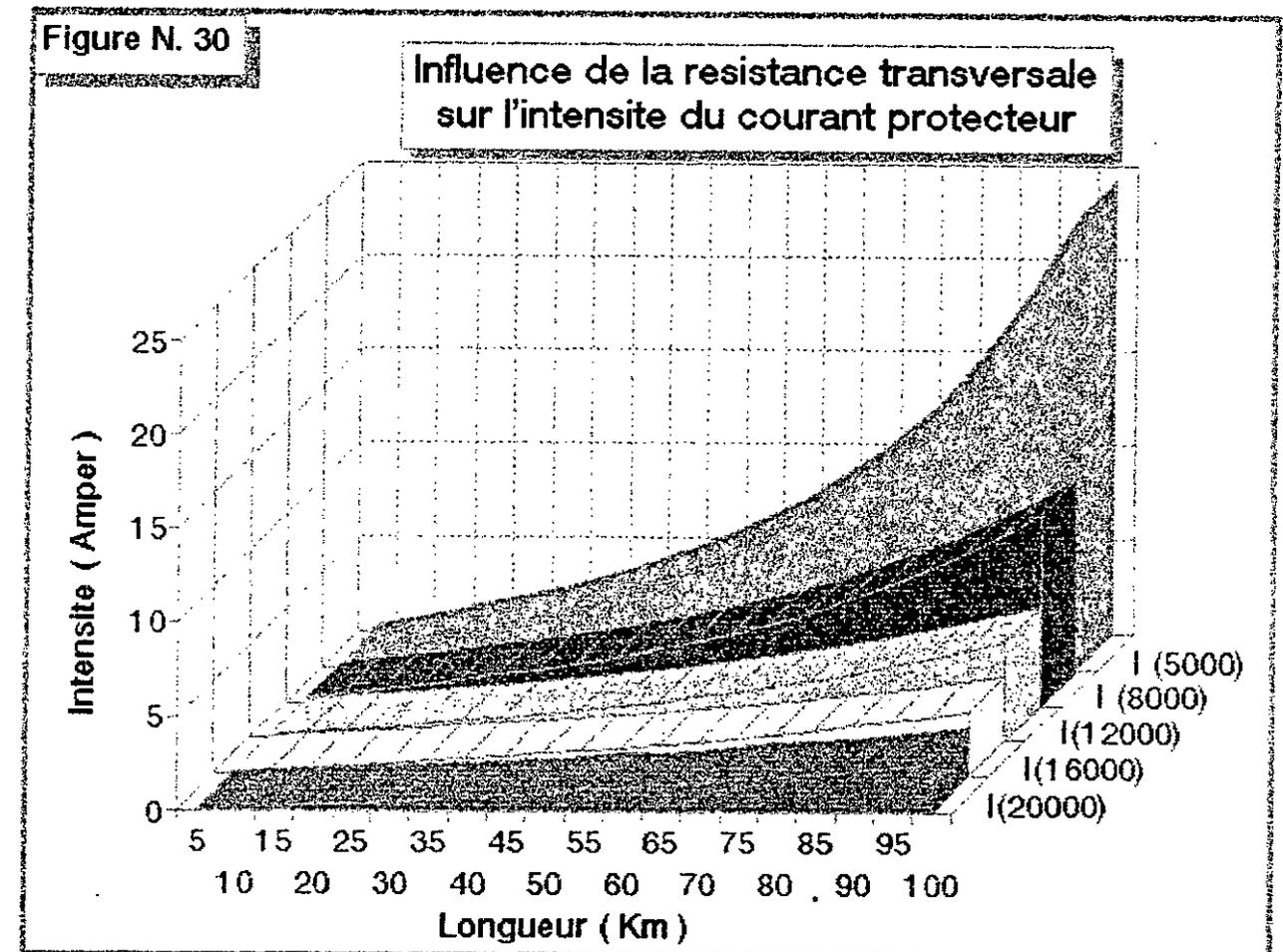
Le besoin en courant de protection pour la conduite est calculé pour différentes longueurs, les résultats de calculs sont représentés sur la figure suivante :



On remarque que la fonction  $I = f(L)$  varie d'une façon exponentielle, ce qui nous permet de noter que si, par exemple, un poste débitant 10 Ampères protège 50 km, ce même poste débitant 20 Ampères ne protégera pas 100 km, mais une longueur inférieure du fait de l'atténuation exponentielle.

## 2.2. Influence de la résistance transversale sur l'intensité du courant de protection

La figure N°30 représente l'évolution de l'intensité du courant de protection en fonction de la longueur protégée avec différentes qualités de revêtements exprimées par la valeur de la résistance transversale du mètre carré de conduite. En effet, nous considérons des revêtements de 5000, 8000, 12000, 16000 et 20000 Ohm-mètre carré :



### Discussion :

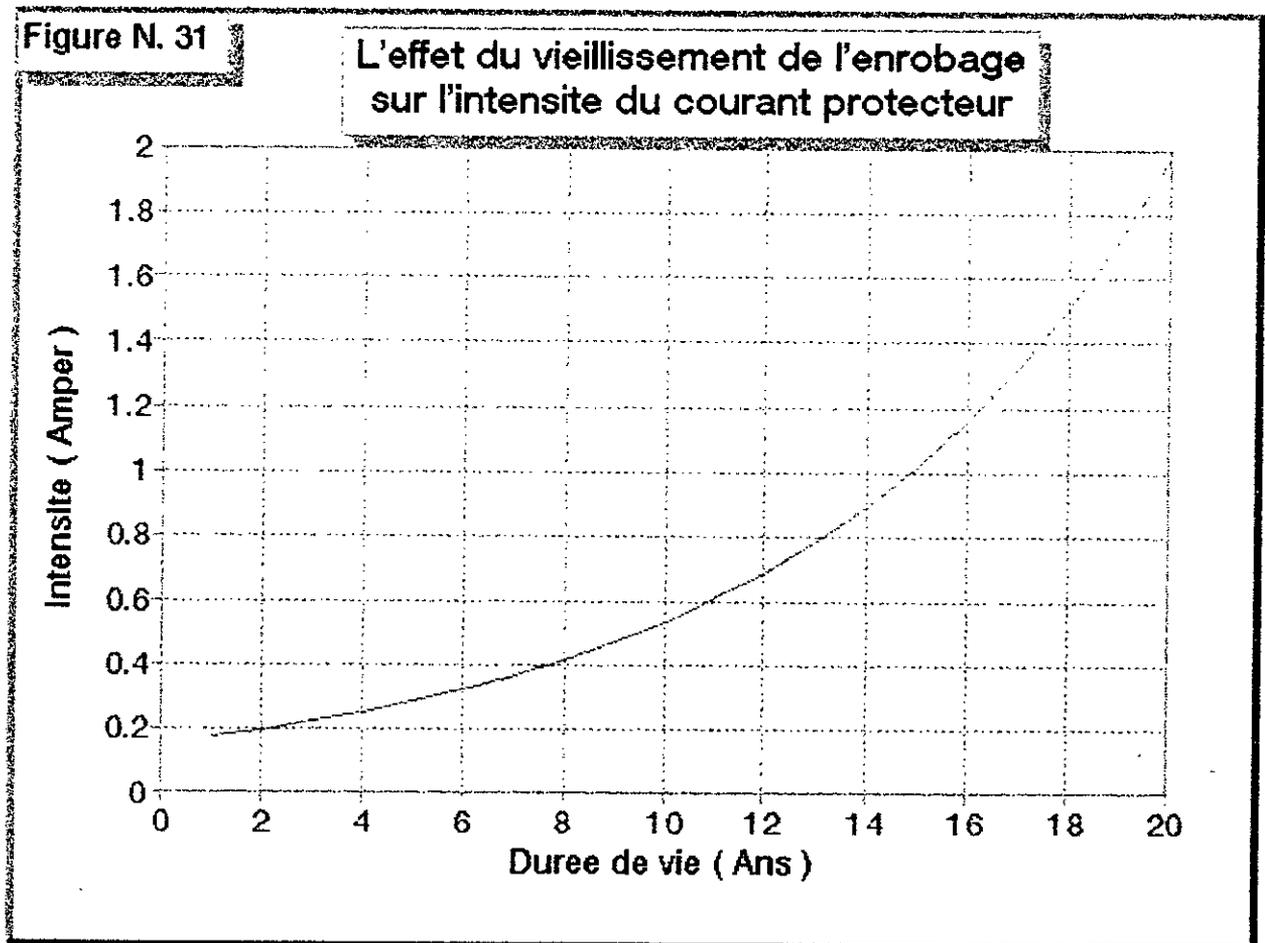
On remarque que l'intensité du courant de protection, pour une même longueur, varie inversement avec la résistance d'isolement. On peut dire donc que pour assurer la protection d'une conduite avec le minimum d'énergie électrique, il faut veiller à ce que le revêtement soit de bonne qualité et qu'il soit mis en oeuvre de manière correcte.

Le revêtement vieillit dans le temps, la résistance de l'isolement diminue et le besoin en courant de protection augmente, la diminution de la résistance d'isolement en fonction du temps est donnée par l'équation suivante : [ 14 ]

$$R = R_0 * \exp (-B * \tau)$$

- Où  $\tau$  : Temps d'exploitation ( ans ).  
 $R_0$  : Résistance d'isolement initiale au mètre carré ( $\Omega \cdot m^2$ ).  
 $B$  : Coefficient caractérisant la vitesse de changement de résistance d'isolement en fonction du temps variant entre 0.125 à 0.116 ( $ans^{-1}$ ).

La figure N° 31 montre la variation du courant de protection avec le vieillissement de l'enrobage avec le temps pour un coefficient B de 0,125.



On remarque que le vieillissement de l'enrobage pendant le temps d'exploitation de l'ouvrage, a comme effet d'augmenter le besoin en courant de protection.

### 2.3. Evolution du potentiel le long d'une conduite sous protection cathodique

L'abaissement du potentiel d'une conduite protégée au-dessous d'une certaine valeur entraîne la formation excessive de l'hydrogène ayant pour conséquence le décollement de l'enrobage et l'annulation de l'effet de protection. L'hydrogène monoatomique peut aussi pénétrer dans le métal et provoquer sa fragilisation.

Les spécialistes de la protection cathodique suggèrent, par expérience, la valeur limite de  $-2.5 \text{ V}$  [ 2 , 3 , 17 ], en dessous de laquelle il est déconseillé de porter le potentiel tube/sol afin d'éviter les problèmes de perte d'adhérence.

Le plus bas potentiel d'une conduite protégée se trouve au point d'injection, il peut être calculé par l'équation suivante :

$$E_p = E_N + E$$

Où  $E_p$  : potentiel au point d'injection d'une conduite protégée ( V )  
 $E_N$  : potentiel naturel d'une conduite enterrée dans le sol ( V )  
 $E$  : potentiel d'injection ( V )

Nous avons calculé les potentiels de la conduite au point d'injection, lorsqu'elle est sous protection en fonction de la longueur protégée, en se basant sur les données suivantes qui sont :

. Le potentiel naturel d'une conduite en acier ( revêtu ) enterrée dans le sol se situe entre  $-0.4$  et  $-0.7 \text{ Volt}$  [ 1,2,3 ], on prend comme valeur moyenne  $E_N = -0.55 \text{ volt}$  ( Cu /  $\text{CuSO}_4$ ).

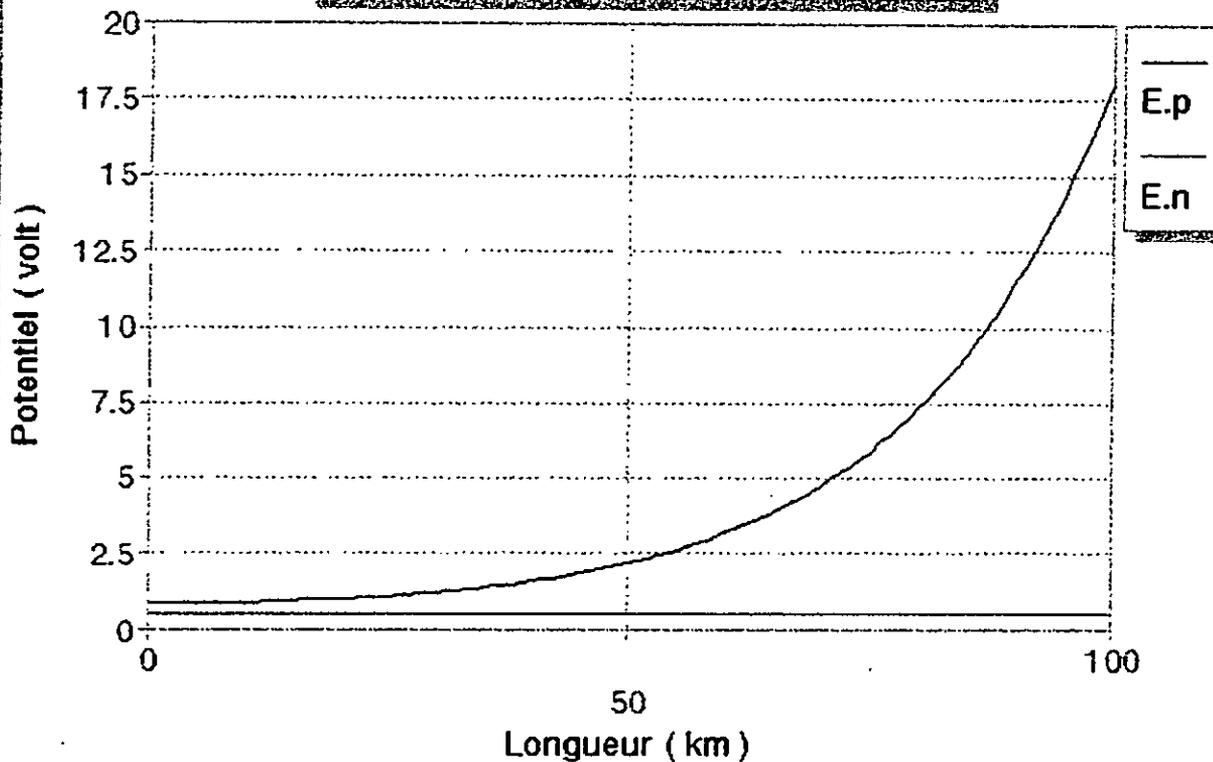
. Le potentiel d'injection est donné par les télégraphistes en fonction de la longueur protégée :

$$E = E_0 \text{ ch} ( \alpha * L )$$

Les résultats du calcul sont représentés sur la figure N° 32 où les potentiels sont donnés en valeurs absolues :

Figure N. 32

### Evolution du potentiel de la conduite en fonction de la longueur protégée



On remarque sur cette figure que dans notre cas, la longueur maximale qu'on peut protéger par un poste sans dépasser la valeur limite du potentiel ( 2.5 v ) est d'environ 50 km. Cette longueur est liée directement aux caractéristiques de la conduite (diamètre, épaisseur, résistance transversale, ...etc.).

Vu l'évolution du potentiel le long d'une conduite, il est judicieux de placer le point d'injection de courant au milieu, afin d'assurer une portée de protection plus importante.

Dans ce cas la répartition du potentiel le long de la conduite est représentée sur la figure N° 33 où  $b$  : représente le bras de protection maximum.

$E$  : représente le potentiel de la conduite protégée ( Cu / CuSO<sub>4</sub> ).

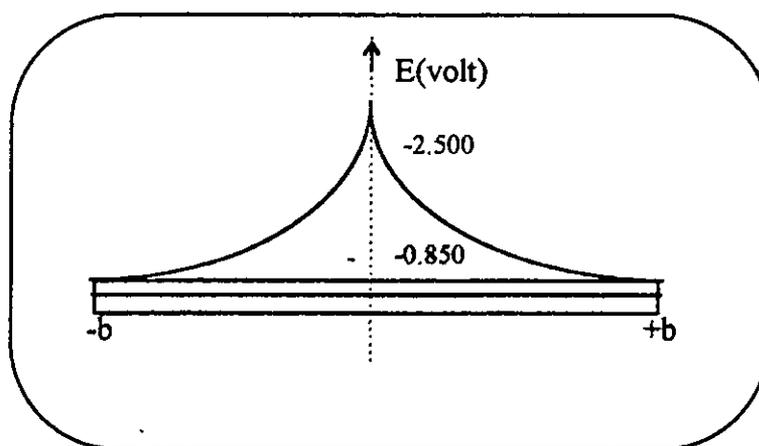


Figure N° 33 : Evolution du potentiel le long de la portée de protection.

Dans le cas des conduites longilignes, il faut prévoir un certain nombre de points d'injections (postes de soutirages de courants) répartis sur toute la longueur de façon à assurer le seuil de protection en tout point de la conduite ( figure 34 ).

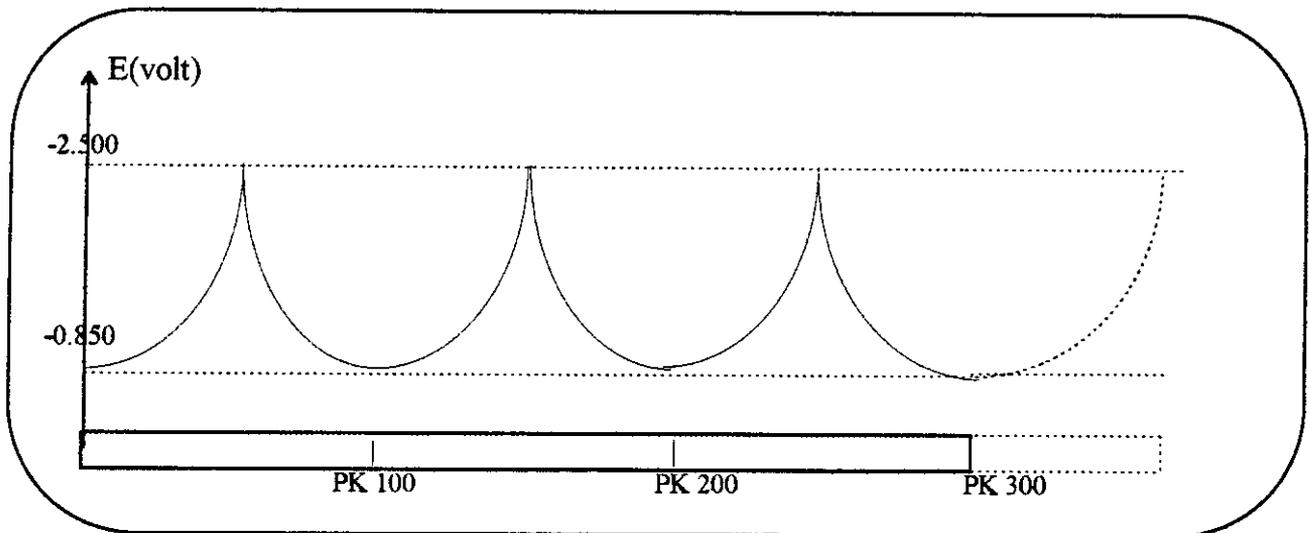


Figure - 34 - Répartition du potentiel le long d'une conduite protégée

### 3. calcul de la portée de protection assurée par le transformateur redresseur

La portée maximale des transformateurs redresseurs n'est fonction que des caractéristiques de la conduite. Cette portée est calculée de façon à ce que le potentiel de la conduite au point d'injection ne dépasse pas la valeur limite qui est de - 2.500 v.

Le potentiel d'injection est donné comme suit

$$E = E_0 \operatorname{ch}(\alpha * L) \Rightarrow L = (1/\alpha) \operatorname{sh}^{-1}(E/E_0)$$

Où L : longueur du bras de protection.( m )

E : potentiel d'injection. ( v )

$E_0$  : abaissement du potentiel à la limite du bras de protection.( v )

$\alpha$  : facteur d'atténuation est de  $47.6 * 10^{-6} \text{ m}^{-1}$

soit  $E_N$  le potentiel naturel de la conduite dans le sol

on admet comme valeur moyenne  $E_N = - 0.550 \text{ v}$

En appliquant les conditions aux limites

- La valeur minimale du potentiel que peut avoir la conduite au point d'injection est de -2.500 v.
- La conduite se trouve déjà à un potentiel de - 0.550 v , le potentiel d'injection maximum devient donc :

$$E = - 2.500 - (- 0.550) = -1.950 \text{ V}$$

- La valeur maximale de potentiel d'une conduite protégée est de - 0.850 v, l'abaissement du potentiel qu'on doit assurer à la limite du bras de protection devient donc :

$$E_0 = - 0.850 - (-0.550) = - 0.3 \text{ v} .$$

La longueur maximale du bras de protection est donc :

$$L = 53760 \text{ m soit une portée de } 107520 \text{ m}$$

L'emplacement du poste de soutirage à transfo - redresseur se situe à 44330 m de l'extrémité de la conduite. Par mesure d'efficacité, ce poste doit avoir deux bras de protection de même ordre de grandeur de part et d'autre.

On peut donc protéger par ce poste une portée de 90000 m, avec d'une part un bras de 44330 m et d'autre part un bras de 45670 m.

#### **4. Optimisation des portées des postes de soutirage à générateurs solaires**

Le transfo - redresseur assure la protection d'un tronçon de la conduite, le reste sera protégé à l'aide des générateurs solaires.

L'optimisation de la répartition de ces derniers découle d'une étude technico - économique.

##### **4.1. Position du problème**

Notre recherche dans le domaine du solaire a montré que l'inconvénient technique majeur des modules solaires est leur faible puissance. A ce jour, le module le plus performant donne à la sortie une puissance de 120 Wc, avec une intensité de 3.5 A et une tension de régime de 30V. La protection de grande surface de conduite nécessite donc un très grand nombre de modules, ce qui alourdi le budget de la protection cathodique.

Notre travail d'optimisation consiste à minimiser le coût de la protection par soutirage électro-solaire. Suivant les valeurs de résistivité, deux cas peuvent se présenter.

Un premier cas : Où les résistivités ne permettent pas l'utilisation de déversoirs de surfaces, nous étudierons donc les coûts de réalisation du couple générateur solaire - puits anodique.

Un second cas : où il est possible de trouver des points à faible résistivité, qui permettent l'implantation de déversoirs de surfaces, nous étudierons donc les coûts de réalisation du couple générateur solaire - lit anodique.

##### **4.2. Optimisation de l'utilisation du couple générateur solaire - puits anodique**

L'objet de cette étude technico - économique est de déterminer la portée optimale de l'utilisation du couple générateur solaire - puits anodique, en calculant le coût total de la protection de l'ouvrage pour différentes portées.

En faisant varier la portée des postes de 5000 m à 100000 m, le nombre et la puissance des postes nécessaires à la protection de toute la conduite changeront. Par conséquent le coût de la protection variera également. Les puits anodiques seront plantés comme des clous dans la nappe phréatique que l'on considère comme étant à une profondeur de 50 m le long de tout le

tracé. La longueur utile du déversoir sera noyée dans l'eau du puits issu du forage au niveau de cette nappe.

Programme de calcul :

Etant donnée le grand nombre de paramètres à traiter, il a fallu établir un programme de calcul partant des éléments suivants :

- La résistivité du sol le long du tracé est élevée.
- La résistivité de l'eau au niveau de la nappe phréatique est très faible. Par mesure de sécurité le dimensionnement des postes se fait avec une valeur de 80  $\Omega$ . m.

- Les anodes utilisées sont de type Fe - Si - Cr de

Masse unitaire	$M_a = 23 \text{ kg}$
Longueur	$l = 1525 \text{ mm}$
Diamètre	$d_a = 38.1 \text{ mm}$

- La méthode de dimensionnement des générateurs utilisée nécessite la connaissance de l'irradiation solaire journalière au cours du mois le moins ensoleillé, afin de pouvoir déterminer le nombre d'heures de pointe. Ce paramètre varie suivant l'emplacement prévu, dans notre cas on prend comme valeur moyenne  $h_p = 6.5 \text{ h / J}$ .

- Le calcul de la capacité des batteries va être fait de manière à assurer au système une autonomie de 4 jours.

- Les modules utilisés ont des puissances de 120 wc ainsi qu'une tension nominale de 30 V.

- Les batteries utilisées ont des capacités de 100 Ah et une tension de 24 V par batterie.

- Afin de limiter le nombre de modules on a fixé la tension de sortie à 24 V.

- Pour augmenter la durée de vie du système, on a choisi de faire tout les calculs de manière à ce que le système fonctionne au 2 / 3 de sa tension nominale c'est à dire à une tension de 16 V.

- Les prix unitaires du matériel utilisé sont : [ 11,13,18 ]

Modules solaires                      45 FF / Watt. crête

Batterie solaires                      900 FF / Kwh

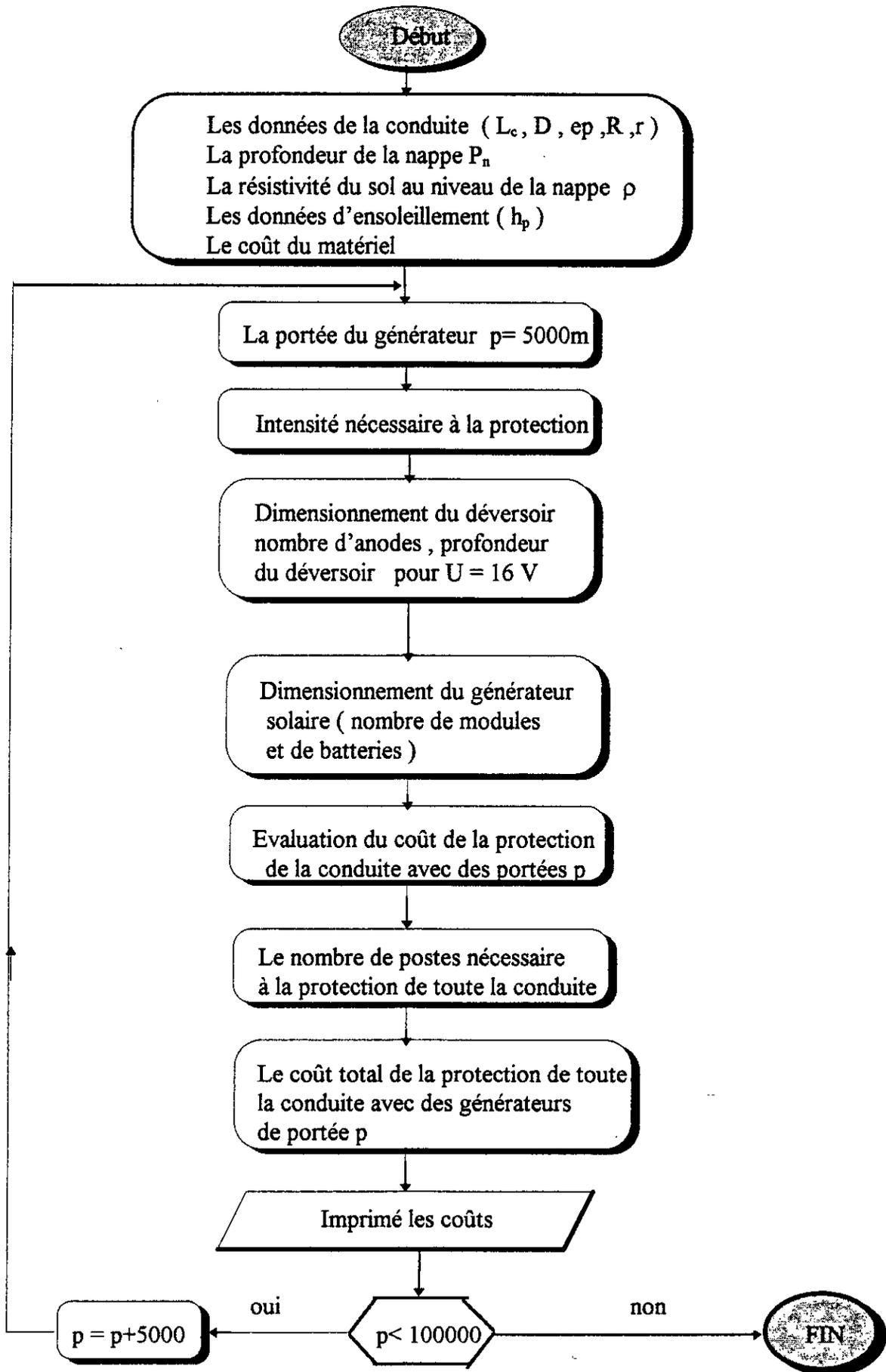
Anodes Fe - Si - Cr                    500 FF / anodes de Mu 23 kg

Forages                                    2500 FF / m en moyenne avec un minimum de 1000 FF pour les faibles profondeurs et une augmentation moyenne de 10 FF / m avec la profondeur.

Backfill                                    945.3 FF / tonne (poussière du coke)

Câbles                                      2.93 FF / m pour des câbles de section 10 mm<sup>2</sup>  
 14.64 FF / m pour des câbles de section 50 mm<sup>2</sup>

L'organigramme simplifié du programme de calcul est le suivant



Le programme a permis de calculer le coût de protection de l'ouvrage à des portées différentes ainsi que la répartition du coût total sur les éléments du système. Les résultats sont représentés sur les figures N° 35 et 36 :

Figure N. 35

Optimisation de la portée de protection des générateurs solaires à 24 V

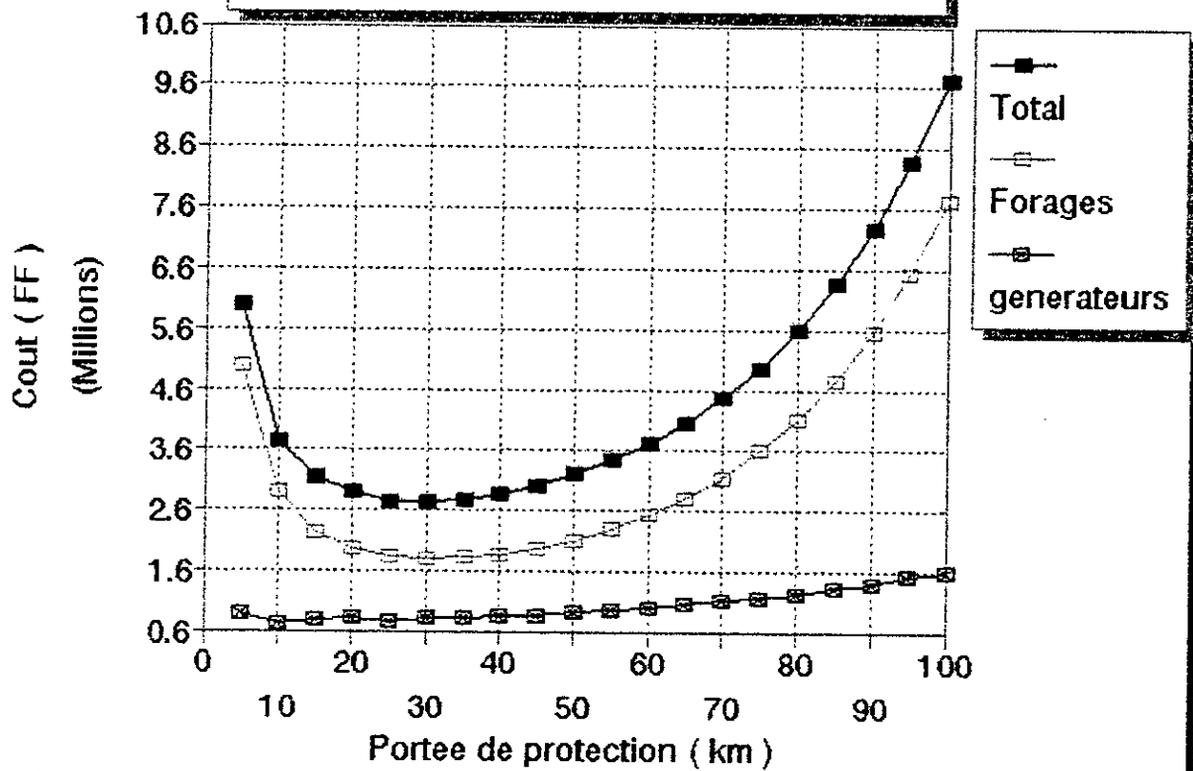
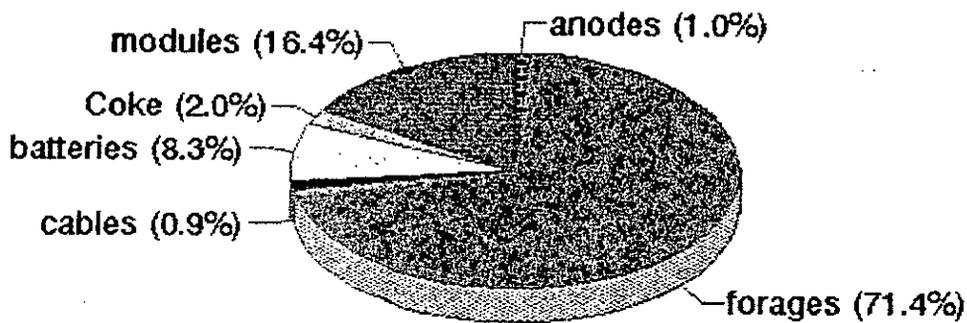


Figure N. 36

Repartition du cout de la protection sur ses differents composants (G24)



On remarque que le coût minimum de la protection de la conduite par des couples générateurs solaires - puits anodique correspond à une portée de 30 km par poste. C'est à dire que le bras de protection optimal de chaque générateur est de 15 km.

Ce résultat est obtenu en utilisant des déversoirs de profondeurs et des tensions de générateurs de 24 V où le coût du forage représente 71.4 % du coût total de la protection. Pour diminuer l'influence du coût de forage, en diminuant la profondeur des déversoirs, on est amené à augmenter la tension à la sortie des générateurs ce qui augmente le nombre d'éléments en série dans une branche.

Pour trouver la solution optimale entre ces différents choix, on doit étudier l'évolution du coût en fonction de la portée de protection, en utilisant des générateurs solaires avec des tensions de sortie de 48 V.

En utilisant le même programme cité précédemment avec les modifications suivantes :

- La tension maximale à la sortie des générateurs est fixée à 48 V, en prenant le même facteur de sécurité utilisé précédemment, on doit dimensionner le système par rapport à une valeur de 32V.
- Les modules MSX 120 ont des tensions de régime de 30V, ce qui nous amène à utiliser deux modules en série dans chaque branche.

Le programme a permis de calculer le coût total de la protection de l'ouvrage à des portées différentes pour une tension de sortie des générateurs à 48 V ainsi que la répartition du coût total sur les différentes charges. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures N° 37 et 38 :

Figure N. 37

Optimisation de la portee de protection des generateurs solaires a 48 V

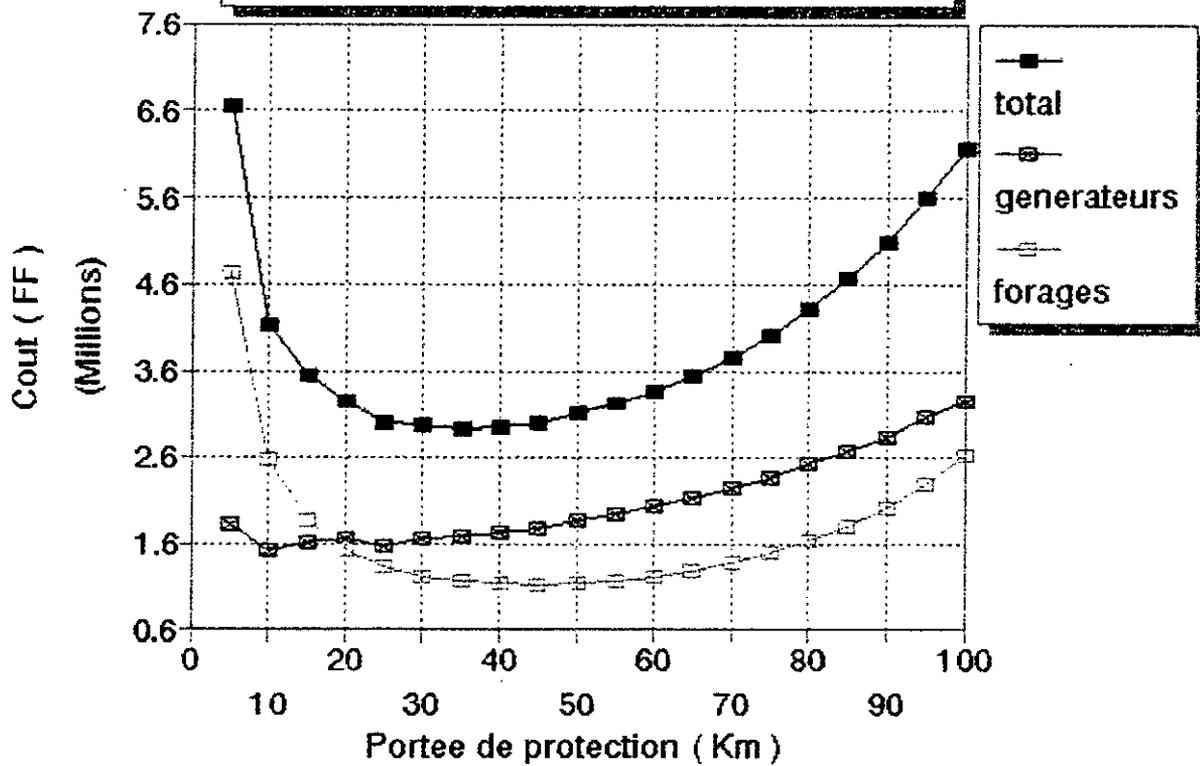
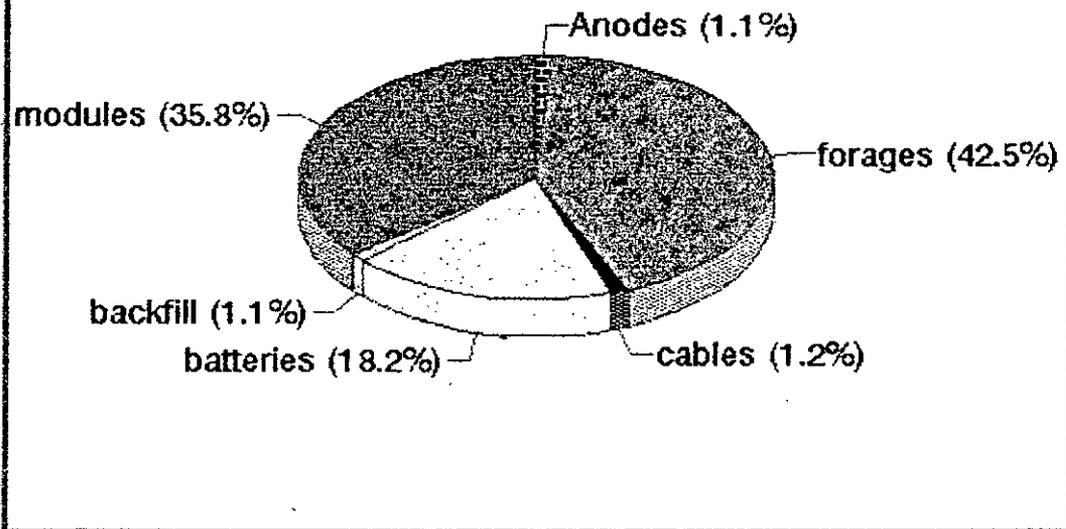


Figure N. 38

Repartition du cout de la protection sur ses differents composants (G48v)

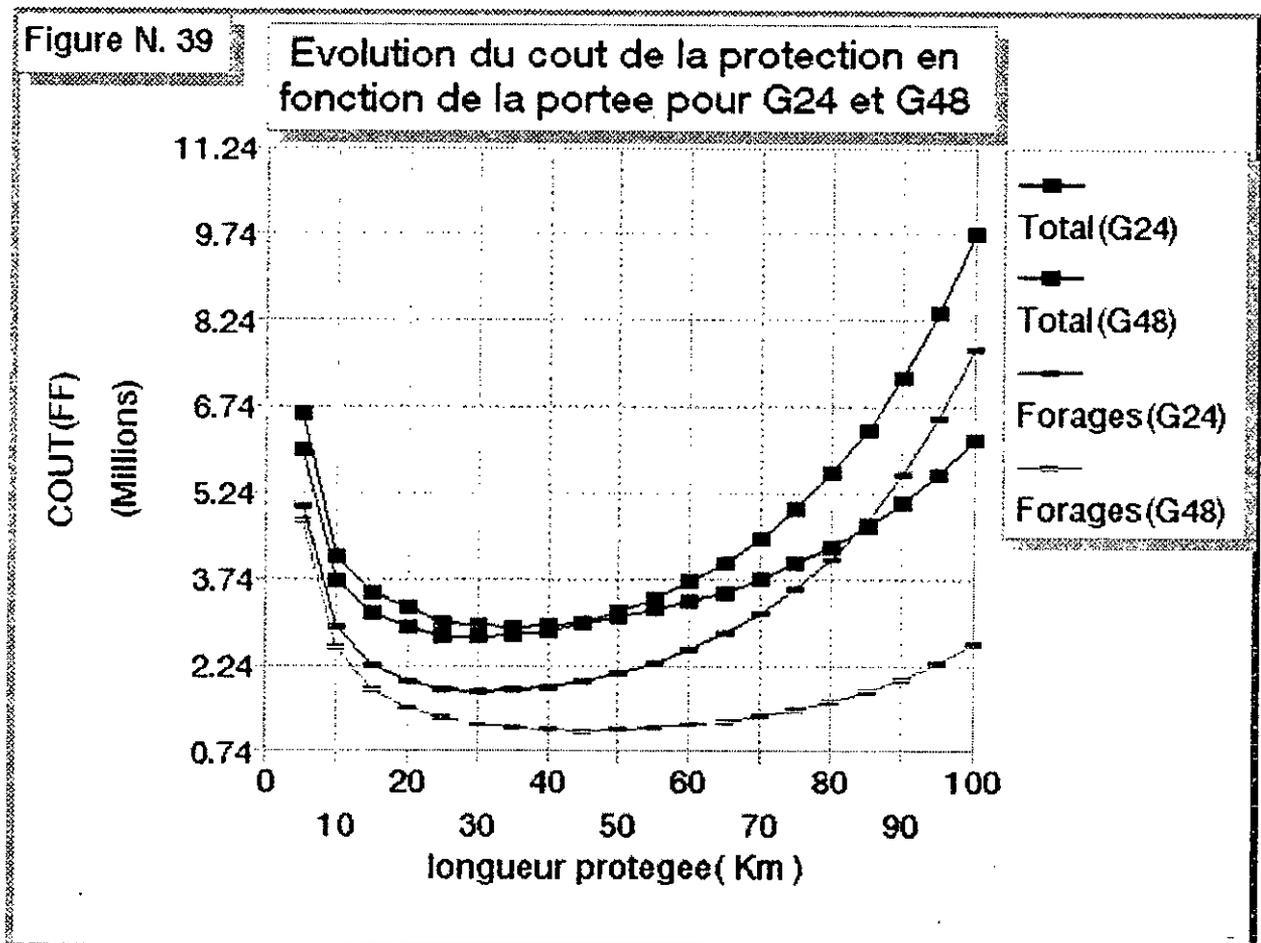


- A partir de la figure N° 37, on remarque que le coût optimal de la protection de la conduite par des générateurs de 48 V correspond à une portée de 30 à 40 km.

- On remarque à partir de la figure N° 38, que le coût du forage a diminué, mais celui des générateurs solaires devient excessif.

La portée optimale correspondante au coût minimum de la protection peut être déterminée en comparant les deux courbes ( 35 et 37 ). Ces courbes représentent l'évolution du coût de la protection, en fonction du bras de protection, en utilisant respectivement des générateurs à 24 V et à 48 V de tensions de sorties.

La comparaison entre ces deux courbes est représentée sur la figure N°39 :



On remarque que pour les grandes portées de protection l'utilisation des générateurs de 48 V est la moins coûteuse. Mais le coût minimum possible est obtenu en travaillant avec des générateurs de 24 V à des portées de 30 km par poste.

On peut dire donc que la tension optimale de l'utilisation des générateurs solaires dans la protection cathodique est de 24 V avec des portées de 30 km par poste.

Le résultat obtenu reste valable tant que les modules ne peuvent pas fournir des tensions supérieures de 24 V. Car même si l'utilisation des générateurs à 48 V permet la réduction de la profondeur des déversoirs, elle double le nombre de modules et de batteries ce qui revient trop chère.

### 4.3. Optimisation de l'utilisation du couple générateur solaire - Déversoir horizontal

Lorsque la résistivité électrique du sol est assez faible et dans des zones libres ( zones non habitées, disponibilité des terrains,...etc), il est préférable de point de vue économique d'utiliser des déversoirs horizontaux communément appelés lits anodiques.

Le coût des modules, de batteries, d'anodes, de câbles, et du backfill représente la plus grande partie du coût total de la protection.

Dans le but de déterminer la portée optimale des postes de soutirages électrosolaires, on a refait le dimensionnement en utilisant :

Des générateurs solaires à 24 V  
Des déversoirs de surfaces le long du tracé

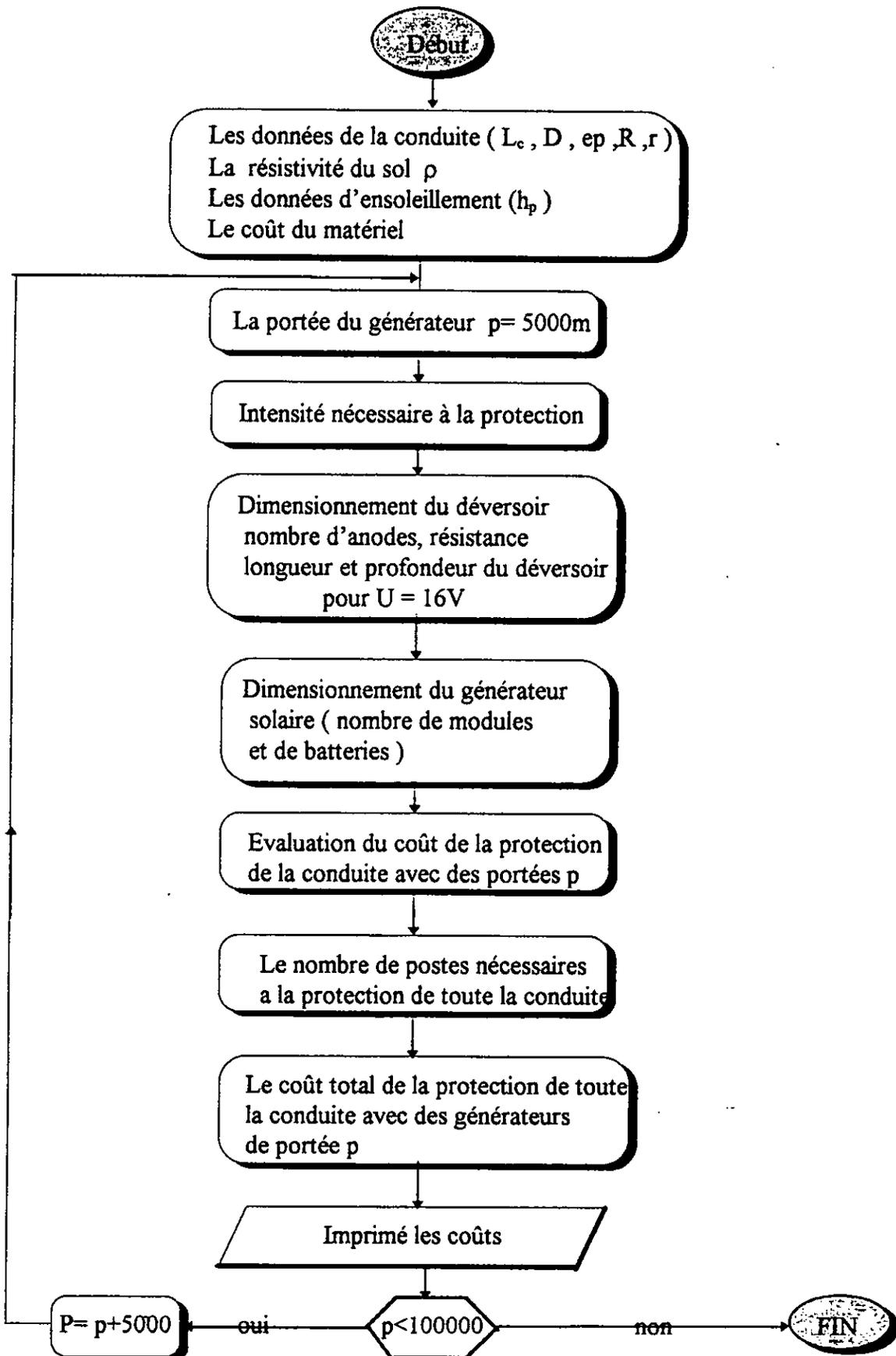
Procédure de calculs :

Dans ce cas le dimensionnement des déversoirs sera différent par rapport aux étapes précédentes, car il faut déterminer la profondeur de pose et la longueur du déversoir à partir de la résistivité du sol en tenant compte d'une valeur limite de résistance de terre permettant l'utilisation de générateurs à tension de sortie limitée à 24 V.

Pour cela on a établi un programme de calcul partant des hypothèses suivantes :

- La tension des générateurs est fixée à 24 V.
- La résistivité de sol est assez faible ( $50 \Omega.m$ ).
- Les anodes sont posées horizontalement.
- On utilisera des anodes, des modules et des batteries identiques au cas précédent.
- La profondeur de pose des anodes est fixée à 3 m ( Considérée comme étant une profondeur au-delà de laquelle il sera difficile de parler de déversoir de surface ).

L'organigramme simplifié du programme de calcul est représenté sur la page suivante.



Le programme permet de calculer le coût total de la protection de l'ouvrage pour différentes portées en utilisant des déversoirs de surface ainsi que des générateurs solaires de tension de sortie à 24 V. Le programme permet aussi d'obtenir la répartition du coût total sur ses différents composants. Les résultats obtenus, sont représentés sur les figures N° 40 et 41 :

Figure N.40

Optimisation de la portee de protection pour les generateurs solaires

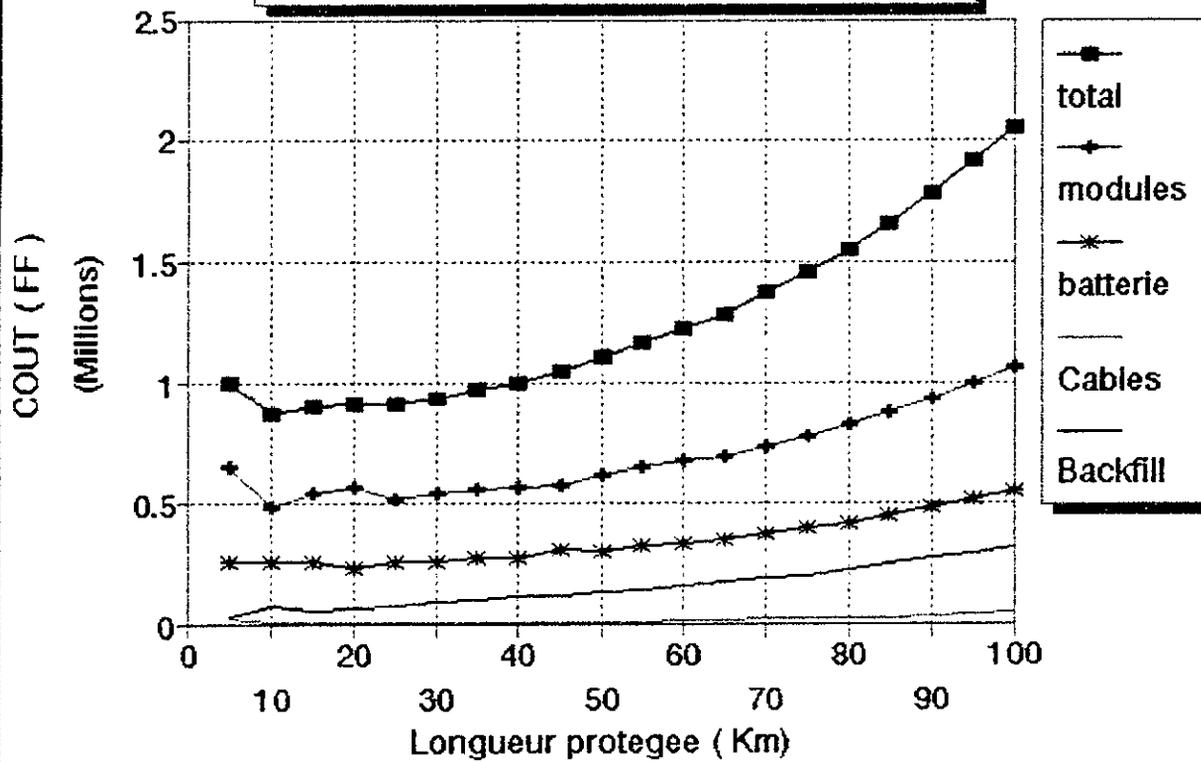
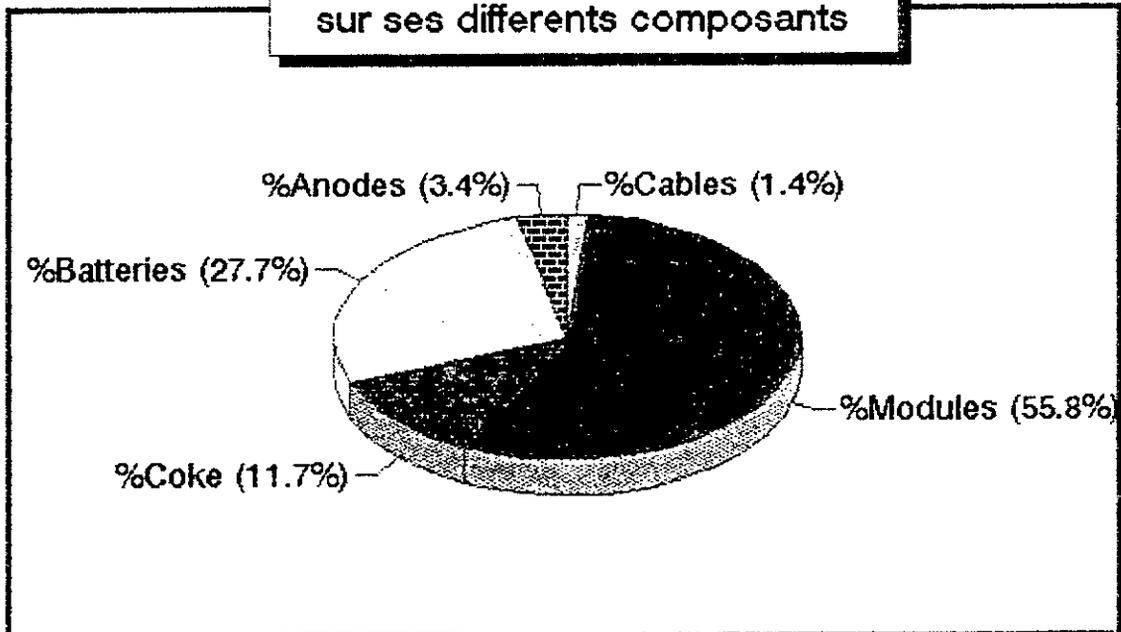


Figure N. 41

Repartition du cout d'un poste sur sur ses differents composants



Les figures N° 40 et 41 montrent que :

- Le coût minimum de la protection de la conduite correspond à une portée de protection de 10 km par poste, mais il reste acceptable jusqu'à des portées de l'ordre de 30 km.
- Le coût des modules et des batteries représente environ 80% du coût total.

### Résultats de l'étude technico - économique

La portée optimale des postes de soutirage de courant électro-solaire est de 30 km, soit une surface de 71816 m<sup>2</sup> par poste. La tension optimale des générateurs solaires conçus pour la protection cathodique est de 24 v.

Ces résultats restent valables pour le cas de l'utilisation des déversoirs de surface. Car, en effet, les travaux de maintenance et de suivi du système de protection doivent être permanents et la protection d'une conduite de 300 km avec des postes à faible portée nécessite beaucoup de personnel et de matériel.

## 5. Critère de choix du type de déversoir

La théorie recommande, au-delà d'une certaine valeur de la résistivité du sol liée aux paramètres du réseau à protéger, d'utiliser des déversoirs de profondeur ( puits anodique ). Dans le but de déterminer cette valeur limite, nous avons fait une étude qui permet de tracer l'évolution de cette valeur limite en fonction de la portée dans le cas des générateurs solaires; Et calculer simplement cette valeur dans le cas du transformateur-redresseur.

### a). Cas des générateurs solaires

La résistance d'un déversoir de surface, comprenant n anodes pré-backfillées, est donnée par les deux équations suivantes :

$$R = \rho \frac{1}{4 \pi L} \left( \ln \frac{L + \sqrt{d^2 + L^2}}{-L + \sqrt{d^2 + L^2}} + \ln \frac{L + \sqrt{(4 \cdot t - d)^2 + L^2}}{-L + \sqrt{(4 \cdot t - d)^2 + L^2}} \right)$$

En posant :

$$F = \frac{1}{4 \pi L} \left( \ln \frac{L + \sqrt{d^2 + L^2}}{-L + \sqrt{d^2 + L^2}} + \ln \frac{L + \sqrt{(4 \cdot t - d)^2 + L^2}}{-L + \sqrt{(4 \cdot t - d)^2 + L^2}} \right)$$

et d'après l'équation ( 5.2 ) on a :

$$R = (U - 2) \cdot 0.8 / I = \rho \cdot F$$

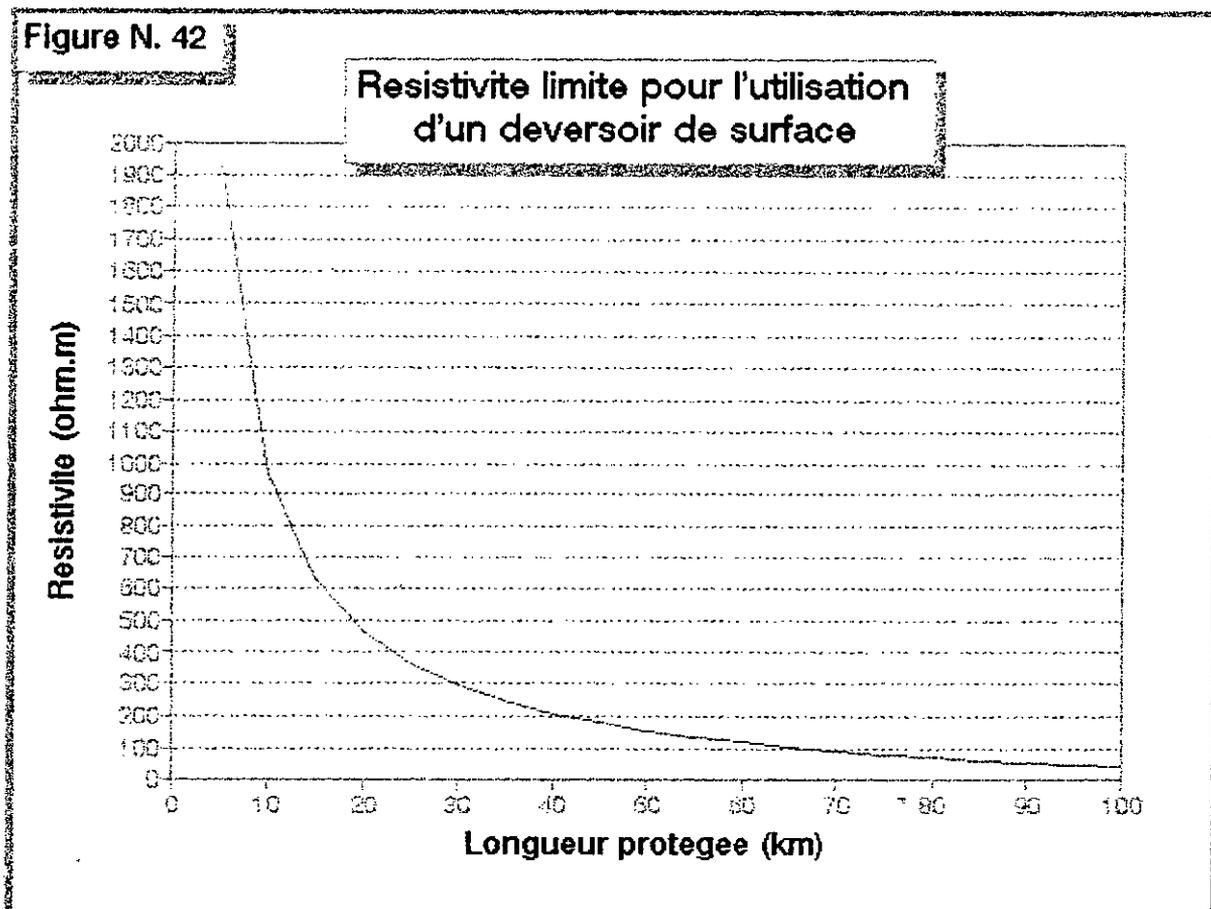
On peut écrire donc  $\rho = (U - 2) * 0.8 / (I * F)$  où

- $\rho$  : résistivité du sol  $\Omega \cdot m$
- $L$  : longueur de lit d'anode  $m$
- $d$  : diamètre de lit d'anodes  $m$
- $t$  : profondeur de pose des anodes  $m$
- $U$  : tension de sortie des générateurs  $V$

Afin de pouvoir déterminer la limite exacte qu'on peut utiliser par la suite, on doit fixer les conditions limites de l'utilisation d'un lit d'anode, qui sont :

- longueur maximum admis pour un lit  $L_{max} = 300 m$
- diamètre de lit est fixé à  $d = 0.4 m$
- profondeur maximale est de  $t = 3 m$
- tension des générateurs solaires  $U = 24 V$
- $E_0 = 0.3 V$
- l'intensité varie suivant la portée de la protection

La figure N° 42 : donne la résistivité limite de l'utilisation d'un lit d'anodes en fonction de la portée des postes :



Nous remarquons que pour des portées de 30 km, la résistivité limite se situe au tour de 250  $\Omega.m$ .

**b). Cas du transfo - redresseur**

La résistance de déversoir de surface est donnée par la formule suivante

$$R = F \rho$$

Une résistance comprise entre 0.8 et 3  $\Omega$  reste acceptable pour le dimensionnement des systèmes de soutirage de courant.

La résistivité limite qui permet l'utilisation de déversoirs de surface peut être déterminé en appliquant les conditions limite de l'utilisation d'un déversoir de surface.

$R = 3 \Omega$  résistance limite que peut avoir le déversoir

$L = 300$  m et  $t = 3$  m longueur et profondeur limite que peut avoir le déversoir

$L$  et  $t$  permettent la détermination de  $F$  à partir du tableau N° 15 ( annexe ).

$F = 0.0059336$ .

On trouve donc :

$$\rho_{LIM} = R / F = 505.595 \Omega$$

**6. Choix de l'emplacement des postes de soutirage de courant**

En tenant compte des résultats de l'étude technico - économique, on peut répartir les postes le long de la conduite comme suit :

- Un poste de portée 90 km avec un transformateur - redresseur au point PK 255.67.
- Sept postes de portée optimale de 30 km avec des générateurs solaires aux points kilométriques [ 15 , 45 , 75 , 105 , 135 , 165 , et 195 ].

En observant les résistivités du sol au niveau de ces points, la distribution des lits et des puits sur les postes de notre choix est la suivante :

Tableau N° 6 : Répartition des postes le long de l'ouvrage

PK	15	45	75	105	135	165	195	255.67
Longueur protégée km	30	30	30	30	30	30	30	90
Résistivité en surface $\Omega \cdot m$	3731	2997	1768	1708	595	130	301	226
Type de déversoir	Puits	Puits	Puits	Puits	Puits	Lit	Puits	Lit
Type de générateur	Solaire	TR						

La répartition des coûts observée dans l'étude technico - économique, confirme le fait que le coût du forage est très élevé par rapport à d'autres charges. Il est donc plus rentable de diminuer le nombre de puits, même si cela demande une augmentation du nombre de postes total. Pour cela, il est nécessaire de chercher le long du tracé des valeurs de résistivité permettant l'utilisation d'un lit anodique.

a /- première possibilité :

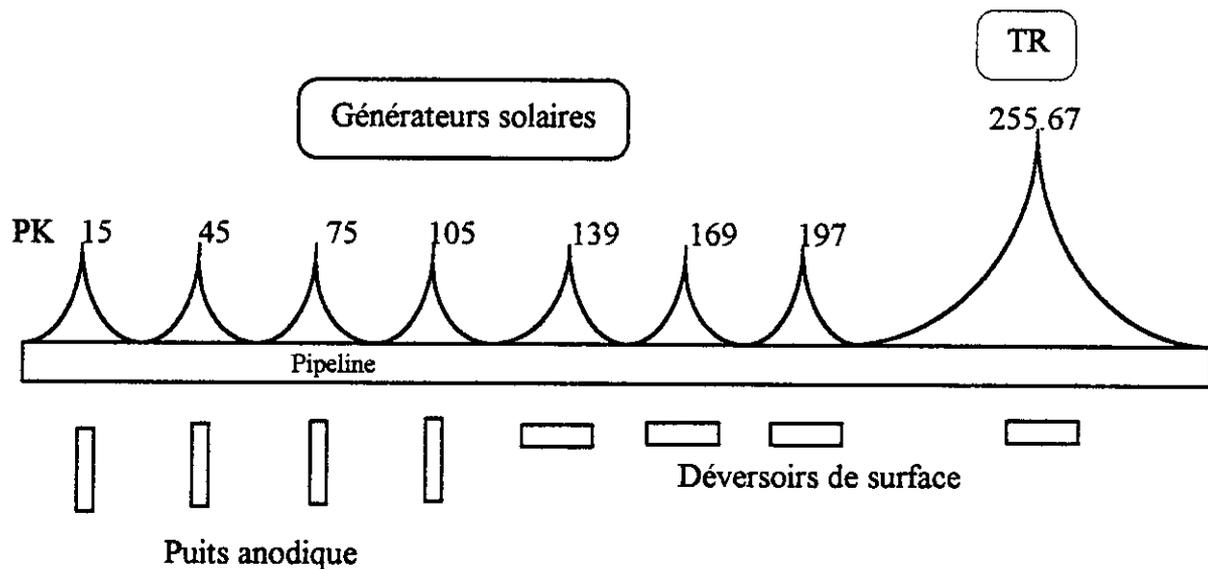


Figure 43 : Répartition des postes de soutirages le long de la conduite ainsi que celle des déversoirs selon la première possibilité.

Tableau N° 7 : Répartition des postes de soutirage selon la première possibilité

PK	15	45	75	105	139	169	197	255.67
Longueur protégée km	30	30	30	30	34	30	26	90
Résistivité en surface $\Omega \cdot m$	3731	2997	1768	1708	122	92	98	226
Type de déversoir	Puits	Puits	Puits	Puits	Lit	Lit	Lit	Lit
Type de générateur	Solaire	TR						

8 postes dont 4 lits et 4 puits.

b /- deuxième possibilité :

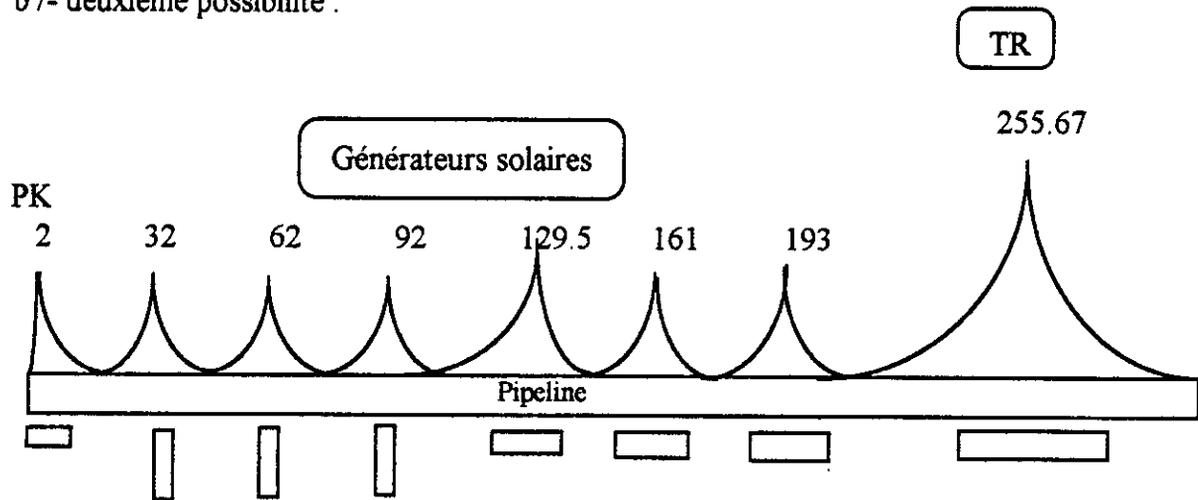


Figure 44 : répartition des postes de soutirage le long du pipe suivant la deuxième possibilité

Tableau N° 8 : répartition des postes de soutirage suivant la deuxième possibilité

PK	2	32	62	92	129.5	161	193	255.67
Longueur protégée km	17	30	30	30	39	30	34	90
Résistivité en surface $\Omega \cdot m$	159	1382	5233	9420	200	161	108	229
Type de déversoir	Lit	Puits	Puits	Puits	Lit	Lit	Lit	Lit
Type de générateur	Solaire	TR						

Tableau N° 8

8 postes dont 3 puits et 5 lits. L'inconvénient de ce choix est que les couples générateurs solaires - lits anodiques sont utilisés avec des grandes portées de protection.

c/- Troisième possibilité :

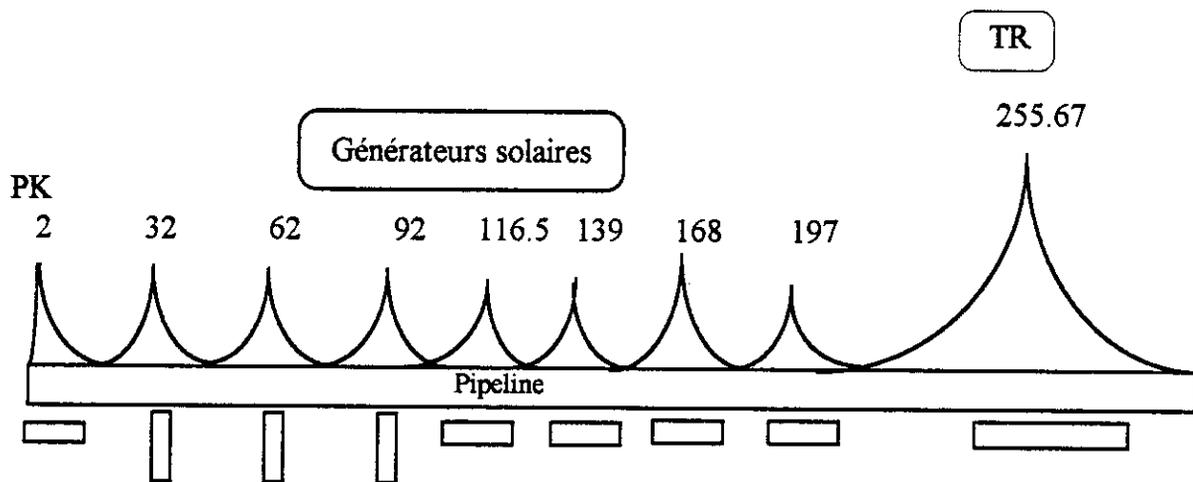


Figure 45 : Répartition des postes le long du pipe suivant la troisième possibilité

Tableau N° 9 : Répartition des postes de soutirage suivant la troisième possibilité

PK	2	32	62	92	116.5	139	168	197	255.67
Longueur protégée km	17	30	30	30	19	26	32	26	90
Résistivité en surface $\Omega \cdot m$	159	1382	5233	9420	234	122	84	98	226
Type de déversoir	Lit	Puits	Puits	Puits	Lit	Lit	Lit	Lit	Lit
Type de générateur	Solaire	TR							

En se basant sur les résultats de notre étude économique, le choix se porte sur la troisième possibilité, qui comprend le moins de puits possible. Les couples générateur solaire - puits anodique et générateur solaire - lit anodique sont utilisés avec leur portée optimale.

## 7 . Dimensionnement des postes de soutirage

### 7.1. Dimensionnement des postes utilisant les générateurs solaires

#### a). Dimensionnement des générateurs solaires

Dans le cas de dimensionnement des transformateurs - redresseurs, on peut 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<sub>4</sub>. 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, étant données les faibles valeurs de potentiels d'injections mises en jeu.

Le poste N°1 comporte d'une part un bras de protection L<sub>1</sub> de 2000 mètres, et d'autre part un bras L<sub>2</sub> de 15000 mètres.

Le courant nécessaire à la protection du bras L<sub>1</sub>

$$I_1 = (E_0 / \gamma) \operatorname{sh}(\alpha * L_1)$$

$$I_1 = 0.299 \text{ A}$$

Le courant nécessaire pour la protection du bras L<sub>2</sub>

$$I_2 = 2.436 \text{ A}$$

Le courant total nécessaire est  $I = I_1 + I_2$

$$I = 2.735 \text{ A}$$

Le courant total doit être majoré de 30 %, afin de permettre au générateur solaire une longue durée de vie ( en l'exploitant au deux tiers de sa capacité nominale.) et avoir une marge de sécurité suffisante concernant le matériel nécessaire.

$$I_{MAJ} = 3.556 \text{ A}$$

La tension optimale trouvée pour les générateurs solaire est de 24 V

Le besoin d'énergie / jour est

$$C_J = 24 * I_{MAJ} = 85.344 \text{ Ah / j}$$

Le nombre d'heure de pointe à l'emplacement des panneaux est de 6.5 h / j

L'énergie réelle fournit par un module MSX ( l'intensité fournie par le module est  $I_M = 3.5$  )

$$Q_{(réelle)} = 3.5 * 6.5 * 0.7 = 15.925 \text{ Ah / J}$$

Le nombre de module sera donc

$$N_m = C_J / Q_{(réelle)} = 6 \text{ modules}$$

La capacité des batteries pour une autonomie de 4 jours avec une profondeur de décharge maximale de 30%

$$C_{bt} = 4 * ( C_J - N_m * Q_{(réels)} * 0.4 ) = 628.32 \text{ Ah}$$

Le nombre de batteries de capacité ( 100 Ah , 24 V ) est donc

$$N_b = 7 \text{ batteries}$$

L'angle et l'orientation optimale des modules :

La latitude du lieu considéré est de  $\delta = 31.4^\circ$ , en utilisant la méthode du diagramme citée dans le chapitre 5, on a trouvé les angles suivants

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	$\theta = 48.50^\circ$	orientation plein Sud

Avec la même procédure de calcul, nous avons effectué les calculs pour les autres postes, et les résultats obtenus sont représentés sur les tableaux suivants :

Tableau N° 10 : Détermination des caractéristiques des postes ainsi que leur emplacement

Poste	PK	Portée ( km )	Courant de protection ( A )	Courant majoré ( A )	Tension à la sortie ( V )
1	2	17	2.753	3.556	24
2	32	30	4.872	6.334	24
3	62	30	4.872	6.334	24
4	92	30	4.872	6.334	24
5	116.5	19	2.963	3.817	24
6	139	26	4.137	5.378	24
7	168	32	5.256	6.833	24
8	197	26	4.137	5.378	24

Le tableau N° 11 donne le matériel nécessaire pour réaliser ces générateurs

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

Angles et orientation optimale des modules solaires des autres postes:

La latitude le long du tronçon du PK 0 au PK 200 a une valeur pratiquement constante [13]. Comme on l'a spécifié précédemment ce tronçon est protégé par des générateurs solaires, les angles et l'orientation des panneaux solaires ont donc les mêmes valeurs calculées pour le poste N°1.

### b). Dimensionnement des puits anodiques

Les puits anodiques sont rencontrés au niveau des postes N° 2, 3, et 4, pour ces derniers la portée de protection est la même. Le niveau de la nappe phréatique est le même également, les trois puits auront donc les mêmes dimensions.

Le courant majoré pour une portée de 30 km est de 6.334 A

Le nombre d'anodes est déterminé en fonction de l'intensité de courant majorée : Une intensité, de 6.33 ampères et pour une durée de vie de 20 ans, correspond à 7 anodes de masse unitaire 23 kg.

La résistance du déversoir anodique est donnée comme suit

$$R_a = (U - 2) * 0.8 / I_{MAJ}$$

Pour assurer aux générateurs solaires une durée de vie importante, nous considérons que la tension d'utilisation maximale ne devra pas dépasser les deux tiers de sa tension maximale, c'est à dire  $U = 16 \text{ V}$  d'où :

$$R_a = 1.768 \Omega$$

$$\text{D'autre part } R_a = (\rho / 2 \pi L) (\ln(8 * L / d) - 1)$$

Par itération avec  $\rho = 80 \Omega.m$ ,  $d = 0.3 \text{ m}$ , la longueur de la colonne d'anode nécessaire est de

$$L = 43.9 \text{ m}$$

L'espacement tête à tête entre les anodes dans la colonne d'anodes serait donc de  $e = 7.01 \text{ m}$

La masse du backfill pour remplir le casing de 43.6 m de profondeur et de 0.3 m de diamètre est :

$$M_c = m.v \cdot \Pi \cdot d \cdot L / 4000$$

m.v : est la masse volumique du backfill ( 2000 kg / m<sup>3</sup> )

$$M_c = 6.163 \text{ tonnes}$$

Le tableau N° 12 donne l'emplacement et les dimensions des trois puits

Poste	PK	Colonne d'anodes ( m )	Profondeur du puits ( m )	Nombre d'anodes*	Espacement anodes ( m )	Diamètre du puits ( m )	Masse du backfill ( tonnes )
2	32	43.6	93.6	7	7.01	0.300	6.163
3	62	43.6	93.6	7	7.01	0.300	6.163
4	92	43.6	93.6	7	7.01	0.300	6.163

\*Les anodes utiliser sont d'un alliage au ferro - silicium - chrome

- de masse unitaire 23 kg
- et de dimensions (1525 x 38.1) mm

### c). Dimensionnement des déversoirs de surface

Les déversoirs de surfaces seront réalisés au poste 1, 5, 6, et 7, où les conditions d'installation de ce type de déversoir le permettent.

#### Dimensionnement de déversoir du poste N°1

$$\rho_{SOL} = 159 \Omega.m$$

Le courant majoré est de

$$I_{MAJ} = 3.556$$

Le nombre d'anodes de  $M_a = 12.5 \text{ kg}$  est donc

$$N = 8 \text{ anodes}$$

La résistance du déversoir à la tension de 16 v

$$R_a = 3.149 \Omega$$

La longueur et la profondeur du déversoir sont déterminées par itération, à partir de l'équation suivante :

$$F = \frac{1}{4\Pi L} \left( \ln \frac{L + \sqrt{L^2 + d^2}}{-L + \sqrt{L^2 + d^2}} + \ln \frac{L + \sqrt{(4t-d)^2 + L^2}}{-L + \sqrt{(4t-d)^2 + L^2}} \right) = \frac{R_a}{\rho_{SOL}}$$

A titre de simplification, le tableau N°15 donne le facteur F pour un déversoir de diamètre 0.4 m à différentes longueurs et profondeurs (voir annexe).

Pour  $F = 0.0198$  et à une profondeur de 3 m L correspond à 66 m

L'espacement tête à tête entre les anodes serait  $e = 9.21$  m .

La masse de backfill nécessaire  $M_c = 1.12$  tonnes

Dimensionnement des lits pour les autres postes :

Le dimensionnement des autres lits est fait, en procédant de la même manière, les résultats obtenus sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau N° 13 Dimensions des déversoirs de surface

Poste	PK	Longueur déversoir (m)	Profondeur déversoir (m)	Diamètre déversoir (m)	Nombre d'anodes*	Espacement anodes (m)	Masse du backfill (tonnes)
1	2	66	3	0.4	8	9.21	21.12
5	116.5	120	3	0.4	8	16.9	38.40
6	139	80	3	0.4	12	7.13	25.60
7	168	67	3	0.4	14	5	21.44
8	197	20	3	0.4	6	3.965	6.40

\*Le type anodes utilisé est un alliage ferro-silicium- chrome

- de masse unitaire 12.5 kg ,
- et de dimensions ( 1525 x 38.1 ) mm .

Le résultat de calcul du poste N° 8 a donné une longueur de la colonne d'anode de 15 mètres, qui correspond à un espacement entre anodes ( tête - tête) de 2.625 mètre. Ce faible espacement risque de créer des interférences (du point de vue de la résistance du déversoir) entre anodes. Donc pour parer à cet obstacle on doit augmenter la longueur du lit d'anodes.

#### d). Dimensionnement des câbles de liaison électrique

- Longueur des Câbles anodes - générateur :

Pour les déversoirs de profondeur la longueur des câbles anodiques est donnée comme suit :

$$L_{C.A} = (P_p - 1) n - n (n - 1) / 2 * e + 10 (n + 1)$$

$L_{C.A}$  : longueur totale des câbles anodique ( m )

$P_p$  : profondeur du puits ( m )

$n$  : nombre d'anodes

$l$  : longueur d'une anode ( m )

$e$  : espacement tête à tête entre les anodes ( m )

10(n+1) longueur du câble au-dessus du sol

Pour les déversoirs de surface la longueur des câbles anodiques est :

$$L_{CA} = 2L + 10$$

Où L est la longueur de la colonne d'anode

10 la longueur du câble au-dessus du sol

En appliquant ces deux formules les dimensions des câbles sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau N° 14 : Dimensions des câbles de liaisons

Poste N°	Câbles Anodes - générateur		Câbles Générateur - conduite	
	Longueur ( m )	Section ( m ) *	Longueur ( m )	Section ( m )*
1	142	16	110	16
3	577.27	10	110	16
3	577.27	10	110	16
4	577.27	10	110	16
5	250	10	110	10
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 N° 5, connaissant les intensités du courant circulant dans ces câbles.

## 7.2. Le dimensionnement du poste de soutirage à transformateur - redresseur

Le poste de soutirage situé au PK 255.67 assure une portée de protection de 90 km, comprenant deux bras  $L_1 = 44.33$  et  $L_2 = 45.67$ . L'alimentation en énergie électrique de ce poste est assurée par un transfo - redresseur.

La résistivité électrique du sol au niveau de l'emplacement du déversoir est de  $226 \Omega.m$  ce qui permet l'utilisation d'un déversoir de surface.

Calcul de l'intensité nécessaire à la sortie du transfo - redresseur :

Afin de ne pas avoir un abaissement du potentiel trop élevé au point d'injection dans le cas des transformateurs-redresseurs, l'abaissement du potentiel à l'extrémité du bras de protection ( $E_0$ ) sera de  $0.3V$ .

L'intensité nécessaire à la protection des deux bras :

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

$$I = 15.825 \text{ A}$$

Une marge de sécurité de 30 % sur l'intensité de courant est nécessaire pour assurer une long durée de vie au redresseur. Intensité majorée de 30%

$$I_{MAJ} = 20.572 \text{ A}$$

Le nombre d'anodes nécessaires est  $N=42$  anodes de 12.5 kg de masse unitaire.

Pour assurer une résistance du déversoir d'environ  $1.5 \Omega$  il est nécessaire de prévoir une longueur de lit de 265 mètres ainsi qu'une profondeur de pose de 3 mètres.

L'espacement entre anodes ( tête - tête) serait donc de

$$e = 6.42 \text{ m}$$

La tension à la sortie de redresseur

$$U = (R_s * I / 0.8) + 2 = 40.57 \text{ V}$$

La masse du coke nécessaire est de

$$M_c = 84.80 \text{ tonnes}$$

Les dimensions du câble conduite - générateur :

$$\text{longueur } 110 \text{ m, de section } 50 \text{ mm}^2$$

Les dimensions du câble anodes - générateur :

$$\text{longueur } 540 \text{ m, de section } 50 \text{ mm}^2$$

Caractéristiques de TR : Le transformateur redresseur sera dimensionné de manière à fonctionner au maximum au deux tiers de son courant maximal, durant la protection, donc il faut prévoir un TR de

Tension nominale  $U 60 \text{ V}$

et

Intensité nominale  $I 30 \text{ A}$

## 8. Considérations supplémentaires concernant la protection cathodique

L'étude de tracé révèle l'existence de traversées de routes ainsi que des croisements avec d'autres conduites, ces points sont considérés dans la protection cathodique comme des points spéciaux qui se résument en :

- ☛ L'existence d'autres structures métalliques voisines de l'ouvrage à protéger, qui peuvent perturber le fonctionnement de la protection cathodique de ce dernier ou être influencés par celui-ci.
- ☛ L'existence de traversés de routes le long du tracé de l'ouvrage à protéger.

Ces points spéciaux nécessitent des dispositions supplémentaires concernant la protection de l'ouvrage.

### 8.1. Gaines de protection:

Elles sont utilisées pour assurer une protection mécanique des conduites aux endroits particulièrement exposés (traversés de routes, voies ferrées, ..... ) et, pour assurer l'écoulement du produit en cas de fuite dans ces traversés. ( figure 46 )

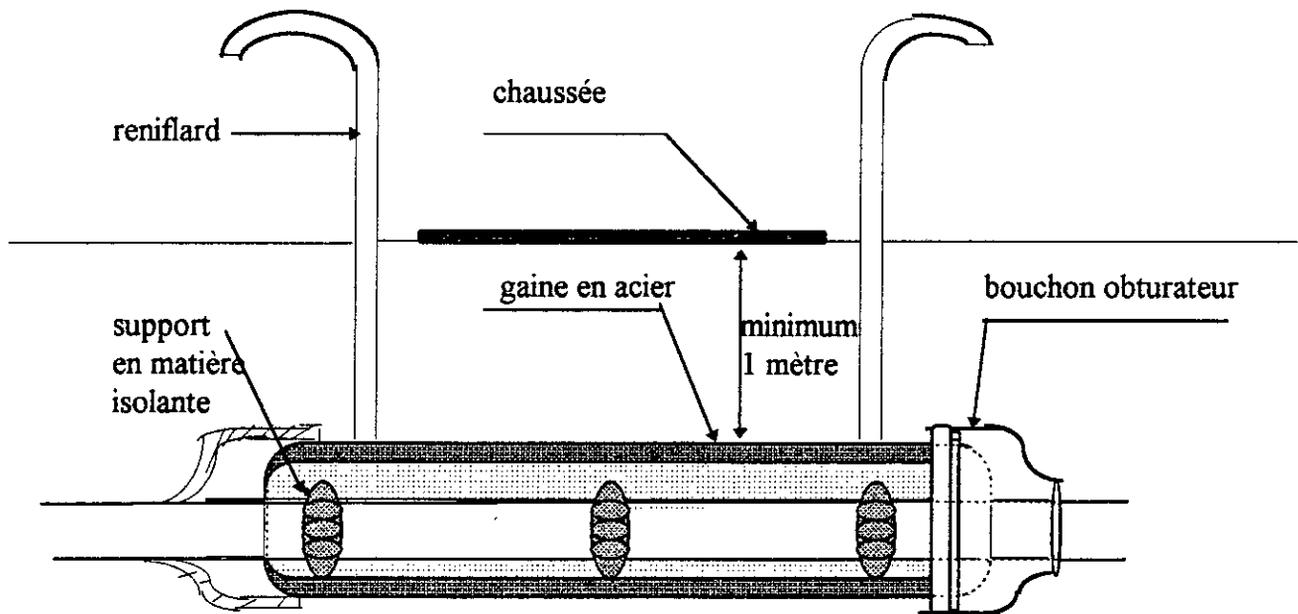


Figure - 46 - schéma détaillé d'une gaine métallique

- Les bouchons étanches sont placés à chaque extrémité de la gaine pour empêcher l'entrée de l'eau.
- La conduite doit être correctement centrée dans la gaine.

Quel que soit leur nature , béton ou acier, les gaines apportent des inconvénients qu'il ne faut pas ignorer.

- Augmentation du prix de pose de la conduite.
- Risque de détérioration du revêtement de la conduite lors de la mise en place dans la gaine.
- Perturbation du fonctionnement de la protection cathodique. Certes, les gaines en béton écartent les conséquences de contacts mais introduisent un affaiblissement de la protection dont il faut tenir compte.

Au niveau des gaines, la structure à protéger doit être l'objet de surveillance accrue. Pour cela, une prise de potentiel (à chaque extrémité si possible ) est recommandée afin de suivre l'évolution de l'isolement entre celle ci et le tube. (figure 47 )

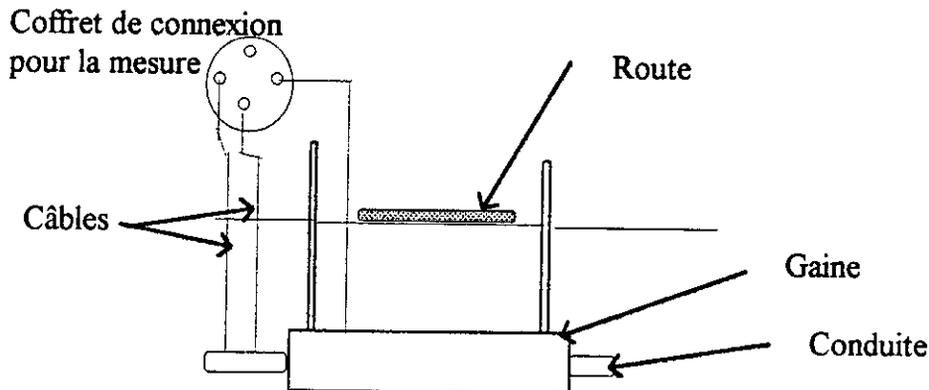


Figure - 47 - Schéma descriptif d'une prise de potentiel pour une traversée de route.

## 8.2. Protection contre les influences électriques dues au voisinage

La protection cathodique provoque dans le sol des variations de potentiel qui peuvent provoquer la corrosion de structures métalliques voisines non protégées. Il faut donc maîtriser ces phénomènes d'interactions pour éviter de causer des préjudices aux tiers .

En général deux sortes d'influences peuvent être distinguées :

- Effet Cathode :

C'est l'effet qu'on rencontre lors de croisement de deux conduites l'une protégée cathodiquement et l'autre non protégée. Dans ce cas le courant du déversoir peut être recueilli par la structure non protégée sur une large zone puis restitué au sol sur une petite zone, avant de gagner la conduite protégée. Le danger de corrosion est d'autant plus grand que la zone de restitution est petite ( Figure 48 ).

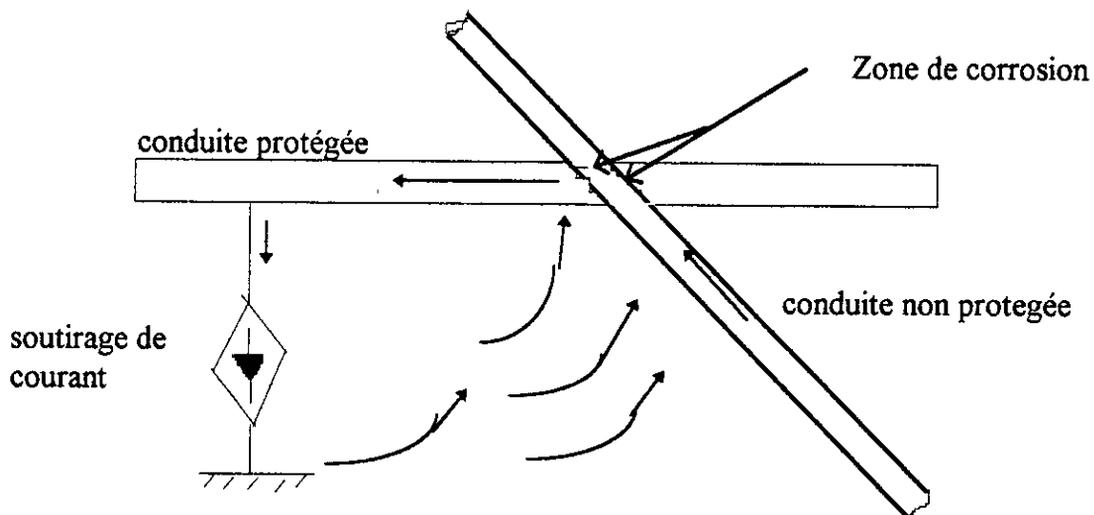


Figure - 48 - Influence due à un croisement

Et pour remédier à cela, une connexion électrique est d'usage dont le but est de ramener les deux conduites au même potentiel. Cette connexion n'est autre qu'une résistance variable ( Figure 49 ).

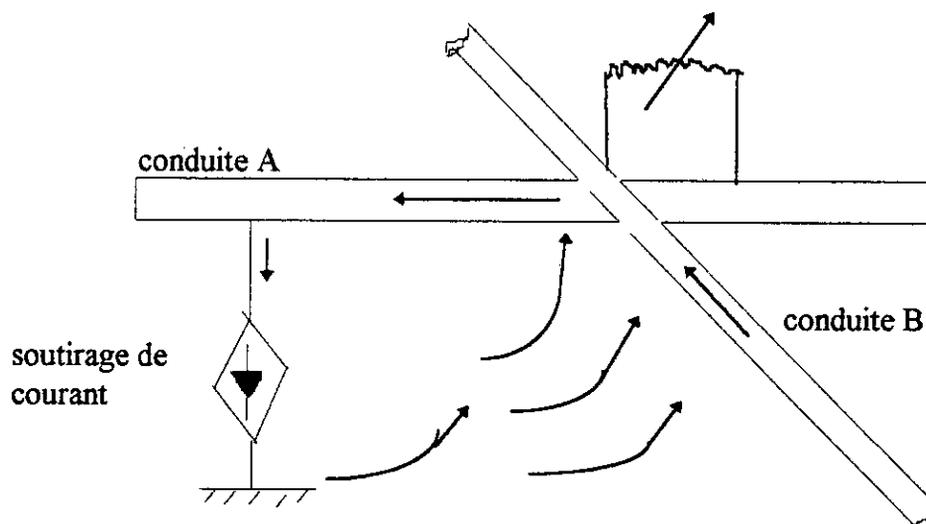


Figure - 49 - Connexion d'interaction

- Effet Anode :

Cet effet est le plus important, car la totalité du courant du système de protection est concentrée sur l'anode qui en est l'émetteur .

Lorsqu'une conduite passe à proximité du déversoir d'une installation de soutirage, le champ électrique créé par celui ci peut provoquer des entrées de courant. Ces courants empruntent la conduite sur une certaine longueur, puis en sortent pour retrouver la partie cathode du système de protection. Dans ce cas précis, la difficulté est de localiser la zone de sortie du courant. ( figure 50 )

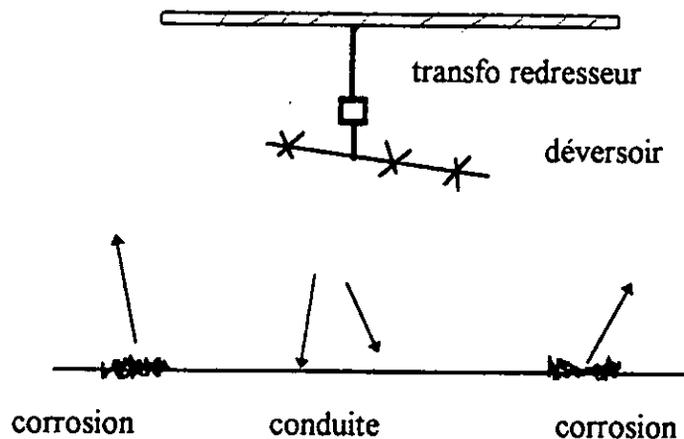


Figure - 50 - schématisation de l'effet d'anode

Et pour remédier à cela, des recommandations sont d'usages telles que :

- L'utilisation des déversoirs de profondeurs dans le cas de voisinage avec d'autres structures métalliques.
- L'application d'un revêtement particulier sur la partie de l'ouvrage la plus proche du déversoir, ce qui diminue la quantité de courant captée puis restituée au sol.
- L'installation des anodes sacrificielles sur la structure influencée dans les zones où le courant capté s'écoule vers le sol.

### 8.3. L'installation de joints isolants

Dans la plupart des cas, sauf s'il s'agit d'une protection globale, il est nécessaire d'isoler la structure métallique à protéger des ouvrages auxquels elle est raccordée car ils sont susceptibles de créer des mises à la terre, c'est le cas, en particulier, des stations de pompage, les réservoirs, . . . etc. Il est donc nécessaire d'installer des raccords isolants destinés à créer une barrière électrique entre la structure sous protection cathodique et les installations précitées.

Les raccords isolants peuvent être de deux types :

- Les raccords à brides : Ce type de raccord est constitué par un jeu à brides entre lesquelles sont interposés des joints d'étanchéité et des joints diélectriques. Ce type de joint est réalisé sur site.
- Les raccords monoblocs : ce type de raccord est constitué d'un bloc isolant réalisé en usine et soudé à l'ouvrage à protéger.

## 9. Contrôle de la protection cathodique

### 9.1. Mesure du potentiel

Le fonctionnement d'un dispositif de protection cathodique étant contrôlé à partir d'un niveau de potentiel, on conçoit alors que la mesure du potentiel des structures enterrées ou immergées est indispensable pour en contrôler l'efficacité du système de protection.

La mesure de potentiel d'une conduite métallique, enterrée ou immergée dans un électrolyte, est en réalité la mesure de la différence de potentiel aux bornes de la pile dont l'une des électrodes est constituée par la conduite et son électrolyte (sol ou eau) et l'autre d'une électrode de référence, la liaison entre les deux se faisant par un pont d'électrolyte.

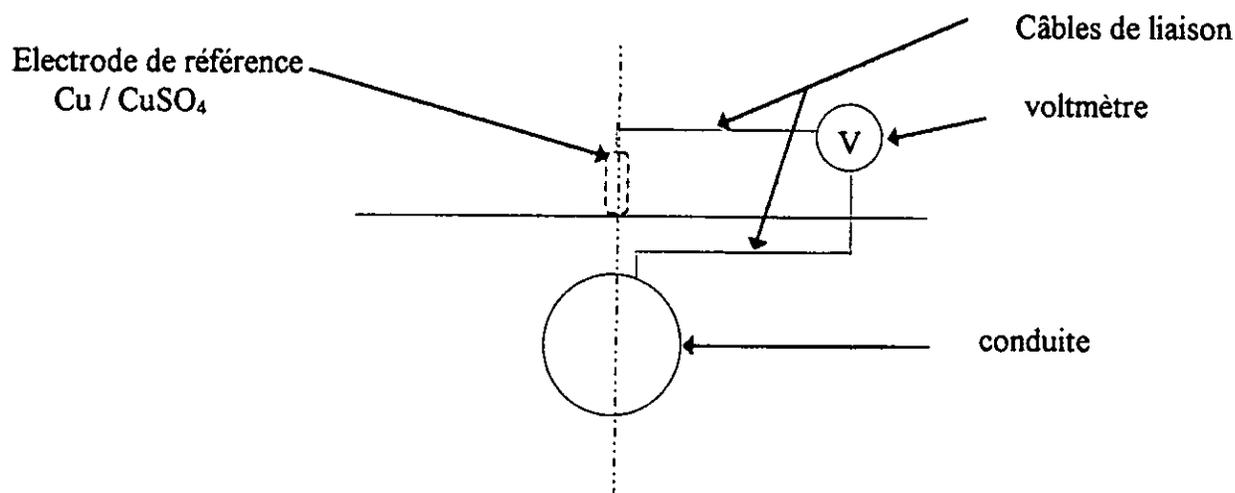


Figure - 51 - Mesure du potentiel d'une canalisation enterrée

Les mesures s'effectuent :

- A l'état initial, c'est à dire en dehors de toute influence de la protection cathodique. ( potentiel spontané, appelé aussi potentiel naturel )
- En dynamique, c'est à dire sous protection cathodique.
- A la coupure du courant (méthode dite " on - off " ou à courant coupé), cette méthode permet d'annuler l'erreur introduite sur la mesure dans certaines circonstances.

### 9.2. Mesure du courant

Les courants électriques, produits soit par le phénomène de corrosion proprement dit ( cas des piles géologiques ) soit par la protection cathodique, constituent des éléments appréciables dans le contrôle de l'anticorrosion. Ils se mesurent :

- Dans les interconnexions entre divers systèmes.
- Aux bornes d'un raccord isolant, un shunt étant placé en série dans le circuit.

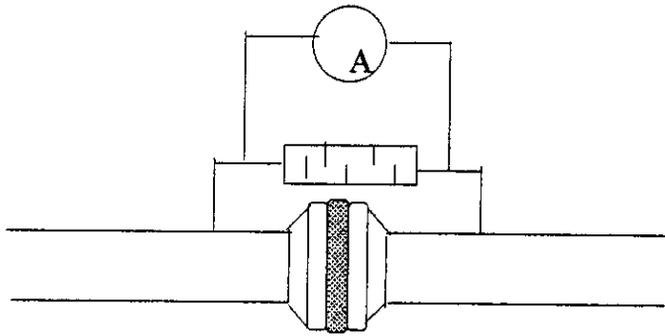


Figure - 52 - Mesure du courant au niveau d'un joint isolant

- Mesure du courant le long de la conduite protégée

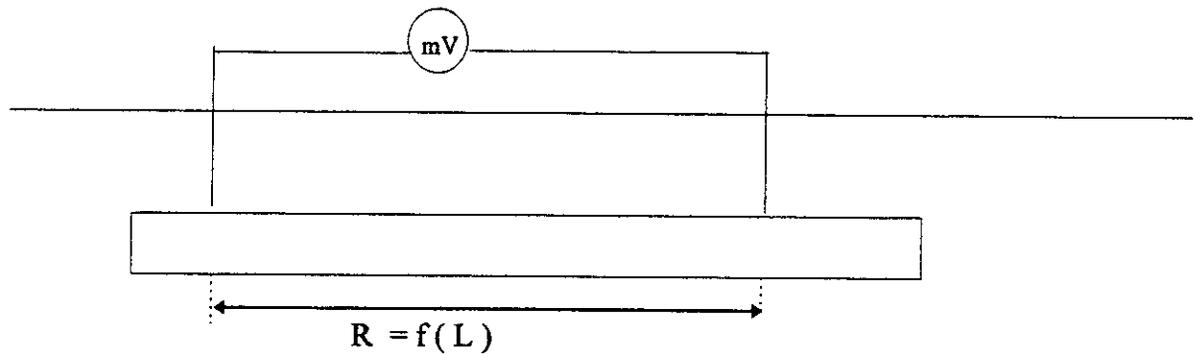


Figure - 53 - Mesure du courant dans une structure longiligne

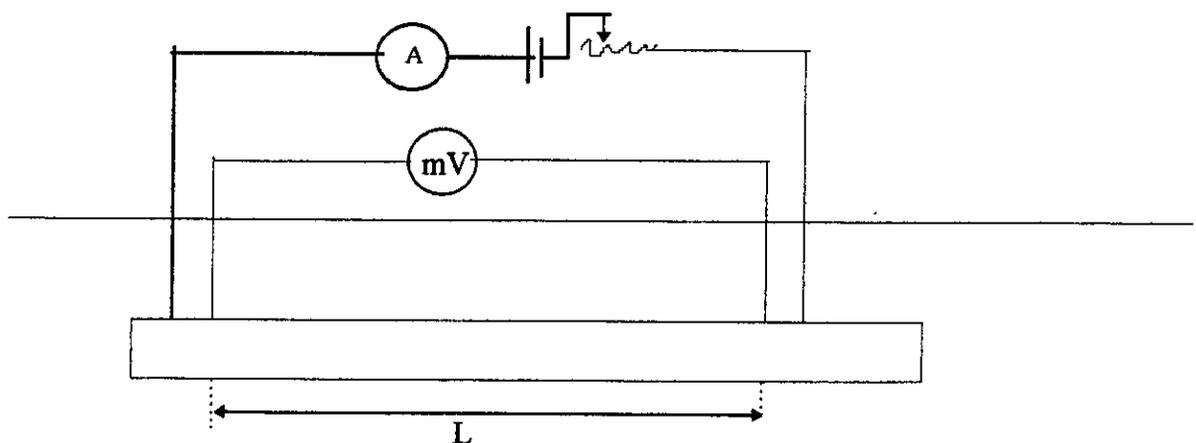


Figure - 54 - Détermination de la résistance de la conduite

En appliquant la loi d'Ohm on peut calculer le courant circulant :

$$I = U / R$$

- Où I : courant débité par le générateur  
U : tension mesurée à l'aide du millivoltmètre  
R : résistance linéaire du tronçon de la conduite

Pour les pipelines une prise de potentiel est recommandée tout les deux kilomètres et une prise ampèremétrique tout les sept kilomètres.

# CONCLUSION

## CONCLUSION

La lutte contre la corrosion est une nécessité économique et de sécurité, d'autant plus que l'économie dans l'industrie exige un fonctionnement continu et sûr des installations. 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. Lorsqu'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 des cas de protection d'ouvrages qui traversent des zones désertiques et similaires à celui proposé à l'étude dans le cadre de ce mémoire, l'utilisation des générateurs solaires comme source d'énergie électrique s'impose.

L'utilisation rentable et rationnelle des générateurs solaires dans les systèmes de soutirage doit faire l'objet d'une étude. Toute étude d'engineering destinée à l'application dans l'industrie doit se faire en tenant compte de deux aspects : Un aspect technique permettant la conception et le dimensionnement du système, et un aspect économique permettant la détermination optimale des paramètres assurant un rapport qualité / prix élevé.

Ce travail a été réalisé en partant de ce principe et en fixant comme objectif la détermination des paramètres optimaux dans l'utilisation de générateurs photovoltaïques dans la protection cathodique d'une conduite enterrée. Le but a été de montrer des méthodes de calcul, de conception et de dimensionnement appuyées par un exemple pratique de conception d'un système de protection appliqué à un cas précis, réaliste et pouvant être rencontré sur le terrain.

Les résultats d'optimisation obtenus sont spécifiques à l'ouvrage proposé à l'étude. Dans un but de généralisation à toutes les structures longilignes, un programme de calcul a été élaboré. Il suffira d'y adapter à chaque fois les paramètres propres à l'ouvrage à protéger. Ces paramètres seront introduits à la demande du programme qui calculera les coûts de réalisation pour différentes portées de protection des postes de soutirage et qui précisera la portée optimale correspondant au coût minimal. Ceci dans le cas d'utilisation de déversoirs horizontaux ou de puits anodiques.

Il reste à préciser que certaines données de base telles que certains prix unitaires, certaines caractéristiques de matériel et autres sont à mettre à jour. Pour cela, l'exploitation des résultats de cette étude ne peut en aucun cas dépasser le cadre de ce mémoire de fin d'étude dont le but a été de montrer une faisabilité et une méthode en gardant un caractère qualitatif.

A travers cette étude, nous avons acquis la certitude que l'énergie solaire est vouée à un avenir florissant dans notre pays. Du moins dans la protection cathodique des pipe-lines en projet pour le transport des hydrocarbures à partir des nouveaux gisements récemment découverts. Cette source intarissable d'énergie peut, à moindre coût, remplacer les transformateurs-redresseurs dont l'alimentation nécessite la réalisation de lignes électriques à des prix prohibitifs.

**ANNEXES**

**NOMENCLATURE**

**BIBLIOGRAPHIE**

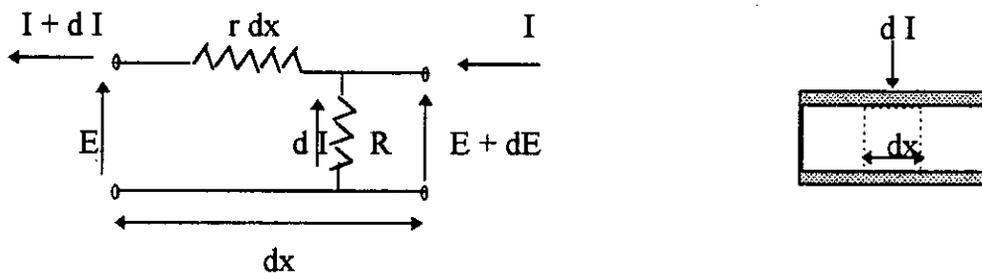
# ANNEXE I

## DEMONSTRATION DES EQUATIONS DES TELEGRAPHISTES

Ce sont des équations importantes dans la théorie de propagation des ondes électriques quasistationnaires le long des câbles.

Soit une conduite : de résistance transversale "R" exprimé en  $\Omega.m$ , et de Résistance longitudinale "r" exprimé en  $\Omega / m$ .

Soit I l'intensité de courant qui traverse la conduite exprimé en "A".



Soit l'élément dx de la conduite où on a une entrée de courant

$$dI = \frac{E}{R} dx \quad \text{ou} \quad \frac{dI}{dx} = \frac{E}{R} \quad (1)$$

et on a aussi une chute de potentiel

$$dE = r I dx \quad \text{ou} \quad \frac{dE}{dx} = r I \quad (2)$$

en dérivant l'équation (2) par rapport à x on obtient

$$\frac{d^2E}{dx^2} = r \frac{dI}{dx}$$

en remplaçant  $\frac{dI}{dx}$  par sa valeur on obtient :

$$\frac{d^2E}{dx^2} = r \frac{E}{R}$$

La solution générale de cette équation différentielle est de la forme :

$$E_x = A \exp(\sqrt{r/R} x) + B \exp(-\sqrt{r/R} x)$$

$$\text{de même pour } I = \frac{1}{r} \frac{dE}{dx}$$

$$I = \frac{1}{r} \sqrt{r/R} (A \exp(\sqrt{r/R} x) - B \exp(-\sqrt{r/R} x))$$

A et B, sont des constantes déterminées grâce aux conditions aux limites posons  $x = 0$

$$A + B = E_0$$

$$\frac{1}{r} \sqrt{r/R} (A - B) = I_0$$

$$\text{de ce système on tire : } A = \frac{1}{2} (E_0 + I_0 \sqrt{r/R})$$

$$B = \frac{1}{2} (E_0 - I_0 \sqrt{r/R})$$

et en portant dans l'équation du potentiel on obtient :

$$E_x = E_0 \operatorname{ch}(\sqrt{r/R} x) + I_0 \sqrt{r/R} \operatorname{sh}(\sqrt{r/R} x)$$

$$I_x = \frac{E_0}{\sqrt{r/R}} \operatorname{sh}(\sqrt{r/R} x) + I_0 \operatorname{ch}(\sqrt{r/R} x)$$

En posant :  $\alpha = \sqrt{r/R}$  : Facteur d'atténuation de la conduite

$\gamma = \sqrt{r/R}$  : Résistance caractéristique de la conduite

Les expressions du courant et du potentiel deviennent :

$$E_x = E_0 \operatorname{ch}(\alpha x) + I_0 \gamma \operatorname{sh}(\alpha x)$$

$$I_x = \frac{E_0}{\gamma} \operatorname{sh}(\alpha x) + I_0 \operatorname{ch}(\alpha x)$$

## ANNEXE II

### Explication du phénomène de fragilisation par hydrogène :

La fragilisation par hydrogène est un cas de corrosion particulier, car il n'altère pas la surface métallique mais se manifeste plutôt à l'intérieur de la masse métallique. Bien que les réactions qui provoquent ce mode de corrosion aient lieu à la surface métallique, l'hydrogène atomique libéré lors du processus de corrosion électrochimique s'introduit dans les matériaux peu ductiles, ces réactions sont de nature électrochimique.

Une fois l'hydrogène atomique dans la masse métallique, il se recombine sous forme moléculaire. Les molécules formées ne peuvent plus diffuser à l'intérieur de la masse métallique, il y a donc formation de poches de gaz où la pression peut atteindre la centaine d'atmosphère. Le phénomène de fragilisation par hydrogène se trouve activé par la présence de  $H_2S$ , dans le milieu environnant le métal,  $H_2S$  jouant le rôle de catalyseur. En effet le sulfure d'hydrogène empêche la combinaison de l'hydrogène naissant à la surface en hydrogène atomique.

Ce phénomène sera d'autant plus intense, que le potentiel du métal est faible. Qui dit faible potentiel dit une densité importante d'électron au niveau de la surface du métal, ceci entraînant alors la formation excessive de l'hydrogène monoatomique.

## **ANNEXE III**

### **Mise en place des éléments du système de protection cathodique**

Toute réalisation doit respecter des modes opératoires préalablement écrits et préalablement qualifiés selon des critères émanants d'étude, d'expériences ou de normes. Dans notre cas la réalisation de ce projet se fera également selon des modes opératoires précis.

Dans ce qui va suivre, nous donnerons un bref aperçu sur les principales règles à suivre lors de l'installation des postes de soutirage de courant :

#### **1. Installation du transformateur - redresseur**

Le transformateur - redresseur doit être installé dans une armoire de protection ; Le rôle de cette dernière est de protéger le transfo - redresseur contre des dégradations qui peuvent être causés par la nature ou par l'homme.

L'armoire sera installée sur un socle en béton ou en matière plastique, de manière à ce que la distance séparant l'arête inférieure de l'armoire de la surface du sol soit au minimum de 20 cm. [ 7 ]

#### **2. Constitution et installation des éléments du générateur solaire**

##### **2.1. Panneaux photovoltaïques**

Les panneaux photovoltaïques sont constitués d'un certain nombre de modules photovoltaïques interconnectés en série - parallèle et réunis sur une même structure porteuse. Chaque module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques enveloppée dans un cadre. La liaison de module avec d'autres modules ou avec l'extérieur se fait à travers une boîte de connexion fixée à l'arrière du module et munie de passages de câble. [ 11 ]

L'installation des panneaux photovoltaïques est une opération très délicate, elle doit respecter un certain nombre de règles dont les principales sont citées ci-après :

##### **a). Choix du site d'installation du générateur :**

Pour ne pas perturber par occultation le fonctionnement des modules, le site d'implantation des panneaux doit être éloigné des éventuels masques. En effet, une occultation même légère de quelques cellules du panneau peut : [ 11 ]

- ☛ provoquer la destruction des cellules
- ☛ occasionner des pertes d'énergie assez importantes.

#### b). Fixation des panneaux :

Les panneaux doivent être toujours orientés et inclinés afin de collectés le maximum d'énergie possible. Leur fixation doit permettre de garder toujours l'inclinaison et l'orientation choisies.

#### c). Structure porteuse :

Il est important que la structure porteuse ait une durée de vie élevée, au moins égale à celle des modules pour éviter de les changer fréquemment. Une bonne structure doit :

- Etre capable de résister aux intempéries ( vents par exemple ).
- Permettre une bonne ventilation naturelle des panneaux en prévoyant des passages suffisants pour l'air.
- Permettre la correction périodique de l'angle d'inclinaison, afin de maximiser la quantité d'énergie reçue sur le panneau.

### 2.2. Les systèmes de stockage

Le système de stockage prévu est constitué de batteries, composés d'éléments d'accumulateurs au plomb noyés dans un électrolyte d'acide sulfurique dont la masse volumique est de 1.26 kg / l. L'utilisation de ces batteries peut présenter certains dangers :

risque d'explosion, dégagement de gaz toxiques ( brouillard d'acide sulfurique ).

En outre, leur durée de vie et le bon fonctionnement de toute l'installation dépend aussi bien des conditions d'installation que d'exploitation.

Compte tenu de cela, l'installation des batteries doit être effectuée avec grand soin. elles doivent être installées dans un local approprié à l'abri des intempéries. Ce local doit satisfaire à certaines exigences qui sont les suivantes : [ 9,11 ]

- ☛ d'être bien ventilé pour garantir la circulation des gaz émanant.
- ☛ D'être à une température la plus proche possible de 25 °C.
- ☛ De ne pas contenir des équipements ou matériels pouvant provoquer un arc électrique

### 3. Installation des déversoirs anodique de courant

Afin d'assurée une grande durée de vie aux postes de soutirage de courant et avoir sur le terrain une valeur de la résistance du déversoir aussi proche que possible de celle calculée. L'installation des déversoirs anodique doit particulièrement satisfaire à certaines conditions, dont les principales sont citées ci après.

### **3.1. Précaution à prendre lors de la réalisation des déversoirs horizontaux [ 7 ]**

Le procédé de réalisation d'un déversoir horizontale est très simple, par contre il doit être réalisé avec beaucoup de soin. Les principales précautions à prendre lors des travaux sont les suivantes :

- Il est nécessaire de respecter les dimensions du déversoir, l'espacement entre les anodes ainsi que la profondeur de pose des anodes.
- Le backfill doit avoir une très fine granulométrie, et qu'il soit bien mouillé.
  
- Les anodes doivent être connectée en parallèle avec le câble principale (câble de soutirage ). Ce dernier doit être branché des deux coté au générateur de courant, pour assurée une bonne distribution du courant sur la totalité des anodes.

### **3.2. Précaution à prendre l'ors de la réalisation d'un puits anodique [ 13 ]**

La réalisation d'un puits anodique doit être faite avec précaution et conformité aux consignes données par le spécialiste qui a étudié et conçu le système de protection; Car une erreur dans la réalisation peut entraîner un mauvais fonctionnement du système de protection sans oublier les pertes financières qui accompagnent l'arrêt d'un système de protection. Car le coût de réalisation de déversoir de profondeur représente plus de 70% du coût total du poste de soutirage. Il faut veiller donc à ce que les consignes soient suivies à la lettre et exécutés par des spécialistes. On citera à titre d'indication:

- Les dimensions de puits doivent être respectées
- la totalité des anodes doit être immergée dans l'eau issue du puits foré.
- les anodes doivent être bien fixées de manière à avoir les espacements constants.
- Le backfill doit être humide et de faible granulométrie

## **4. Installation des câbles électriques**

Pour que le système puisse fonctionner normalement, le réseau de câblage doit satisfaire à certaines conditions citées ci après : [ 11 ]

- permettre un contrôle et un dépannage facile et rapide.
- utiliser des sections de câbles adaptées aux courants (débités).
- placer les câbles sous des couverts câbles ou des gaines, afin de les protéger contre les contrainte mécanique
- il est préférable de placé au-dessous des câbles enterrés un ruban visible, pour signaler la présence de ces derniers.

Les branchements des câbles doivent être réalisés avec beaucoup de précaution, a l'aide de procéder spéciaux. en suite il faut veiller à ce que les points de raccordements soient isolés de manière parfaite.

## ANNEXE IV

Tableau N° 15 : Facteur de la résistance de terre en fonction des dimensions du déversoir horizontal

L (mètre )	F (t=1m)	F (t=1.5m)	F (t=2m)	F (t=3m)
10	0,0900500	0,0891600	0,0778056	0,0746887
20	0,0558700	0,0579600	0,0492478	0,0470961
30	0,0415300	0,0439600	0,0370351	0,0354887
40	0,0334300	0,0358200	0,0300387	0,0288459
50	0,0281600	0,0304200	0,0254414	0,0244743
60	0,0244300	0,0265600	0,0221638	0,0213520
70	0,0216400	0,0236400	0,0196961	0,0189971
80	0,0194700	0,0213500	0,0177640	0,0171506
90	0,0177200	0,0195000	0,0162060	0,0156597
100	0,0162900	0,0179700	0,0149202	0,0144278
110	0,0150800	0,0166800	0,0138393	0,0133912
120	0,0140500	0,0155800	0,0129166	0,0125055
130	0,0131700	0,0146200	0,0121188	0,0117391
140	0,0124000	0,0137900	0,0114215	0,0110687
150	0,0117200	0,0130500	0,0108064	0,0104770
160	0,0111100	0,0124000	0,0102593	0,0099504
170	0,0105700	0,0118100	0,0097693	0,0094785
180	0,0100900	0,0112800	0,0093276	0,0090528
190	0,0096500	0,0108000	0,0089272	0,0086669
200	0,0092500	0,0103600	0,0085624	0,0083151
210	0,0088800	0,0099600	0,0082286	0,0079930
220	0,0085400	0,0095900	0,0079219	0,0076970
230	0,0082300	0,0092500	0,0076390	0,0074238
240	0,0079500	0,0089400	0,0073771	0,0071709
250	0,0076800	0,0086400	0,0071340	0,0069360
260	0,0074300	0,0083700	0,0069076	0,0067172
270	0,0072000	0,0081200	0,0066962	0,0065129
280	0,0069900	0,0078800	0,0064984	0,0063216
290	0,0067800	0,0076600	0,0063129	0,0061421
300	0,0065900	0,0074500	0,0061384	0,0059734

L : Longueur du déversoir ( m )

F : Facteur de résistance de terre ( m<sup>-1</sup> )

t : Profondeur de pose des anodes ( m )

# BIBLIOGRAPHIE



- [ 1 ] : « **La Protection cathodique - Guide pratique.** »,  
Chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel.  
Comité des techniciens.  
Editions TECHNIP , France 1986.
- [ 2 ] : « **Les canalisations d'eau et de gaz. corrosion, dégradation, et protection.** »,  
Commission Française pour l'étude de la corrosion des canalisations souterraines.  
Association Générale des Hygiénistes et Techniciens Municipaux.  
Editions technique et documentation - LAVOISIER - France 1987.
- [ 3 ] : « **Control of pipeline corrosion** »,  
National association of corrosion engineers,  
Publications NACE , USA 1980.
- [ 4 ] : « **La corrosion des conduites d'eau et de gaz, causes et remèdes** »  
Commission Française d'étude de la corrosion des conduites.  
Association Générale des Hygiénistes et Techniciens Municipaux.  
Edition EYROLLES - France 1968.
- [ 5 ] : « **Introduction à l'esprit de la technique d'anticorrosion.** »,  
Rapport technique SONELGAZ  
Réseau de distribution gaz, Alger
- [ 6 ] : PIRON D.L ., « **Electrochemistry of corrosion** »,  
Edition NACE, USA 1991.
- [ 7 ] : **Cahier des charges Protection cathodique.**  
Entreprise Nationale d'Engineering Pétrolier.  
ENEP - Alger 1994
- [ 8 ] : FOGELMAN. T., « **Installation photovoltaïque dans l'habitation** »,

Edition Edisud, Aix-en-Provence, France 1983

[ 9 ] : FOGELMAN. T, « **Systèmes photovoltaïque pour les pays en développement** »,

Edition Edisud, France 1983

[ 10 ] : PALZ .W, « **L'électricité solaire.** »,

Edition DUNOD - UNESCO, 1981.

[ 11 ] : CHICKH. M., « **Etude analytique conceptuelle des systèmes photovoltaïques de puissance adaptée aux sites isolés de L'ALGERIE** »,

Thèse de magistère, Centre de développement des énergies renouvelables,  
Alger, 1994

[ 12 ] : HADDADI. M, « **Conception et optimisation d'un générateur photovoltaïque** »,

Thèse de doctorat - département électronique,  
Ecole nationale polytechnique d'El - Harrach 1994.

[ 13 ] : DEBBACHE.S, « **Etude de la protection d'un oléoduc** »,

Centre de soudage et contrôle non destructif  
Alger 1995

[ 14 ] : MESLI. M. - BOUCIOUF. B « **Protection cathodique des ouvrages RGK1 et GK2. HASSI R'MEL-SKIKDA** »,

Mémoire de fin d'études  
Centre de formation inter - entreprises d'Alger.

[ 15 ] : **Conception et dimensionnement d'une installation photovoltaïque**

Centre de développement des énergies renouvelable, Alger

[ 16 ] : MICKEL CAPDEROU « **Atlas solaire de L'ALGERIE.** »,

EPEAU, EL - Harrach 1986.

[ 17 ] : **Techniques de l'ingénieur.**

Imprimerie Strasbourgeoise - France 1991.

[ 18 ] : Document d'appel d'offre ( prix unitaire du matériels de la protection cathodique).

Société internationale de produits et de services industriels  
IPSI, France 1996

- [ 19 ] : H. UHLIG , R.W. REVIE , « **Corrosion and corrosion contrôle** »  
 3<sup>ème</sup> édition, JHONE WILEY ET SONS 1985.
- [ 20 ] : TANASESCU. F.T, OLARIU. N, POPESCU. C.I, « **The implentation of photovoltaic cathodic protection systems** »  
 ICPE , Roumania 1988
- [ 21 ] : KORUPP. K.H. « **The photovoltaic powered cathodique corrosion protection systems with advanced systems technologies.**  
 Germany 1991.
- [ 22 ] : BENYAHIA . Z, « **Etude technico - économique comparative entre centrale diesel et centrale photovoltaïque** »  
 Thèse magistère, Centre de développement des énergies renouvelables - Haut commissariat de recherche, Alger 1990
- [ 23 ] : GHELLAI. S, « **Méthode de dimensionnement optimal d'une installation photovoltaïques**».  
 Résumé thèse magistère  
 Centre de développement des énergies renouvelables, 1993
- [ 24 ] : HADJ ARAB . A, « **Modéllsation et simulation d'un système photovoltaïques de faible puissance** ».  
 Thèse magistère, Haut commissariat de recherche - Centre de développement des énergies renouvelables, 1989