

DEPARTEMENT ELECTRICITE
FILIERE D'INGENIEUR EN ELECTRONIQUE

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
المكتبة
PROJET DE FIN D'ETUDES

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

METHODES DE CALCUL POUR
LA CONCEPTION DES SYSTEMES
DE PROTECTION CATHODIQUE
DES STRUCTURES LONGILIGNES

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
المكتبة
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

Proposé Par :

Mr. Ahmed ZERGUERRAS

Professeur à l'E.N.P.A.

Etudié Par :

Mr. : FILALI Salim

Mr. : CHAABI Abdelhafid



DEPARTEMENT ELECTRICITE
FILIERE D'INGENIEUR EN ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

METHODES DE CALCUL POUR
LA CONCEPTION DES SYSTEMES
DE PROTECTION CATHODIQUE
DES STRUCTURES LONGILIGNES

Proposé Par :

Mr. Ahmed ZERGUERRAS

Professeur à l'E.N.P.A.

Suivi Par :

Mr MEHRI

Etudié Par :

Mr. : FILALI Salim

Mr. : CHAABI Abdelhafid

- A MON PERE ET MA MERE QUI M'ONT TOUT DONNE

- A MES AMIS

FILALI SALIM

- A MON PERE

- A MA GRAND-MERE

- A MES AMIS

CHAABI ABDELHAFID

REMERCIEMENTS

- Nous tenons, en premier lieu, à remercier Mr ZERGUERRAS pour le choix du sujet et les conseils qu'il n'a pas hésité à nous donner pour l'élaboration de ce modeste travail .
- Nos remerciements vont également à Mr MEHRI -ingénieur à la SONATRACH- qui , par ses remarques judicieuses et son aide précieuse, nous a guidé tout au long de nos travaux.
- Que tous ceux qui ont contribué à notre formation trouvent ici l' expression de notre profonde gratitude.

FILALI CHAABI

PLAN

- I- INTRODUCTION
- II- ELEMENT ET RAPPELS D'ELECTROCHIMIE
- III- DIFFERENTES CAUSES DE CORROSION
 - Processus de la corrosion
 - Corrosion électrochimique
- IV - METHODES DE PROTECTION CONTRE LA CORROSION
 - Protection passives
 - Protections actives
- V - PRINCIPE DE LA PROTECTION CATHODIQUE
- VI - DIFFERENTES TECHNIQUES DE PROTECTION CATHODIQUE
 - Soutirage de courant
 - Protection par anode réactive
 - Drainage de courant
 - Association de plusieurs systèmes de protection cathodique
- VII- METHODES DE CALCULS
 - BASE DE calcul pour une structure longiligne homogène
 - Structure longiligne finie comportant un nombre indéterminée de tronçons.
 - Détermination de R et r, x
 - Première application de la méthode générale (incidence des puits sur la protection cathodique des plates formes fixes de forage)
 - Deuxième application de la méthode générale (protection cathodique du pipe SKIKDA-KHROUB)
- VIII - MESURES ET CONTROLES
 - Mesure de la résistivité du sol
 - Controle de la protection active
 - Controle de la protection passive
- IX - CONCLUSION

La Corrosion est un phénomène naturel que l'on doit combattre, car sur le plan économique l'enjeu de la lutte est considérable.

Vingt pour cent de la production mondiale d'acier seraient détruits chaque année par la corrosion si l'on n'y prenait garde. Pour ne pas voir croître ce pourcentage, il importe de développer notre connaissance de la lutte contre la corrosion au même rythme que celui du développement des industries de pointe.

On peut considérer la corrosion sous deux aspects principaux.

- La Corrosion altérant la matière en la transformant en produits chimiques nouveaux.

- La Corrosion n'altérant que l'objet dans modification de la matière

Dans notre cas seul le premier aspect sera étudié. Si on considère le métal au contact d'un milieu agressif humide on peut comprendre que les phénomènes possibles sont nombreux et complexes.

- On trouve d'abord la température comme facteur physique fondamental.

- Les sollicitations électriques auxquelles le métal sera soumis dans le sol devant être considérées.

- La nature du métal interviendra. Les Canalisations métalliques sont des tubes en métaux ferreux : fonte, acier, en cuivre etc... Ces matériaux sont caractérisés par la composition de l'alliage, par les traitements thermiques et mécaniques de fabrication, par l'état superficiel etc....

- Le milieu agressif est un terrain, un liquide ou un gaz humide, mais ces milieux sont extraordinairement différenciés par leurs structures physiques, leur composition chimique, en particulier par leur teneur en oxygène.

Cette énumération fragmentaire et très incomplète des facteurs de Corrosion suffit pour montrer que l'évolution des phénomènes dépendra des valeurs d'un très grand nombre de paramètres et des variations de ces paramètres au cours du temps.

Pour bien comprendre les différents phénomènes qui interviennent dans la protection Cathodique, il est indispensable de bien assimiler quelques éléments de base d'électrochimie.

II

ELEMENTS ET RAPPELS D'ELECTROCHIMIE

1°) STRUCTURE DE L'ATOME :

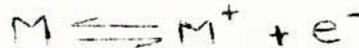
La matière est constituée d'atomes qui sont, pour un même corps simple tous identiques. Les différents atomes sont tous formés des mêmes constituants dont les plus importants pour notre étude sont l'électron, le proton et le neutron.

L'électron est la plus petite quantité d'électricité, cette quantité est négative. Comme l'atome est électriquement neutre, le noyau est donc chargé d'électricité positive pour annuler les charges d'électricité négatives des électrons. Le neutron est une particule électriquement neutre dont la masse est sensiblement égale à celle du proton.

Le noyau de l'atome porte une charge positive égale à Z fois la charge élémentaire e. (Z : nombre atomique de l'atome, c'est un nombre qui caractérise la nature d'un élément). Les électrons tournent autour du noyau et forme un nuage composé de Z électrons. Les électrons périphériques assurent dans les molécules, les liaisons avec les atomes voisins.

2°) LES IONS, ANIONS ET CATIONS.

L'atome est électriquement neutre, mais sous l'effet d'un choc, d'un champ électrique etc..... L'atome peut perdre un électron de sa couche périphérique; Il possède alors un excès de charge + e. Il s'agit maintenant d'un ion positif ou cation. Inversement l'ion pourra capter un électron pour redonner l'atome.



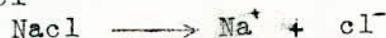
Si un atome capte un électron, il possède un excès de charge négative e⁻ Il est devenu un ion négatif ou anion .



Le courant électrique est dû à une circulation de charges électriques dans la matière, les charges peuvent être positives ou négatives.

3°) CONDUCTEURS LIQUIDES (ELECTROLYTES).

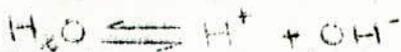
Tous les électrolytes (eau + sel, base ou acide) conduisent le courant électrique. Dans ce cas il n'y a pas déplacement d'électrons, mais déplacement d'Ions positifs ou d'Ions négatifs. Les électrolytes se dissocient en Ions. Dans le cas du NaCl il y a donc dissociation en un ion positif Na et un Ion négatif cl



Sous l'action d'un champ électrique, les ions positifs se dirigent vers le potentiel le plus bas tandis que les ions négatifs se dirigent vers le potentiel le plus haut. Dans un électrolyte, cas d'un récepteur les Ions positifs et les Ions négatifs se déplacent en sens contraire. Les Ions positifs suivent le sens conventionnel du courant.

4°) L'EXPOSANT D'HYDROGENE OU PH :

L'eau est partiellement et faiblement dissociée en ions suivant la réaction réversible



Ce qui signifie que dans l'eau il ya, avec les molécules, des ions H^+ et OH^- . On démontre, en appliquant les lois générales des équilibres chimiques que la condition générale de l'équilibre des ions H^+ et OH^- qui coexistent est

$$[H^+] \cdot [OH^-] = K_e$$

K_e : Constante de température donnée égale 10^{-14} à $23^\circ C$ moles par litre.

On appellera milieu acide une solution dans laquelle $[H^+]$ est $> 10^{-7}$

On appellera milieu basique une solution dans laquelle $[H^+]$ est $< 10^{-7}$

Le PH d'une solution est défini de la façon suivante

$$PH = - \log_{10} [H^+] = \text{Colog} [H^+]$$

Dans la pratique, le PH est représenté par un chiffre allant de 0 à 14

- PH < 7 Solution acide
- PH = 7 Solution neutre
- PH > 7 Solution alcaline. (basique)

Lors de l'Etude de la corrosion dans les sols, le PH de ces derniers intervient dans la formation des piles géologiques.

5°) OXYDO - REDUCTION.

On a d'abord défini l'oxydation comme la fixation de l'oxygène sur un système chimique et la réduction comme le phénomène inverse. Actuellement on généralise cette notion en disant que l'oxydation d'un élément correspond pour lui à une perte d'électrons, tandis que la réduction correspond à un gain d'électrons.

La réaction $Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e^-$ traduit une oxydation du fer. Tandis que la réaction

$Fe^{++} + 2e^- \rightarrow Fe$ traduit la réduction de l'ion ferreux.

D'une autre façon on pourra dire qu'un système qui peut libérer des électrons est un système réducteur.



schématise l'action réductrice de l'eau (en présence des oxydants) Inversement, un système qui peut capter des électrons est un système oxydant

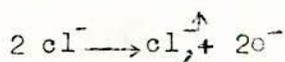


Schématise l'action oxydante de l'eau (en présence des réducteurs)

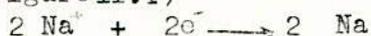
6°) ELECTROLYSES

6.1. Dans une cuve, mettons un électrolyte tel que du NaCl fondu. Nous savons que les liaisons entre atomes se font dans ce cas par électrovalences les atomes de Na et Cl sont transformés respectivement en Ions positifs et négatifs qui s'attirent.

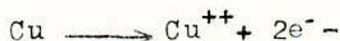
Plongeons dans le liquide deux électrodes inattaquables reliées à un générateur qui crée entre elles une différence de potentiel. Si la différence de potentiel est suffisante, c'est à dire supérieure au potentiel d'attraction des Ions Na^+ et Cl^- ces Ions sont dissociés. L'ion positif Na^+ se dirige vers l'électrode négative (cathode) tandis que l'ion négatif Cl^- se dirige vers l'électrode positive (Anode). Les Ions Cl^- ont chacun un électron de trop ils le cèdent à l'anode positive laissant des atomes de Cl qui se dégagent sous la forme de molécules de chlore



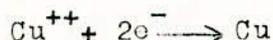
Ces électrons captés par l'anode suivent le circuit électrique jusqu'à la cathode où les attendent les Ions positifs Na^+ qu'ils transforment en atomes de sodium Na (Figure II.1)



6.2.- soit une solution de sulfate de cuivre CuSO_4 ($\text{Cu}^{++} + \text{SO}_4^{--}$) dans laquelle on plonge deux électrodes dont une anode en cuivre reliée au générateur. Les Ions Cu^{++} sont attirés par la Cathode, les Ions SO_4^{--} par l'Anode. L'Anode cette fois ne prend pas les électrons du radical SO_4^{--} mais prend ceux de ses propres atomes Cu les atomes privés de 2e^- deviennent des Ions Cu^{++} qui se dispersent dans la solution. L'Anode se dissout :



Les électrons parcourent le circuit électrique pour venir neutraliser les Ions Cu^{++} attirés par la Cathode et ainsi transformés en atomes Cu qui se déposent sur la cathode



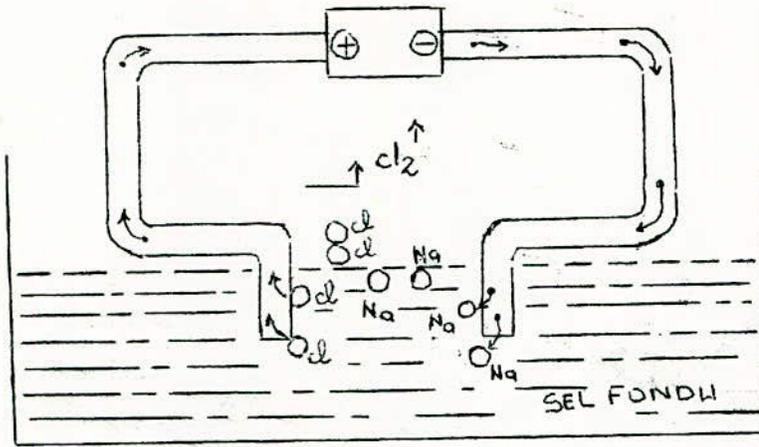
Il y a donc dissolution de l'Anode en cuivre et dépôt de cuivre sur la Cathode : on dit encore qu'il y a transport de métal de l'Anode à la Cathode

(Figure II. 2)

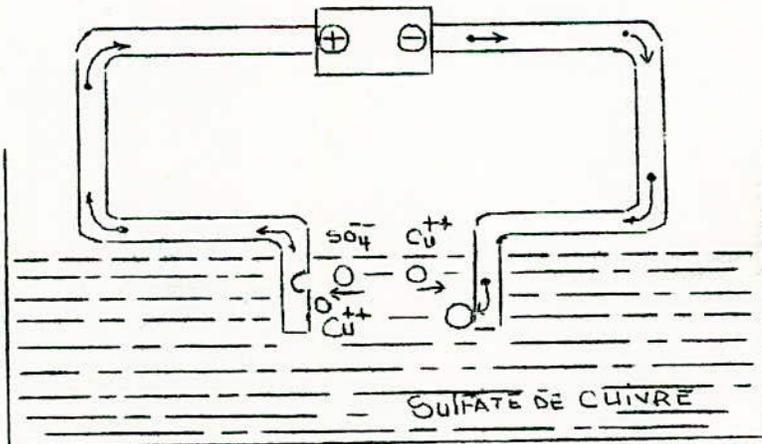
6.3. Loi quantitative ou loi de FARADAY

- Une même quantité d'électricité libère toujours une même masse d'hydrogène ou de métal.
- La masse de métal déplacée est fonction de la valeur gramme des électrodes.
- Il faut 96500C pour libérer une valence gramme

$$M = \frac{A \cdot I \cdot t}{n \cdot 96500}$$



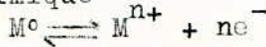
(Figure II.1)



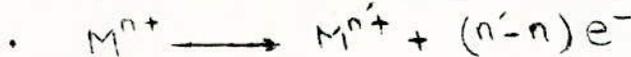
(Figure II.2)

7°) RELATION DE NERST.

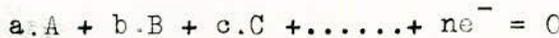
Le phénomène de corrosion le plus simple peut se présenter comme une réaction chimique



ce qui signifie qu'un atome de métal électriquement neutre peut donner naissance à un cation chargé positivement qui passe dans l'électrolyte et à n électrons. De même au sein de l'électrolyte, un cation peut donner naissance à un autre cation possédant une charge positive plus grande et à d'autres électrons.



Une telle réaction ne se produit jamais seule, elle fait partie d'un ensemble de réactions plus complexes. D'une façon générale une réaction sur la surface d'une anode en milieu aqueux, ou au sein de l'électrolyte, peut se représenter comme suit :



L'évolution d'un équivalent gramme B vers la forme A met en jeu une énergie définie par l'équation classique de NERST

$$W = \left(\frac{RT}{n} \right) \log \left[(A)^a (B)^b (C)^c \right] = F(E - E_0)$$

- A, B, C, représentent les concentrations respectives des Ions en présence dans l'électrolyte
- R = 8,324 (constante des gaz parfaits)
- T : Température absolue
- F : FARADAY (96490 coulombs)
- E : Potentiel en volt de l'électrode étudiée rapporté à une électrode de référence.
- E₀ : Potentiel électrique de la même électrode dans le cas où on a une demi réduction.

Les Ions en présence dans l'électrolyte sont les Ions ferreux Fe⁺⁺

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln [Fe^{++}]$$

Pour une température t = 20° C

$$E = E_0 + \frac{0,058}{n} \ln [Fe^{++}]$$

Pour une température t 25° C

$$E = E_0 + \frac{0,059}{n} \ln [Fe^{++}]$$

Pour le Fe⁺⁺ on a E₀ = - 0,44V

Tout métal plongé dans l'eau ou dans un électrolyte quelconque fait passer en solution des Ions positifs. Le métal se charge donc négativement. La dissolution du métal se stabilise lorsque la pression des Ions en solution équilibre la pression d'ionisation du métal (tendance du métal à projeter des Ions dans la Solution).

L'attraction entre la couche positive s'appelle la "couche double" qui correspond à un certain potentiel. Si on plonge un métal dans une solution normale d'un des sels de ce métal le potentiel de la couche double prend une valeur bien déterminée que l'on appelle " Potentiel normal de dissolution ".

Les métaux ont été classés par ordre de potentiel croissant, par rapport à l'électrode d'hydrogène. Le Classement s'appelle l'Echelle de NERST. (Figure II.3) Toutes les charges élémentaires e- amènent le métal à un potentiel négatif.

METAL	ION	E _o
OR	Au ⁺⁺⁺	+1,42 V
CUIVRE	Cu ⁺⁺	+0,345 V
HYDROGENE	H ⁺	0 par convention
PLOMB	Pb ⁺⁺	-0,126 V
FER	Fe ⁺⁺	-0,440 V
ZINC	Zn ⁺⁺	-0,762 V
ALUMINIUM	Al ⁺⁺⁺	-1,67 V
MAGNESIUM	Mg ⁺⁺	-2,34 V

Les métaux nobles sont en haut de l'échelle et deviennent de moins en moins nobles en descendant.

Dans la pratique de la protection cathodique; les conduites sont en acier et non en fer. D'autre part les électrolytes, sels de nature différentes et de concentrations variables amènent des potentiels très variables.

8°) PRINCIPE DE LA PILE

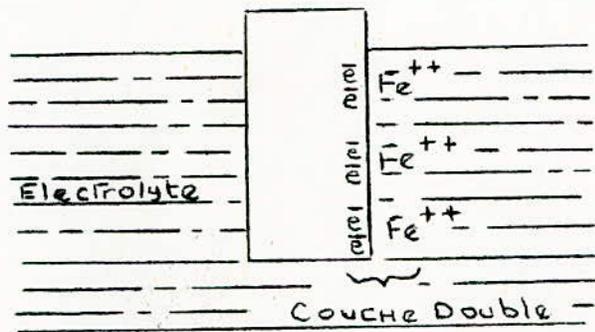
Généralement l'électrolyte est de l'eau plus de l'acide sulfurique, il est donc dissocié en Ions, les électrodes sont en cuivre et Zinc. Aux deux électrodes, il se forme le phénomène de la couche double à l'interface métal-électrolyte. En se référant au classement des métaux on voit que le Zinc est le plus électronégatif.

Si on relie ces deux électrodes par un circuit extérieur, il y a écoulement d'électrons du Zinc vers le cuivre. A chaque fois que deux électrons quittent l'électrode de Zinc il y a destruction de la couche double. Un Ion Zn⁺⁺ quitte l'interface métal électrolyte et part en solution pour se combiner avec un Ion SO₄⁻.

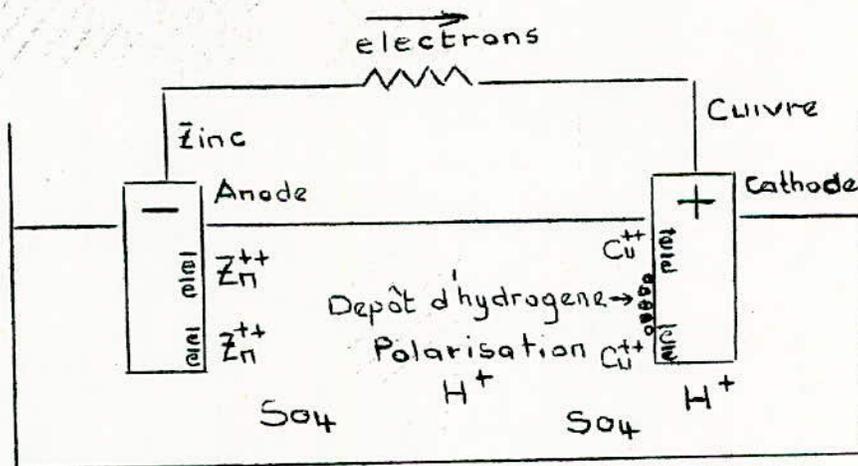
A chaque fois que deux électrons arrivent sur l'électrode de cuivre, il y a excès d'électrons qui captent chacun un Ion H⁺ et échange deux charges d'électricité, il reste simplement à l'interface électrolyte Cuivre l'Hydrogène gazeux. On dit qu'à l'électrode cuivre (positive) qu'il y a polarisation et qu'à l'électrode de Zinc (Négative) il y a corrosion.

Le cuivre et la cathode et le Zinc et l'Anode, on voit sur le schéma que le sens d'écoulement des électrons est du négatif vers le positif à l'extérieur du générateur, ce sens est le sens électronique du courant qui est inverse du sens conventionnel.

Dans un électrolyte, que ce soit un récepteur ou un générateur on constate que c'est toujours l'Anode qui se corrode d'où la nécessité que les ouvrages à protéger soit toujours "cathode" d'où le nom de protection cathodique donné aux techniques permettant qu'il en soit ainsi.



(Figure II.3)



(Figure II.4)

Pour éviter toute confusion entre cathode et Anode il suffit de retenir selon que l'on emploie l'un ou l'autre sens du courant que : l'Anode est toujours l'électrode qui perd les Ions métal (Figure II.4)

III

DIFFERENTES CAUSES DE CORROSION

I°) PROCESSUS DE LA CORROSION.

La Corrosion d'un métal ou d'un alliage peut se développer suivant différents processus qui caractérisent chacun un type de corrosion.

- Corrosion Chimique
- Corrosion électrochimique
- Corrosion Biochimique
- Corrosion accompagnée d'érosion

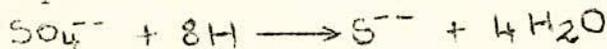
I.1. CORROSION CHIMIQUE: il s'agit d'une réaction hétérogène entre une phase solide le métal, et une gazeuse ou liquide. Dans le cas où le réactif est gazeux, apparaît un phénomène dit de corrosion sèche. Si le réactif est un liquide, il se produit une attaque du métal avec formation d'un produit de corrosion à sa surface même. La corrosion purement chimique ne fait donc pas intervenir le passage d'un courant électrique

Il est très difficile de donner des exemples de corrosion purement chimique puisque le plus souvent elle est accompagnée de corrosion électrochimique. Cependant, l'attaque d'un métal par un autre métal liquide (Hg), par un sel fondu ou par une solution non aqueuse, (Al dans CCl_4), peut être considérée comme une corrosion chimique.

I.2. CORROSION BIOCHIMIQUE : c'est l'attaque bactérienne des métaux en particulier dans les canalisations enterrées. Le mécanisme de ce mode de corrosion peut être de plusieurs types

a) Chimique par production de substances corrosives telles que CO_2 , H_2S , H_2SO_4 ou d'un acide organique. Par exemple on a observé des cas de corrosion dans des canalisations enterrées, au voisinage des joints contenant du soufre. Celui-ci permet le développement de colonies de Thiobacilles dont le métabolisme détermine la formation d'acide sulfurique qui attaque le métal.

b) Certaines bactéries comme les Désulfovibrio désulfuracans peuvent réduire des sulfates par l'intermédiaire d'hydrogène



L'hydrogène provient par exemple des régions cathodiques. Il y a donc dépolarisation des cathodes et formation accélérée de $\text{Fe}^{++} \rightarrow \text{FeS}$

c) Dans certains cas, on peut observer sur les canalisations des dépôts adhérents résultant de l'attaque, non pas du métal lui-même, mais de celle de certains constituants du milieu ambiant par des bactéries.

Il en résulte la formation de piqûres sur le métal, à l'endroit où s'est produits le dépôt suivant un processus de corrosion par différence de concentration en oxygène

I.3. CORROSION AVEC EROSION. Lorsque les produits de corrosion forment un dépôt adhérent et continu à la surface du métal, ils ralentissent en général la vitesse de corrosion. Cette couche peut être éliminée en certains points par abrasion du métal due au mouvement du liquide lui-même, ou bien à celui des particules solides qu'il contient. Il y a alors accélération de corrosion.

2°) CORROSIONS ELECTROCHIMIQUE

2.1. CORROSION PAR HETEROGENEITE DU METAL.

- Lorsque deux ouvrages métalliques de nature différente sont dans le sol c'est à dire en contact avec l'électrolyte, ils forment les deux électrodes d'une pile. Le cas le plus fréquent est un piquage en cuivre sur une conduite en acier (que nous considérons comme étant en fer).

D'après la relation de NERNST, chaque métal plongé dans cet électrolyte va faire passer en solution des Ions positifs et se charger négativement. Les valeurs des potentiels ne seront pas celles de l'échelle de NERNST (l'électrolyte n'est pas une solution normale d'un des sels de cuivre ou de fer). Mais le fer se chargera plus électronégativement que le cuivre.

La pile étant courtcircuitée par la liaison du tube cuivre, il y aura écoulement d'électrons du fer vers le cuivre, il y a destruction de la couche double, côté fer (Corrosion) et polarisation du cuivre. Ce phénomène de corrosion s'appelle " couple galvanique " (Figure III.1)

- Un autre cas souvent rencontré est celui d'un piquage en acier galvanisé sur une conduite en acier. Nous considérons une électrode de Zinc (seule la couche en contact avec l'électrolyte nous intéresse) et l'autre électrode en fer. Le Zinc se charge plus électronégativement que le fer, il y aura donc écoulement d'électrons du Zinc vers le fer d'où corrosion du Zinc. (Figure III.2)

2.2. CORROSION PAR HETEROGENEITE DE L'ELECTROLYSE :

Le sol qui est l'électrolyte a des zones très aérées (Zones de cailloux, sables) et des zones très peu aérées (Argile, Tourbe). La conduite qui traverse ces différents terrains sera soumise à des différences de potentiel on dira qu'il y a dans ce cas "pile géologique" et naturellement des Zones (sur la conduite) Anodique et cathodique. (Figure III.3).

2.3. CORROSION PAR COURANTS VAGABONDS.

Les courants électriques vagabonds sont des courants qui suivent des chemins différents de ceux du circuit prévu. Ils peuvent aussi provenir de courants étrangers quelconques dans la terre. Si des courants de ce genre pénètrent dans une structure métallique, ils causent la corrosion aux endroits où ils ressortent pour pénétrer dans le sol ou dans l'eau.

Habituellement les courants vagabonds dans le sol ne sont pas importants en ce qui concerne la corrosion en un point donné car ils sont soit de faible grandeur soit de courte durée.

Les sources de courants vagabonds sont fréquemment des lignes de chemins de fer électrique de redresseurs de puissance enterrés, des postes de soudure électrique, des systèmes de protection cathodique et des Usines de galvanoplastie. Un exemple de courant vagabond, provenant d'un système de tramway électrique dans lequel on utilise des rails en acier. Pour que le courant retourne à la station génératrice. Théoriquement l'intensité I devrait se retrouver dans le rail, il n'en est pas ainsi car une partie du courant de retour I retourne au générateur par le sol à la hauteur de la motrice, le rail est positif.

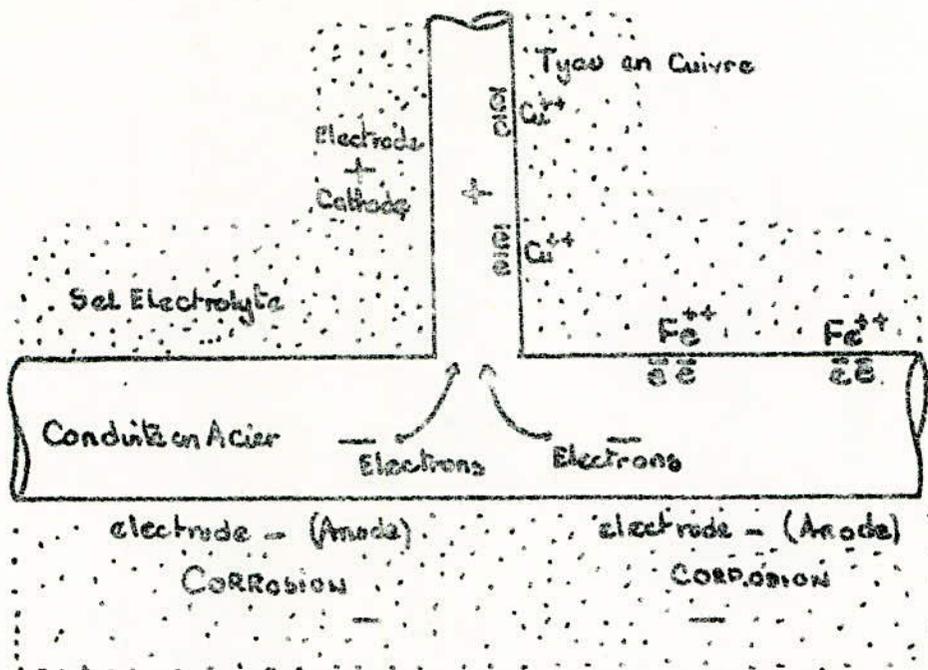


Figure III-1 Cas du Cuivre et du Fer

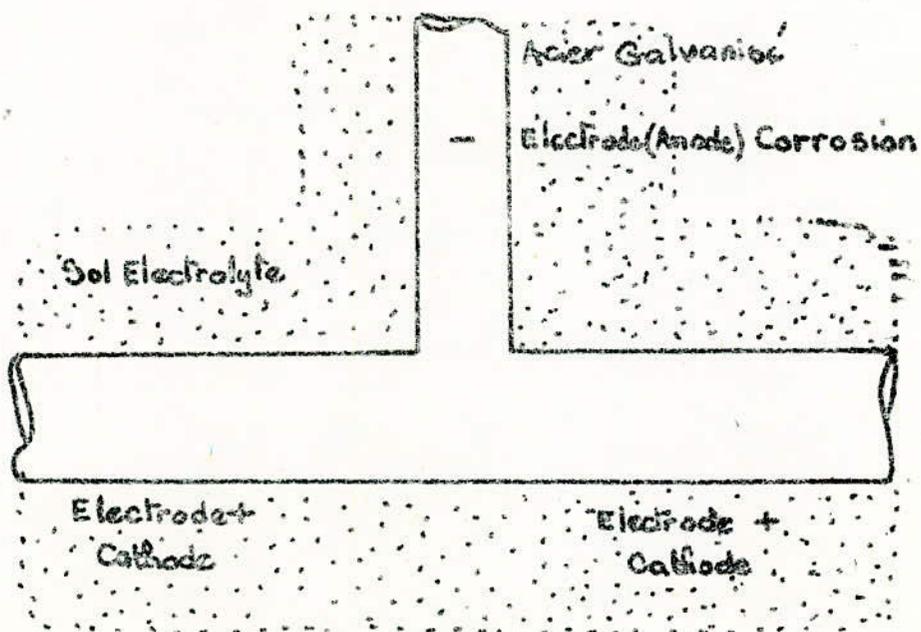


Figure III-2

Soit R : la résistance longitudinale du rail qui est parcouru par un courant I . De la relation $I.R = U$ on voit qu'il existe une chute de tension le long du rail entre la motrice et le pôle négatif du générateur.)

D'autre part l'isolement Rail/Sol n'est pas parfait, donc une partie du courant emprunte le sol. Si une conduite est à proximité les courants vagabonds empruntent la conduite qui a une résistance électrique beaucoup plus faible que celle du sol, l'ordre de grandeur des courants I'' est de 50 à 100 A et parfois plus. Si l'on fait appel à la loi de FARADAY, la masse de métal déplacée est importante. (Figure III 4)

2.4. DIAGRAMME DE CORROSION.

Le Professeur POURBAIX a travaillé sur les problèmes de corrosion des métaux dans différents électrolytes, les résultats de ces travaux résumés dans des graphiques ci-dessous, celui relatif à la corrosion du fer dans le sol.

En abscisse, le PH de la solution et en ordonnée le potentiel du métal. Ce graphique est divisé en trois parties. (Figure III 5)

PASSIVATION : un ouvrage qui a ses coordonnées dans cette zone n'est pas corrodé. Il se protège par formation d'oxydes protecteurs, mais cet état est instable, c'est donc une zone à éviter.

CORROSION : En fonction du PH et du potentiel de l'ouvrage, si ses coordonnées sont dans les deux zones, il y a corrosion de l'ouvrage. Ce sont donc deux zones dangereuses qu'il faut éviter.

IMMUNITÉ : On voit que si le potentiel de l'ouvrage est inférieur à - 0,85 V, il n'y a pas de corrosion, il y a dégagement d'hydrogène. La petite zone de corrosion se trouvant au delà du PH = 12 n'est pas à craindre car les sols n'ont pas des PH de cet ordre.

2.5. IMPORTANCE DU MILIEU AMBIANT :

Le sol étant l'électrolyte, celui-ci ne peut avoir des caractéristiques électriques constantes. Il existe des terrains bons conducteurs et d'autres mauvais conducteurs de courant; par suite la corrosion sera facilitée ou diminuée selon la nature électrique du sol; c'est à dire suivant son agressivité, cette nouvelle grandeur est liée directement à la résistivité ρ . Les terrains se répartissent en trois catégories :

- 1 - Terrains très agressifs ou $\rho < 50 \Omega m$
- 2 - Terrains d'agressivité moyenne $50 < \rho < 100 \Omega m$
- 3 - Terrains passifs ou d'agressivité nulle $\rho > 100 \Omega m$

La résistivité des sols se contrôle à l'aide du pont de KOHLRAUCH.

ZONE CATHODIQUE

ZONE ANODIQUE
CORROSION

ZONE CATHODIQUE

+

+



electrons ← → Electrons

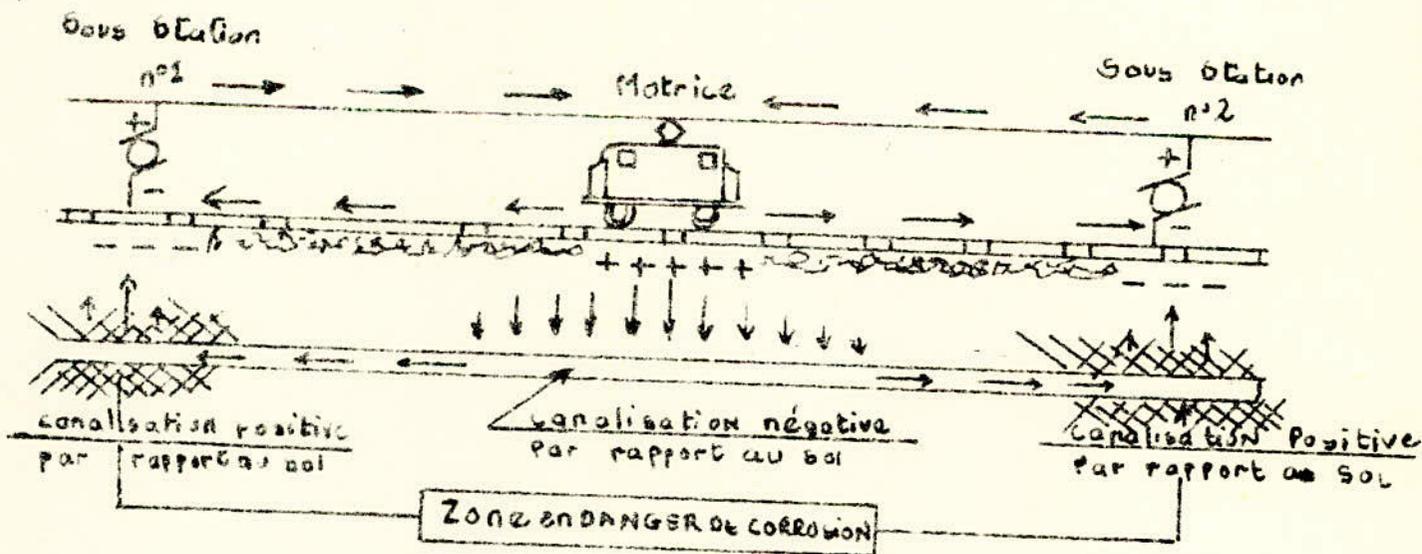


Terrain très aéré
Cailloux

Terrain peu Aéré
Argile

Terrain très Aéré
Sable

Figure III.3



CORROSION Par Courants Vagabonds

Figure III.4

Potentiel par rapport à l'électrode C_1/so_4 .

Potentiel par rapport à l'électrode d'Hydrogène

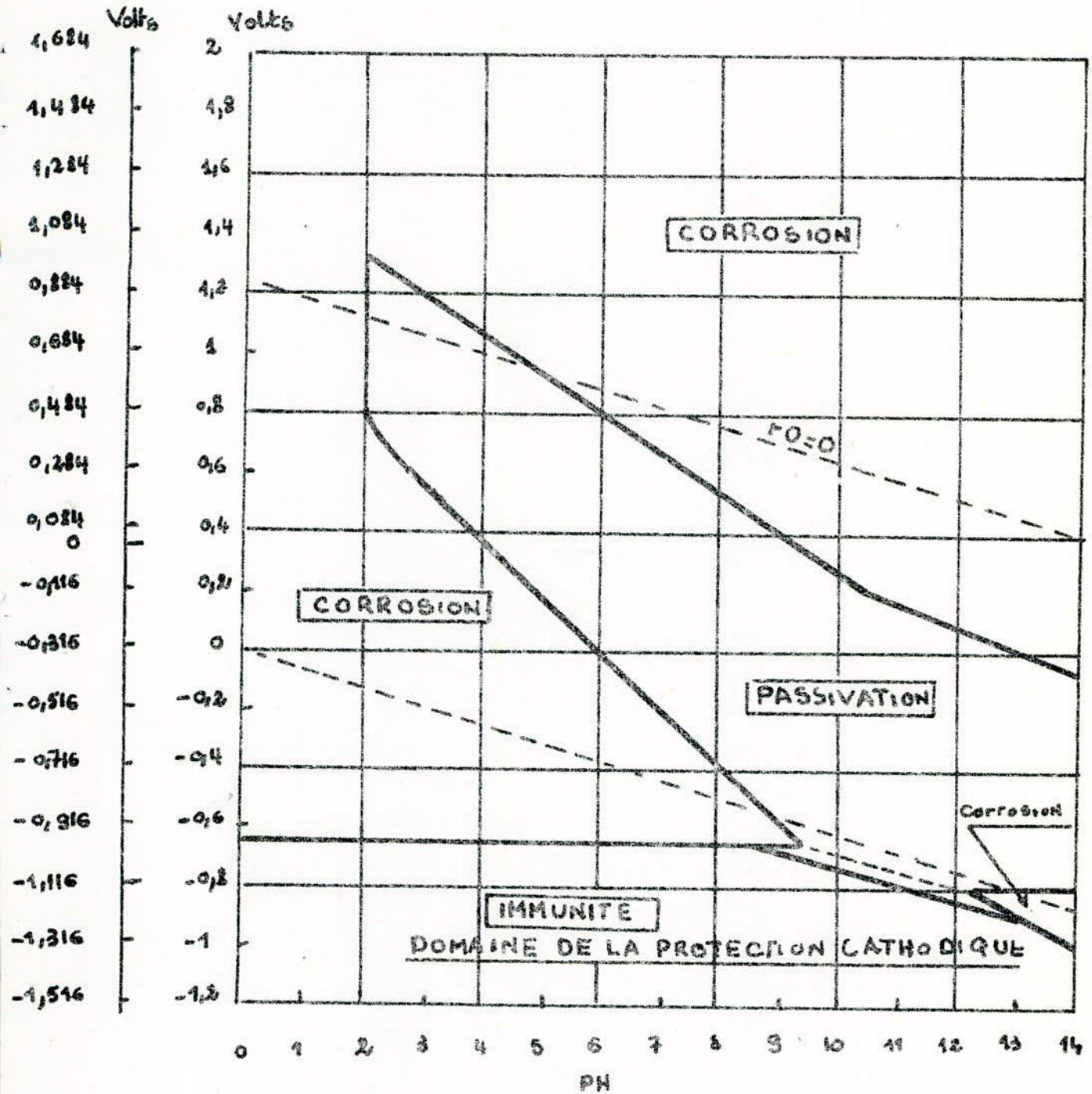


DIAGRAMME DE CORROSION - SYSTEME FER/EAU

Figure III.5

IV METHODES DE PROTECTION CONTRE LA CORROSION

Nous venons d'étudier les différentes causes de corrosion électrochimique. Connaissant les causes, il est maintenant relativement facile d'y ramener un remède. L'ensemble causes et remèdes constitue la protection cathodique. Nous avons vu également qu'un ouvrage soumis à la corrosion se chematise en une Anode qui se corrode et une cathode. La suite de cet exposé est la technique qui consiste à rendre l'ouvrage cathode.

I.°) PROTECTION PASSIVE :

I.1. REVÊTEMENTS :

Pour qu'il y ait corrosion, il faut qu'il y ait pile dans le cas de corrosion électrochimique ou simplement contact entre conduite et sol dans le cas de corrosion chimique.

Il est impossible d'éliminer l'électrolyte qui est le sol ou les électrodes (TUYAU). Le premier principe de protection consiste à isoler la conduite de l'électrolyte en plaçant le tuyau dans un fourreau isolant. Ce sont les revêtements.

On utilise les revêtements de classe " C " qui consistent en une couche de Carbo-lac posée sur la conduite propre et une ou deux couche de soie de verre imprégnée de Carbo-last. Ce revêtement a une résistance de 10.000 à 50.000 Ω/m^2 . Suivant l'épaisseur. La température de pose doit être voisine de 15°C

Il existe également des revêtements plastique qui ont un pouvoir isolant important. Le revêtement isolant maintient au moindre frais le potentiel négatif nécessaire à la protection. Il permet aussi des économies de courant, d'entretien ou d'anodes solubles, ainsi la réduction du nombre de postes en augmentant la portée efficace de ceux-ci, il évite également les interactions entre la conduite protégée et les ouvrages métalliques enterrés au voisinage. Les différents types de revêtement sont :

Les revêtements à froid :

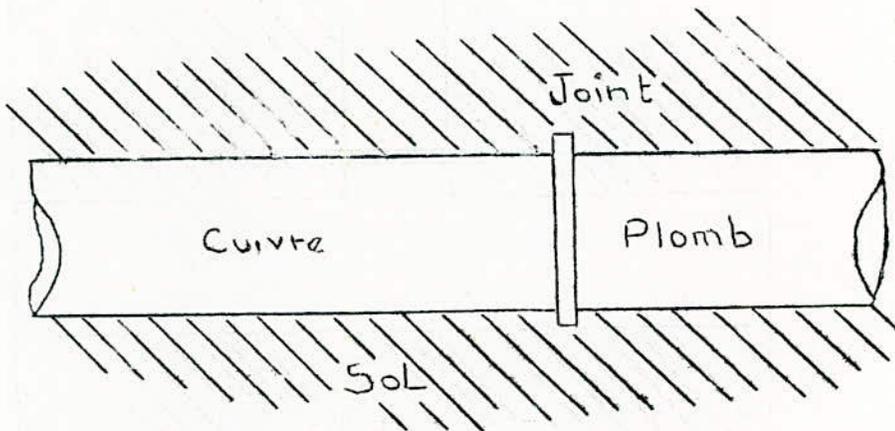
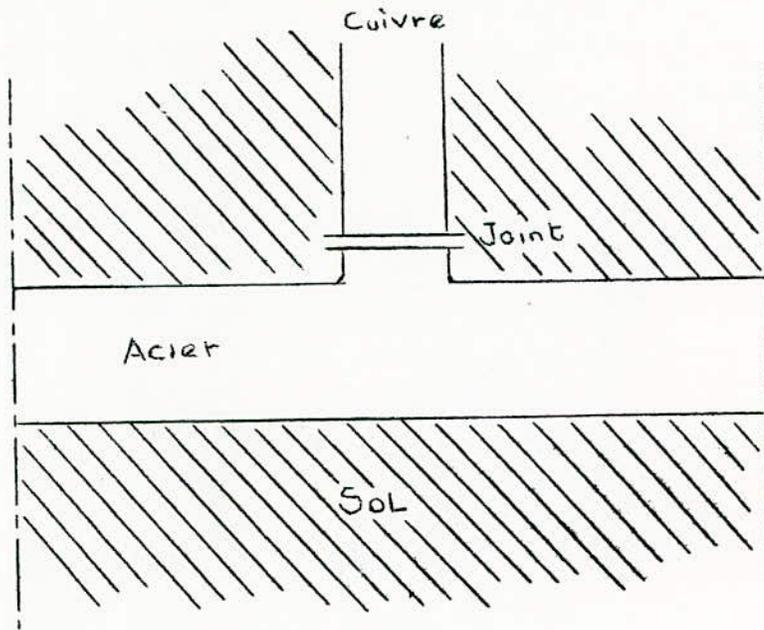
- Peintures bitumineuses minces
- Peintures bitumineuses épaisses
- Peintures brai époxy
- Bandes grasses
- Bandes plastiques auto adhésives
- Bandes plastiques à primer adhésif épais

Les revêtements à chaud :

- Brai de houille
- Bitume de pétrole

I.2. JOINTS ISOLANTS :

Nous avons vu que deux éléments de conduite différentes placées dans le sol étaient le siège d'une pile et que l'une des deux conduites était l'Anode du système pour éviter la circulation du courant dans un sens ou l'autre, il suffit de couper électriquement la conduite en y plaçant un joint isolant, à l'air le joint est nu. Dans le Sol, le joint doit être enrobé de la résine ou du brai. (Figure IV.1.)



(Figure IV.1)

2°). PROTECTION ACTIVE.

2.1. PROTECTION PAR ANODE REACTIVE :

Pour abaisser le potentiel d'un métal par rapport au sol, on peut le réunir à un métal plus électro-négatif que lui dans le milieu considéré. On crée ainsi une pile dont la structure à protéger est la cathode.

Donc si l'on connecte à une structure en acier un métal plus électro-négatif, le magnésium par exemple, l'ensemble va prendre un potentiel moyen entre celui de l'acier et celui du magnésium.

Il suffit de mettre un nombre d'Anodes suffisants pour que le potentiel moyen de l'ensemble atteigne le potentiel de protection de l'acier soit - 0,85 v mesuré par rapport à l'électrode Cu/SO_4 Cu

2.2. PROTECTION PAR SOUTIRAGE DE COURANT :

Le potentiel d'une structure peut être abaissé par rapport au milieu en la connectant au pôle négatif d'une source de courant continu dont le pôle positif est relié à une Anode déservoir, Cette Anode devra présenter une masse suffisamment importante, si elle est métallique pour avoir une durée de vie acceptable.

2.3. PROTECTION PAR DRAINAGE DES COURANTS VAGABONDS :

La protection par drainage consiste à diriger les courants vagabonds émis par les réseaux de voies ferrées par exemple, et à les ramener à leur source par un chemin préférentiel, de la plus faible résistance possible en créant une liaison entre les deux structures. On évite ainsi la sortie des courants de la structure vers le sol.

Il est impératif que la connection soit faite sur un conducteur négatif par rapport au sol. Un rail de SNCF pouvant devenir très positif dans certaines conditions de charge, on utilise une liaison polarisée permettant le passage du courant uniquement dans le sens structure-rail.

V

PRINCIPE DE LA PROTECTION CATHODIQUE

On considère une pile constituée par deux métaux de structures différentes plongés dans un électrolyte quelconque.

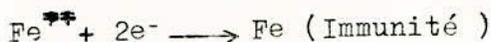
Soit E_A : le potentiel de dissolution de l'Anode dans l'électrolyte considéré

E_C : le potentiel de dissolution de la cathode dans les mêmes conditions.

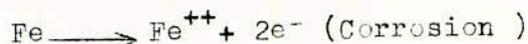
A circuit ouvert et hors polarisation : la force électromotrice de cette pile est :

$$V = E_C - E_A$$

Dans l'électrolyte la cathode est soumise au phénomène de réduction



et l'Anode au phénomène d'oxydation.



La protection cathodique consiste à emmener l'Anode à être siège d'une réduction donc à devenir également cathode.

Lorsque la pile débite un courant i le potentiel de la cathode s'abaisse (le métal s'avelit) et le potentiel de l'Anode s'élève. Le métal s'annoblit. Donc

$$V' = i (R_1 + R_2) + P_c + P_A$$

R_1 et R_2 : respectivement la résistance du circuit extérieur et la résistance de l'électrolyte

P_c et P_A : La polarisation cathodique et anodique.

La force électromotrice de la pile est alors ; en débit

$$V' = (E'_C - E'_A) < V$$

Lorsque i augmente

$$E'_C - E'_A \text{ tend vers zéro et à la limite } E'_C = E'_A = E_0$$

E_0 est le potentiel d'équilibre anode cathode

I_m : Courant correspondant est appelé courant maximum de Corrosion

Dans l'électrolyte le courant I_m sort de l'Anode et entre dans la cathode. On peut construire les courbes représentatives de la variation des potentiels de l'Anode et de la Cathode en fonction du courant i (Figure V.1) Dans la pratique les systèmes Anode cathode considérés étant généralement dans un état voisin de l'équilibre, nous admettons que la pile est en cet état.

Relions alors son circuit extérieur à une source électrique négative soit à l'aide d'un générateur, soit à l'aide d'une électrode R plongée dans l'électrolyte commun et constitué par un métal nettement moins noble que ceux des électrodes de la pile considérée.

Si cette liaison est munie d'une résistance variable, on constate que plus le courant I qu'elle débite croît, plus le potentiel d'équilibre E_0 s'abaisse. Le tableau ci-dessous indique les différents cas qui se produisent au fur et à mesure que le courant appliqué I augmente.

Courant appliqué par l'anode auxiliaire	COURANTS			Potentiel d'équilibre successifs
	Entrant dans la cathode	Sortant de l'anode	Entrant dans l'anode	
Fig V.2 0	I_m	i_m	0	E_0
Fig V.3 I_1	$I_1 + i_1$	$i_1 < i_m$	0	E_1
Fig V.4 I_A	I_A	0	0	E_A
Fig V.5 I_n	$I_n - i_n$	0	i_n	E_n

Les abaissements du potentiel d'équilibre sont dus à l'apport d'électrons résultant de l'action de la source appliquée (ou de l'Anode additive auxiliaire) Dès que cet apport d'électrons est suffisant pour annuler sur l'Anode tout phénomène d'oxydation (pour un courant I). Le seuil de protection Cathodique est atteint, passé ce seuil, la réduction apparaît.

En d'autres termes, les deux pôles de la pile seront alors devenus dans leur ensemble, Cathode d'une pile, dont l'Anode sera soit celle de la source appliquée, soit l'Anode additive elle-même. C'est sur cette nouvelle Anode que seront reportés les phénomènes de corrosion, alors les deux électrodes de pile considérée seront immunisées (Figure V.6.)

La valeur de E_A est dite critère de protection cathodique. Elle dépend de la nature du métal et de l'électrolyte.

Dans la pratique les structures à protéger cathodiquement et sur lesquelles il s'agit d'appliquer les principes précédents, ont des dimensions, la plupart du temps très importantes. Elles présentent dans le milieu qui les contient des régions globalement anodiques et d'autres globalement cathodiques, cela est dû à toutes les causes d'hétérogénéités inévitables qui existent à la fois dans les structures et dans le milieu. Le potentiel critère est alors non plus le potentiel de l'anode à circuit ouvert, mais le potentiel de la partie la plus anodique de l'Anode à circuit ouvert.

CRITERE DE PROTECTION CATHODIQUE :

On appelle critère de protection cathodique le potentiel au dessous duquel le métal considéré, plongé dans un électrolyte donné ne peut se corroder. Le critère protection cathodique d'un métal est la valeur du potentiel pris par ses régions anodiques spontanément dans une solution et mesuré en absence de tous phénomènes de polarisation ; C'est donc le potentiel de dissolution du métal dans la solution considérée.

-Cas du fer dans l'eau :

Le potentiel de dissolution dans l'eau pure est donnée par la formule de NERNST.

$$E = -0,44 + \frac{0,059}{2} \log [Fe^{++}]$$

[Fe⁺⁺] concentration minimal en Ions Ferreux.

TABLEAU V.I.

-Cas du fer dans l'eau de mer :

Le fer en eau de mer ne se corrode pas sensiblement s'il est porté a un potentiel $E = -0,850 \text{ V}$ mesuré avec l'électrode de référence au chlorure d'argent, ce qui correspond à $- 0,562 \text{ V}$ par rapport à l'Hydrogène .

Cas du fer dans le sol :

Comme dans le cas du fer plongé dans l'eau de mer, les considérations sur la complexité du sol en tant que structure, Aération montre que le critère de protection cathodique dans le sol ne peut être défini par une valeur absolue théoriquement.

concentration minimal en Ions Ferreux.

TABLEAU V.I.

-Cas du fer dans l'eau de mer :

Le fer en eau de mer ne se corrode pas sensiblement s'il est porté a un potentiel $E = -0,850 \text{ V}$ mesuré avec l'électrode de référence au chlorure d'argent, ce qui correspond à $- 0,562 \text{ V}$ par rapport à l'Hydrogène .

Cas du fer dans le sol :

Comme dans le cas du fer plongé dans l'eau de mer, les considérations sur la complexité du sol en tant que structure, Aération montre que le critère de protection cathodique dans le sol ne peut être défini par une valeur absolue théoriquement.

CONCENTRATION EN IONS Fe^{++} (mg/l) EN FONCTION DU POTENTIEL

D'ELECTRODE RAPPORTEE AUX DIFFERENTES REFERENCES.

Concentration en ions Fe^{++} par litre	mg de Fer en solution par litre	potentiel par rapport aux diverses électrodes de référence (25°C)				observations
		hydrogène	Calorel KCl sat	argent chl d'Ag	cuivre sulfate Cu/Sn	
10^2	5600 000	-0,38I	-0,622	-0,669	-0,697	Valeurs théoriques sans intérêt pratique NBS seuil de la protection cathodique Calcul théorique thermodynamique Valeurs souvent appliquées pour assurer toute sécurité
10^1	560 000	-0,41I	-0,652	-0,699	-0,727	
10^0	56 000	-0,440	-0,68I	-0,728	-0,756	
10^{-1}	5 600	-0,470	-0,71I	-0,758	-0,786	
10^{-2}	560	-0,500	-0,74I	-0,788	-0,816	
10^{-3}	56	-0,529	-0,770	-0,817	-0,845	
10^{-4}	5,6	-0,558	-0,799	-0,846	-0,874	
10^{-5}	0,56	-0,588	-0,829	-0,876	-0,904	
10^{-6}	0,056	-0,617	-0,858	-0,905	-0,933	
10^{-7}	0,0056	-0,647	-0,888	-0,935	-0,963	
10^{-8}	0,00056	-0,659	-0,900	-0,947	-0,975	
10^{-9}	0,000056	-0,676	-0,917	-0,964	-0,992	
10^{-10}	0,0000056	-0,706	-0,947	-0,994	-1,022	
potentiels des électrodes par rapport à l'hydrogène		0	+0,24I	+0,288	+0,316	

(TABLEAU V . I)

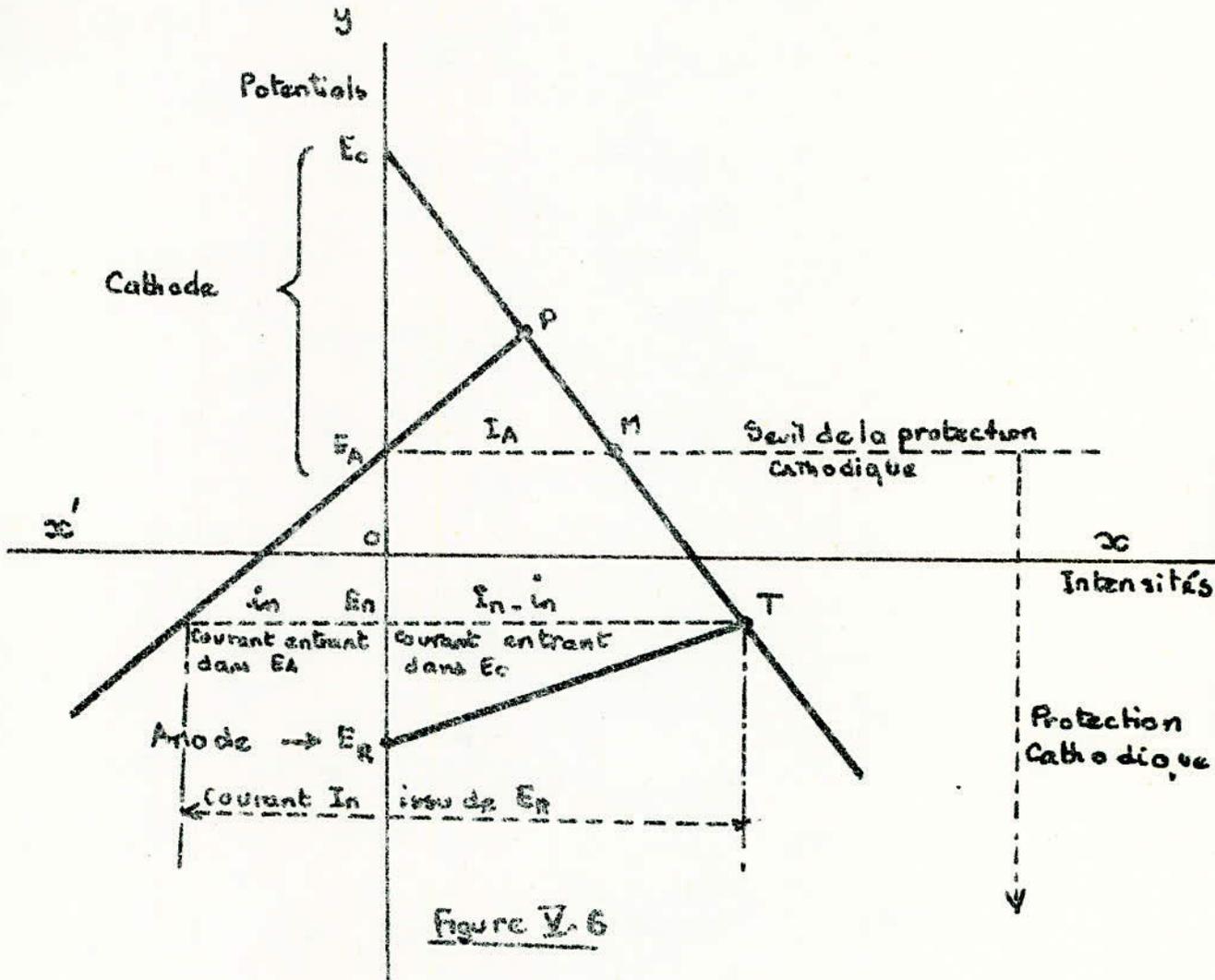


Figure V.6

DIFFERENTES TECHNIQUES DE PROTECTION CATHODIQUE

I°) SOUTIRAGE DE COURANT :

I.1. PRINCIPE : l'abaissement de potentiel des canalisations à la valeur portant le fer en phase d'immunité est obtenu en connectant le réseau, en un ou plusieurs de ces pints au pôle négatif d'une source électrique de courant continu. Généralement on ne dispose que de courant alternatif, donc il est nécessaire de transformer le courant alternatif du secteur basse tension, en courant continu à l'aide des redresseurs.

- La borne négative du redresseur est reliée au réseau de conduite à protéger.

- La borne positive du redresseur est reliée à une masse métallique enterrée, ou anode sacrificielle et sur laquelle la corrosion sera reportée.

Le courant continu venant de l'anode deservoir traverse le sol, puis rentre dans la conduite à travers le revêtement créant entre le sol et la conduite une chute de tension qui rend la conduite négative par rapport au sol. Les rentées de courants diminuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne du poste de soutirage donc il faut qu'aux points extrêmes (Par rapport au poste de soutirage) on obtient le potentiel minimal de protection du métal considéré. (Figure VI.I).

I.2. CONSTITUTION DE L'INSTALLATION :

Une installation de soutirage de courant comprend :

- le branchement basse tension qui a son origine habituellement à un poteau de ligne et qui aboutit aux bornes d'entrée du redresseur.

- Un coffret contenant : le compteur, le disjoncteur, le redresseur

- Le conducteur de liaison de la prise de terre au borne positive du redresseur

- Le Conducteur de liaison de la conduite au borne négative du redresseur.

- La Prise de terre

I.3. CHAMP D'APPLICATION DU SOUTIRAGE

- Le soutirage de courant s'emploi chaque fois que l'intensité nécessaire à la protection est importante.

- Conduites enterrées revêtues dont la longueur dépasse quelques kilomètres.

- Conduites enterrées non revêtues ou dont le revêtement est mauvais

- Casings de forage.

- Structure marine importante dont le revêtement n'est pas possible

- Conduites sous marines revêtues ou non

I.4. CHOIX DE L'EMPLACEMENT DU POSTE DE SOUTIRAGE :

Le meilleur emplacement pour un poste de soutirage est celui qui permet d'assurer la protection la plus efficace sur la plus grande portée pour une puissance minimale.

Les paramètres qui interviennent sont :

- La forme générale et sa longueur.

- Le diamètre des conduites (là où le diamètre est le plus important pour avoir une bonne conductibilité longitudinale afin de diminuer le nombre de redresseur apposés).

- Le degré d'agressivité des sols ou les conduites sont posées

- Le ou les points les plus favorables pour l'installation de la prise de terre .
 - La proximité des lignes basse tension .
 - L'encombrement du sous-sol en structures diverses.
- Il est bon d'examiner, tout d'abord le plan d'ensemble du réseau afin d'en déduire les emplacements les plus indiqués.

1.5. ETABLISSEMENT DES SOUTIRAGES :

La protection cathodique par soutirage de courant se définit par deux paramètres.

- La densité de courant nécessaire à la protection .
- Le débit de l'appareil de protection (Figure VI.2)

1.5.1. La densité de courant nécessaire à la protection : est fonction des caractéristiques d'isolement de la structure à protéger (Qualité du revêtement, résistivité du milieu environnant).

1.5.2. Le débit de l'appareil : est uniquement fonction des caractéristiques de l'installation réalisée :

Le débit

$$I = \frac{V}{R}$$

V : Tension de la source de courant continu
R : Résistance du circuit

La résistance du circuit en général conditionnée par la résistance de l'Anode déversoir.

1.5.3. Le courant nécessaire à la protection d'une structure : devra être déterminée par un essai de soutirage.

par exemple : on installe un soutirage provisoire en utilisant des batteries comme sources de courant, et une autre structure enterrée ou immergée comme Anode déversoir provisoire.

On vérifie le potentiel obtenu en chaque point de mesure. Pour protéger l'ensemble de la conduite, on pourra prévoir soit plusieurs appareils protégeant chacun une distance équivalente à celle de l'appareil d'essai soit un appareil dont le débit est plus important

1.6. METHODE à suivre pour la protection d'une conduite par soutirage de courant :

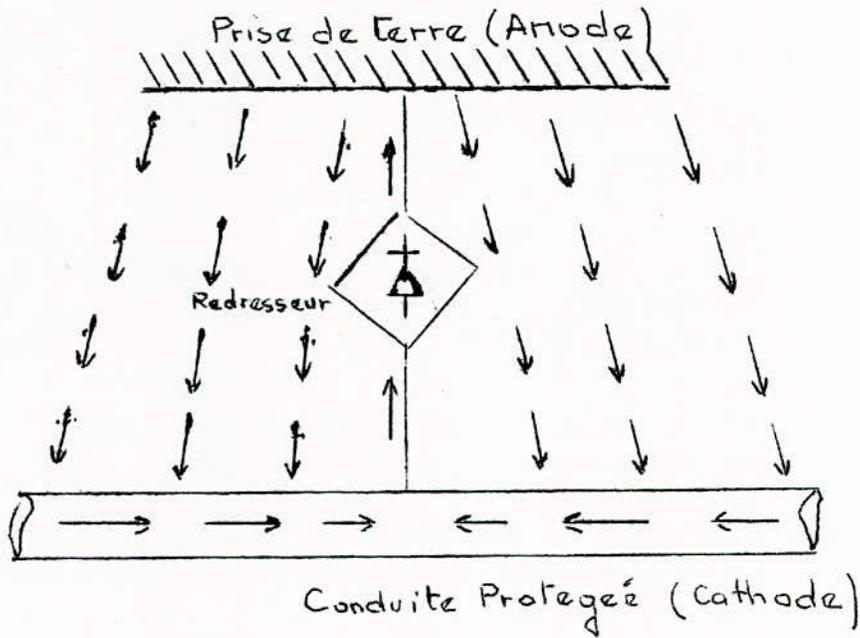
1.6.1. Faire un ou plusieurs essais de soutirage pour déterminer le nombre et le débit des appareils à apposer. Il vaut mieux avoir plusieurs appareils à débit moyen et peu espacés que peu d'appareils éloignés à gros débit.

1.6.2. Rechercher sur le tracé de la conduite les zones ou les impératives suivant sont réunies.

- Terrain de faible résistivité pour l'Anode déversoire.
- Proximité d'énergie électrique basse tension.
- Facilité d'accès pour les véhicules.

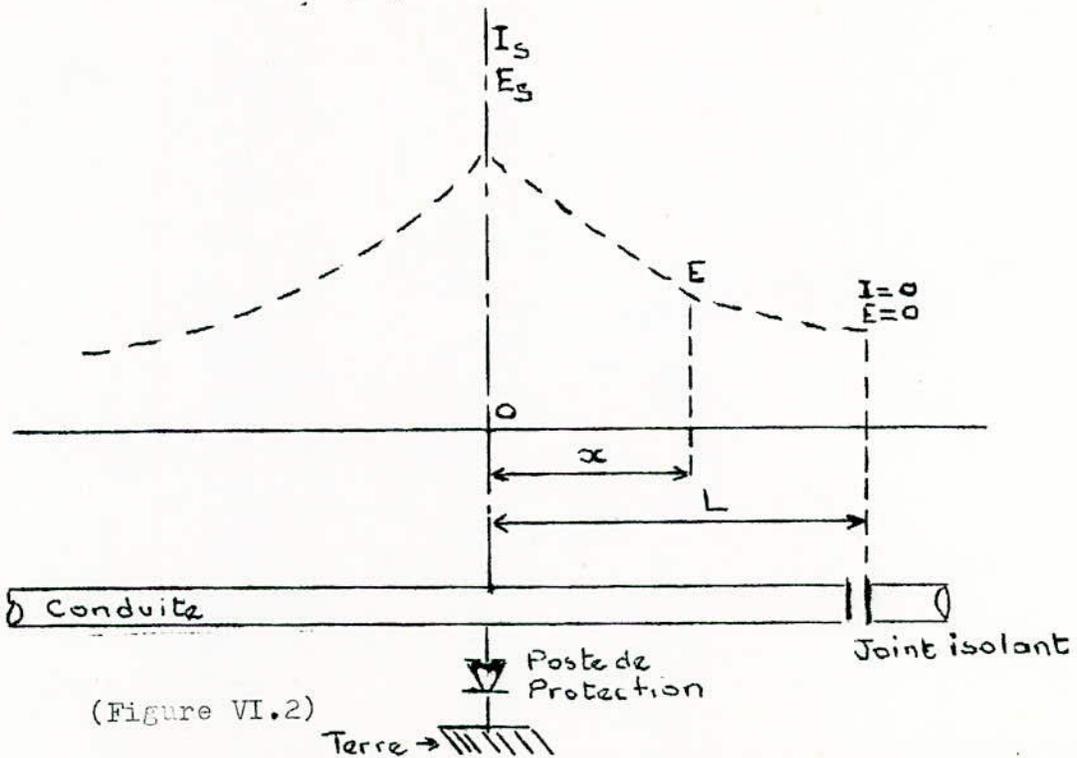
1.6.3. Choisir parmi ces zones celles répondant à l'espacement désiré entre les postes (On n'a pas intérêt à mettre un poste de soutirage à l'extrémité d'une conduite.

1.7. Source de Courant : N'importe quelle source de courant continu conviendra à condition que son débit se maintient dans le temps.



PROTECTION PAR SOUTIRAGE

(Figure VI.1)



(Figure VI.2)

DETERMINATION DU COURANT DE PROTECTION

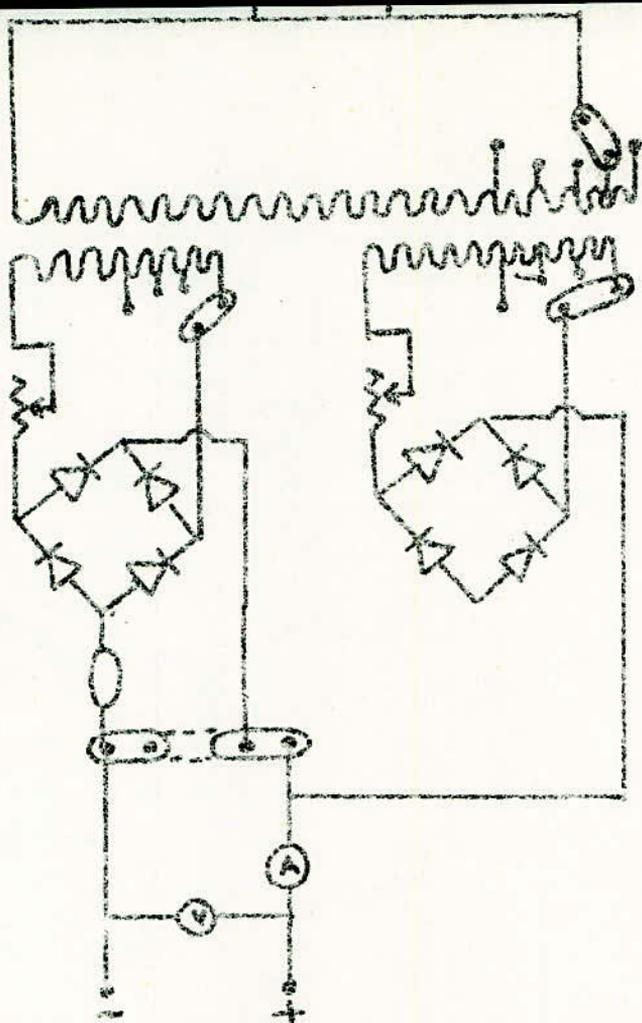
I.7.1. Redresseurs : Ils sont constitués par un transformateur qui abaisse la tension du secteur à celle nécessaire qui est comprise généralement de 6 à 24 V. Un Dispositif à plot ou de barettes permet pour un appareil de puissance donnée toutes les combinaisons possibles d'utilisation. (Figures VI.3 et VI.4.)

Les cellules redresseuses sont en cuivre, oxyde de cuivre, Selenium, ou Silicium ou Germanium. Le Selenium est moins cher, mais il est plus fragile que le Silicium. Les Diodes au Sélénium laissent passer un courant plus faible et supporte également des tensions inverses plus faibles. Alors lorsque la tension de sortie dépasse 6V, et le courant IOA, il faut prévoir des associations de Diodes Sélénium serie parallèles. Par contre une seule Diode au Sélénium dans chaque branche du pont conviendra quelque soit le débit et la tension nécessaire pour la protection cathodique.

I.7.2. Dynamo entraînée par un moteur thermique : On utilise une Dynamo entraînée par un moteur thermique dans le cas où il n'existe pas de possibilité de fourniture électrique. Par exemple dans les Déserts, le moteur thermique peut être alimenté soit directement à partir de la conduite à protéger, soit par une navette qui passe périodiquement remplir un réservoir.

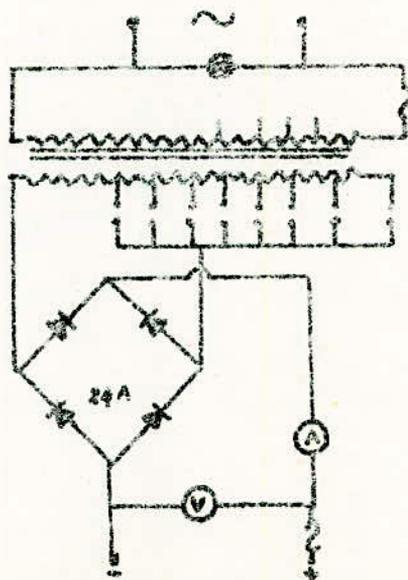
I.7.3. Dynamo entraînée par une éolienne; cette méthode s'emploie également dans le cas où on ne dispose pas d'énergie électrique, dans ce cas étant donné le régime discontinu des vents on accomplit à la dynamo une batterie tampon.

I.7.4. Générateur thermo-électrique : le fluide véhiculé par la conduite sert de combustible dans un brûleur qui chauffe la soudure d'un couple thermo-électrique. La soudure froide est à la température ambiante la puissance recueillie est assez faible (50W). Ces appareils peuvent être accouplés pour obtenir des puissances élevées.



Couplage parallèle des Cellules redresseuses

Figure VI.3



Transformateur a prises secondaires multiple

Figure VI.4

I.8 LES ANODES A COURANT IMPOSES OU DEVERSOIRE

I.8.I DIFFERENT TYPES D'ANODE

ANODES DEVERSOIRES ENTERRES	Ferrailles Rails, tubes en Acier	- Solution économique, mais usure très rapide (9 kg/A/an)
	Graphite	- Peut débiter un courant de 1 à 3 A/m de surface - L'utilisation de Back-fill (poussière de graphite) permet de limiter la consommation d'anode à une valeur très faible. - Très fragile.
	Ferrosilicium ou Ferrosilicium chrome	- Longue durée de vie $0,350 \text{ kg/A/an}$ pour une durée de 10 ans - Approprié aux milieux de faible résistivité 10 à 20 m / m - Peuvent être montées en série sur des câbles spéciaux à haute résistance mécanique.
	Ferraille	- Les vieux rails, tubes, épaves peuvent former une anode économique à condition de pouvoir la remplacer commodément et si possible avec une partie de cette structure à l'air libre sur laquelle sera réalisée la connection. - Totalemment immergées la consommation du fer autour des câbles de connexion est très rapide.
ANODES DEVERSOIRES IMMERGEES	Graphite	- Débit faible 25 mA/dm - Dans les eaux chlorurées, il y a risque de rupture par fissure à cause d'un dégagement intensif de chlore - consommation 200 à 300 g/A/an
	Ferrosilicium ou chrome-mo- lybdène	- Un grand débit, il peut aller jusqu'à 1 A/dm en fait il est prudent de ne pas dépasser $0,2 \text{ A/dm}$ ce qui correspond à une consommation de $0,3 \text{ kg/A/an}$
	Plomb- Argent	- densité de courant admissible est d'environ 1 A/dm - Ce type d'anode se recouvre d'une couche de peroxyde qui est fragile.

I.8.2. Choix de l'Emplacement :

1- Resistance : On prévoit en général une résistance de prise de terre la plus faible possible pour éviter des tensions de soutirage trop importantes.

2- Anodes Horizontales : On a une utilisation hasardeuse si la résistivité du terrain est supérieure à $50 \Omega \cdot m^2/m$

3- Anodes verticales : leur installation est couteuse, elle est recommandée lorsque la résistivité superficielle du sol dépasse $50 \Omega \cdot m^2/m$

4- Localisation et installation :

- L'emplacement de l'Anode doit être déterminé par une étude préalable du terrain et de la structure à protéger.

- La distance entre l'Anode et la structure à protéger ne doit pas être trop faible. Un minimum de 50 m. est conseillé.

- L'Anode doit être orientée perpendiculairement à la direction du réseau à protéger.

I.8.3. Réalisation des Anodes :

1 - Anode horizontale :

- Tranchée de 0,60 m. de large et de 1 à 1,20 m. de profondeur

- Garnissage avec un lit de Coke pour Anode graphite de 0,10 à 0,20 m. d'épaisseur.

- Remplir la tranchée avec une boue de bentonite et de soude qui recouvrira l'Anode.

2. Anode Verticale :

Forage et tubage d'un puits : on peut adopter un tubage épais s'il constitue l'Anode en lui même. On remplit alors la totalité du forage avec une boue de bentonite, on peut également s'en servir du tubage pour descendre des Anodes.

3- Liaison électrique :

La section doit être calculée en fonction de la chute de tension La nature dépend de la résistance mécanique.

2°) PROTECTION PAR ANODE REACTIVE

2.1. PRINCIPE :

La position relative des métaux dans la liste des potentiels normaux d'électrode montre que si l'on veut constituer une pile dont le fer soit cathode on ne peut l'associer qu'avec trois métaux industriels, puis comme Anode : Le Zinc, le Magnésium, l'Aluminium. Pratiquement on utilise actuellement que le Zinc et le Magnésium. Parceque l'Aluminium se recouvre rapidement d'une couche d'Oxyde qui s'oppose au fonctionnement du système.

Pour que la protection existe il faut :

1- que la pile débite, donc que l'Anode soit reliée électriquement à la conduite (Acier).

2- Que la surface à protéger et l'Anode soient plongées toutes les deux dans le même milieu corrsif.

Par exemple la protection de la surface interne d'une conduite n'est pas possible avec des Anodes installées à l'extérieur de la conduite.

2.2. ETUDE DES PROTECTIONS CATHODIQUES PAR ANODES REACTIVES :

Pour protéger cathodiquement une structure enterrée ou immergée l'expérience enseigne que les densités de courant habituellement nécessaires peuvent être évaluées comme l'indique la première colonne du tableau VI-1 Ces valeurs n'ont aucun caractère absolu. Les conditions locales particulières jouent un rôle dans leurs déterminations.

Le débit des Anodes est fonction :

- De la Résistance de terre du réseau (Qualité du revêtement, qualité de pose, âge du réseau, des accessoires....)
- De la resistivité du sol aux points considérés.

Pour que le fonctionnement des Anodes soit satisfaisant, elles ne doivent être posés que dans les sols agressifs, c'est à dire de resistivité n'exédent guère ($50\Omega.m$). Le nombre d'Anodes nécessaires à la protection d'une conduite est donnée par la relation

$$N = \frac{S.i}{I}$$

S : Surface de la Conduite

i : Densité de courant nécessaire à la protection

I : Débit probable de l'Anode.

Les Anodes sont posées à 3 ou 4 mètres des ouvrages et placées verticalement dans un mélange " Régulateur de corrosion " dont le but est de garder une résistance de contact Anode - terre pratiquement constante.

Le mélange régulateur est constitué de bentonite et de Gypse. Pour assurer le bon fonctionnement de la pile. Il faut que la résistance de contact Anode terre soit très fragile (de l'Ordre de I à quelques Ω).

V	R	CR	Surface protéger en eau de mer par dm ² d'Anode	AVANTAGES	INCONVENIENTS	DOMAINES D'UTILISATION
Zn	-1,05 Volt	80%	13 Kg/A/An 2m ² métal nu 8m ² métal protégé par peinture	<ul style="list-style-type: none"> - Prix de l'A/An avantageux - Bon rendement - pas de surcharge à craindre. 	<ul style="list-style-type: none"> - poids élevé - Rayon d'influence limité - encrassement le résidu de corrosion n'est pas conducteur - t° d'utilisation limitée à 50°C - Nécessité de n'utiliser que du Zn Special pour anode 	<ul style="list-style-type: none"> - Surtout utilisé pour protection Cathodique marine - Coques de Navires - Structure marine - ballast.
ALLIAGE D'AL	-1,2 V à -1,5 V	80 à 90%	3 à 4 Kg/A/An 5m ² Métal nu 18m ² métal protégé par peinture.	<ul style="list-style-type: none"> - force électromotrice adaptée en eau de mer - Très bon rendement - Rayon d'influence beaucoup plus important que celui du Zn - pas de surcharge locale - usure régulière - Faible poids - prix de l'A/An le plus bas actuellement 	<ul style="list-style-type: none"> - Risque de polarisation par formation d'alumine si le polarisant n'est pas bien disposé dans l'alliage - Encrassement facile par le fouling 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation bien adaptée au milieu marin. - Capacité de traitement et de stockage.
LE MAGNÉSIUM	-1,0 V à -1,7 V	40% à 60%	6,5 à 8 Kg/A/An 5m ² métal nu 30m ² métal protégé par peinture	<ul style="list-style-type: none"> - Rayon d'influence élevé - Force électromotrice élevée - poids faible 	<ul style="list-style-type: none"> - f.e.m souvent surabondante pour la protection en eau salée - rendement moyen en eau de mer - surcharge locales chaque fois que la peinture autour de l'anode - coût élevé 	<ul style="list-style-type: none"> - Il est conseillé de ne pas prévoir une anode de magnésium pour une durée de vie supérieure à deux ans son rendement diminuant dans le temps.

CARACTERISTIQUES DES RESEAUX ENTERES OU IMMERGES	DENSITE DE COURANT DE PROTECTION NECESSAIRE i par $\frac{mA}{m^2}$ (I)	RESISTIVITES DES	SOLS
		TRES BASSE	BASSE
		DEBIT DES ANODES	
		mA	mA
-Conduites nues.....	30 à 40	750 à 1500	500 à 1000
-Reseaux de canalisation ancien tres degrades.....	10 à 20	500 à 900	350 à 700
-Reseaux de canalisation neufs ou en bon etat, tres ramifies ou tres emailles, avec de nombreux regards non etanches de nombreuses vannes et acce- ssoires mal isoles du sol.....	1 à 5	50 à 400	100 à 250
-Reseaux de canalisations neufs ou en bon etat de traces sim- ples, avec peu de branchement ou d'accessoires bien isoles du sol.....	0,01 à 0,5	20 à 100	10 à 50

TABLEAU VI-1

3°) DRAINAGE DE COURANT

Les problèmes posés par la protection contre les courants vagabonds sont souvent les plus difficiles à résoudre, particulièrement en raison de l'instabilité de ces courants. Le principe de la protection consiste à établir des dispositifs de drainage des courants. C'est à dire à substituer au circuit d'électrolyse canalisation-sol un circuit métallique à sens unique, permettant le retour sans danger du courant circulant dans la canalisation vers sa source d'origine.

3.1. DETECTION DES COURANTS VAGABONDS :

Les courants vagabonds peuvent varier suivant des intervalles de temps longs ou courts en fonction des charges variables de la source d'énergie contrairement aux courants de protection anodique ou cathodique qui sont relativement stables. Ainsi en enregistrant le potentiel d'un système se corrodant par rapport à une électrode de référence, et en considérant une période de 24 heures. Les courants peuvent parfois être détectés et leur origine déterminées. Les variations des charges du générateur jour-nuit étant parallèles aux variations du potentiel mesuré.

Si les courants indiqués sont plus importants de 7 à 9 heures puis à nouveau de 16 à 18 heures on peut supposer la présence d'une ligne de chemin de fer.

Si on soupçonne la présence d'une interférence avec la protection cathodique, on peut fermer, puis ouvrir le courant de protection à des intervalles réguliers et observer si le potentiel de la structure corrodée augmente à la même fréquence.

La quantité de courant sortant (ou pénétrant) d'une canalisation enterrée à quelque source que ce soit peut être calculée en mesurant la différence de potentiel entre un point de la surface du sol situé directement au dessus de la canalisation et un point de la surface du sol à une certaine distance et à angle droit par rapport à la canalisation.

$$\Delta V = \frac{I \rho}{2\pi} \ln \frac{y^2 + h^2}{h^2}$$

ΔV : Différence de potentiel
 ρ : Résistivité
 r : Rayon de la canalisation
 h : Profondeur de la canalisation
 y : la distance au sol

3.2. PHENOMENES ELECTRIQUES LIES AUX VOIES FERREES ELECTRIQUES :

La source de courant continu, dénommée sous-station est reliée par son pôle positif à un conducteur aérien (catenaire) et par son pôle négatif à un conducteur posé sur le sol. (Rail).

Théoriquement cet ensemble est isolé du sol, le pôle négatif n'est pas mis à la terre, les rails sont posés sur le sol par l'intermédiaire de traverses et de balast.

Mais cet isolement n'est pas parfait, en particulier la résistance d'isolement Rail-Sol n'est pas infinie et la tension qui existe entre rail et Sol permet à une certaine quantité de courant de s'échapper vers la terre.

La terre dans son ensemble constituant un conducteur de très faible résistance. Ces courants n'ont aucune peine à revenir vers la source émettrice. Le courant utilisé par la motrice retourne à la sous-station en majeure partie par les rails et produit dans ceux-ci une chute de tension qui n'est pas négligeable. La partie de courant empruntant le sol y crée des gradients de potentiels, il apparaît ainsi entre les rails et le sol environnant des tensions variables, on alors 2 Zones.

- Au droit de la motrice et jusqu'à une certaine distance de la sous-station, la voie est positive par rapport au sol et les rails émettent de des courants.

- A partir de cet endroit et jusqu'au droit de la sous-station la voie est négative par rapport au sol et les rails émettent du courant

Ces différentes zones se répètent pour **Chaque** sous-station et se modifient suivant la présence d'une ou de plusieurs motrices sur la voie

Si une canalisation enterrée longe ou coupe une voie ferrée électri-
fiée dans une zone où le rail est alternativement positif ou négatif,
elle sera soumise au champ électrique produit par le système rail-sol de
sorte que les courants.

- entrent dans la conduite pendant les périodes de voies positives.
- sortent de la conduite pendant les périodes des voies négatives.

En installant une liaison directe avec la voie dans cette zone on drainera vers la voie les courants qui sortent des conduites (Voies négatives), mais on aisera l'entrée des courants (voie positive) qui pourront sortir ailleurs en corrodant la canalisation

3.3. REALISATION DES APPAREILS DE DRAINAGE :

Tous les appareils de drainage comportent généralement:

- Un dispositif assurant la fonction unidirectionnel de l'appareil
- Des sécurités contre les surintensités et les surtensions
- Un dispositif permettant de limiter les courants de drainage
- Accessoires des appareils de mesure indicateurs des paramètres instantanés de fonctionnement.

Le raccordement à la voie ferrée se fait dans tous les cas par l'intermédiaire d'une armoire fournie et elle comprend :

- Un fusible 1500 V calibre en fonction des caractéristiques de drainage.
- Un éclateur 1500 V branché entre le rail et la terre.
- Une self inductance éliminant les courants alternatifs à fréquence industrielle.

3.3.1. DRAINAGE A AIMANT :

La conduite est reliée au Rail par l'intermédiaire d'une cellule au Sélénium, lorsque le rail est négatif le courant I qui passe dans ce circuit traverse la bobine A.

Pour $I \geq 5$ A cette bobine établit le contact direct entre conduite et rail par l'intermédiaire du contacteur C.

Le tableau de lampe D permet de réguler le courant I. La résistance des lampes à incandescence augmente avec le courant, qui les traverse. On peut ainsi éviter des courants trop importants. Le nombre de lampes permet de limiter l'intensité maximale.

Le Shunt S permet la mesure des courants.

Le fusible F sert de sécurité à maximum d'intensité.

Le relais de tension G protège la valve B en ouvrant le circuit lorsque la voie devient positive.

Ce dispositif est peu sensible et fragile car les cellules au Sélénium ne supportent ni les surintensités ni les tensions inverses supérieures à quelques volts. (Figure VI.7.)

3.3.2. DRAINAGE A CELLULES SILICIUM : (brevet GDF) Figure VI.8.

La conduite est reliée au Rail par l'intermédiaire d'une diode redresseuse au Silicium A. Le courant ne peut passer que dans le sens conduite Rail. La tension d'amorçage du Silicium étant d'environ 0,700V, on utilise pour drainer lorsque la tension conduite rail est plus faible une diode au germanium D protégée par une résistance ou lampe fusible.

Un éclateur E protège les cellules contre les tensions des voies ferrées trop positives.

Cet appareil est très simple et ne comporte que des dispositifs statiques, donc il est très pratique.

Actuellement les fabricants réalisent des cellules au silicium pouvant débiter jusqu'à 200 ampères et pouvant supporter une tension inverse de 1200 V. Cependant la diode Germanium est très fragile, elle ne comporte ni sur tension, ni sur intensité.

3.3.3. DRAINAGE A CONTACTEUR ET RELAIS.

Un relai voltmétrique polarise R est branché entre conduite et Rail lorsque la tension est égale à la tension de déclenchement (réglable)

Ce relai provoque la fermeture du contacteur C. La conduite est alors directement reliée au Rail.

Lorsque le rail devient positif par rapport à la conduite le courant a tendance à s'inverser et le ~~relai~~ ampèremétrique G fait ouvrir le contacteur.

Un compteur Ah(ampère - heure) est branché dans le circuit, il sert à compter le nombre d'ampères-heures qui traversent l'appareil

3.4. Sauf pendant la période d'enclenchement (le relai est en general réglé entre 0,6 et 0,7 V). la resistance lorsque le contacteur est fermé est a peu pres nulle on peut ecouler tous les courants. cependant les voltmetres et ampermetres sont assez fragiles et couteux. D'autre part ce système nécessite une source extérieure de courant pour l'alimentation du contacteur.

- Il est nécessaire de réaliser les circuits de drainage en cable de gros diamètre (50mm² au minimum) de prévoir des connections et des instruments de mesure robustes. Ceci est d'autant plus important que le circuit de drainage est plus long.(Figure VI.9).

3.5. DOMAINE D'EMPLOI DES DRAINAGES :

Un drainage est prévu pour éliminer les courants vagabonds issus des structures imparfaitement isolées du sol en général voie ferrée, tam-way électriques, cuves d'électrolyse dans certains cas. Son fonctionnement permet du même coup d'utiliser ces courants vagabonds pour la protection cathodique d'une certaine partie de conduite.

4.9) ASSOCIATION DE PLUSIEURS SYSTEMES DE PROTECTION CATHODIQUE :

Il est souvent nécessaire de protéger cathodiquement une structure avec plusieurs éléments : Anodes réactives, Soutirage de courant, ou drainage de courant.

4.1. ASSOCIATION DRAINAGE SOUTIRAGE :

Le drainage de courant , par les intensités qu'il met en jeu permet de réaliser, à peu de frais une protection cathodique efficace dans une Zone ou existent des courants vagabonds. Mais cette protection est incomplète car :

- La marche du drainage est liée à la charge de la sous-station correspondante.

- Par moment l'intensité peut être insuffisante pour assurer la protection cathodique sur toute la zone intéressée.

- Il est souvent nécessaire de diminuer artificiellement le débit du drainage pour éviter d'avoir des potentiels trop négatifs pendant les pointes. Cette régulation est néfaste pendant les faibles débits et la protection n'est plus assurée partout.

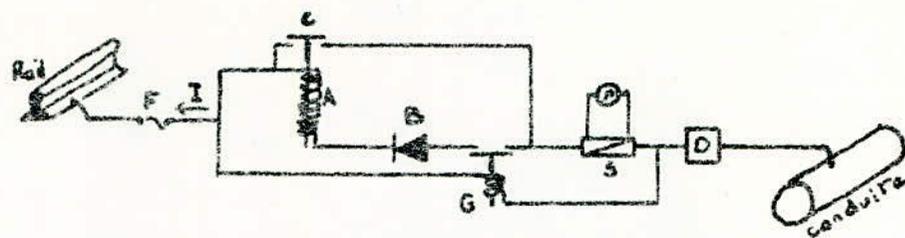
Pour remédier à cela on complète l'action du drainage par un soutirage

- Le drainage fonctionne lorsque la conduite est positive par rapport au rail

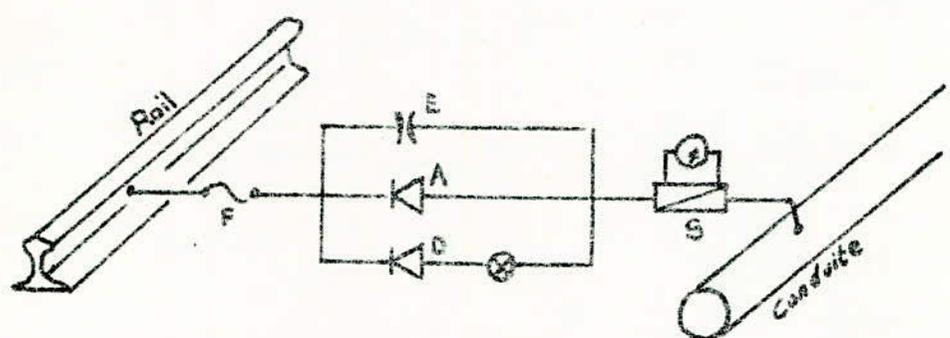
- Le soutirage peut fonctionner sans arrêt , son rôle est de protéger la canalisation lorsque le drainage s'arrête.

4.1.1. DRAINAGE SOUTIRAGE SUR RAIL

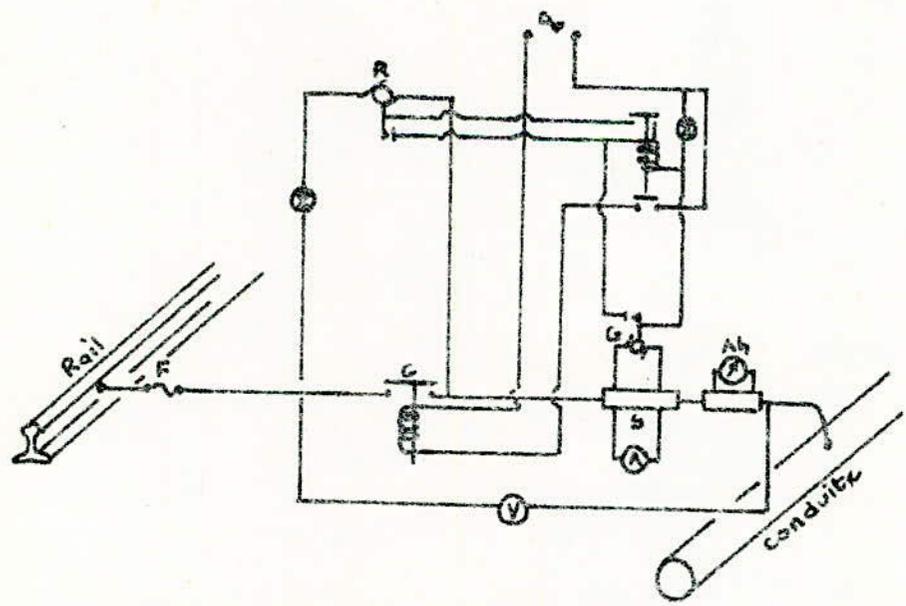
L'Anode déversoir du soutirage est constituée par les rails de la voie ferrée.



Drainage à aimant Figure VI.7



Drainage à Cellule Silicium (brevet G.D.F) Figure VI.8



Drainage à Contacteur et relais (S.N.G.B.O) Figure VI.9

Ce type de protection est à peu près abandonné bien qu'il permette de débiter à peu de frais des courants importants. La régulation en est fragile. Le soutirage sur rail peut injecter du courant monophasé dans le rail et perturber les circuits de télécommande et de sécurité.

4.1.2 DRAINAGE SOUTIRAGE SUR ANODE DEVERSOIRE / (Figure VI.10)

-Si les appareils sont au même endroit on peut les commander par un relais qui permet un fonctionnement alterné de la même façon que pour un drainage, soutirage sur rail. Ceci permet d'économiser de l'énergie en arrêtant le Soutirage pendant que le drainage assure la protection .

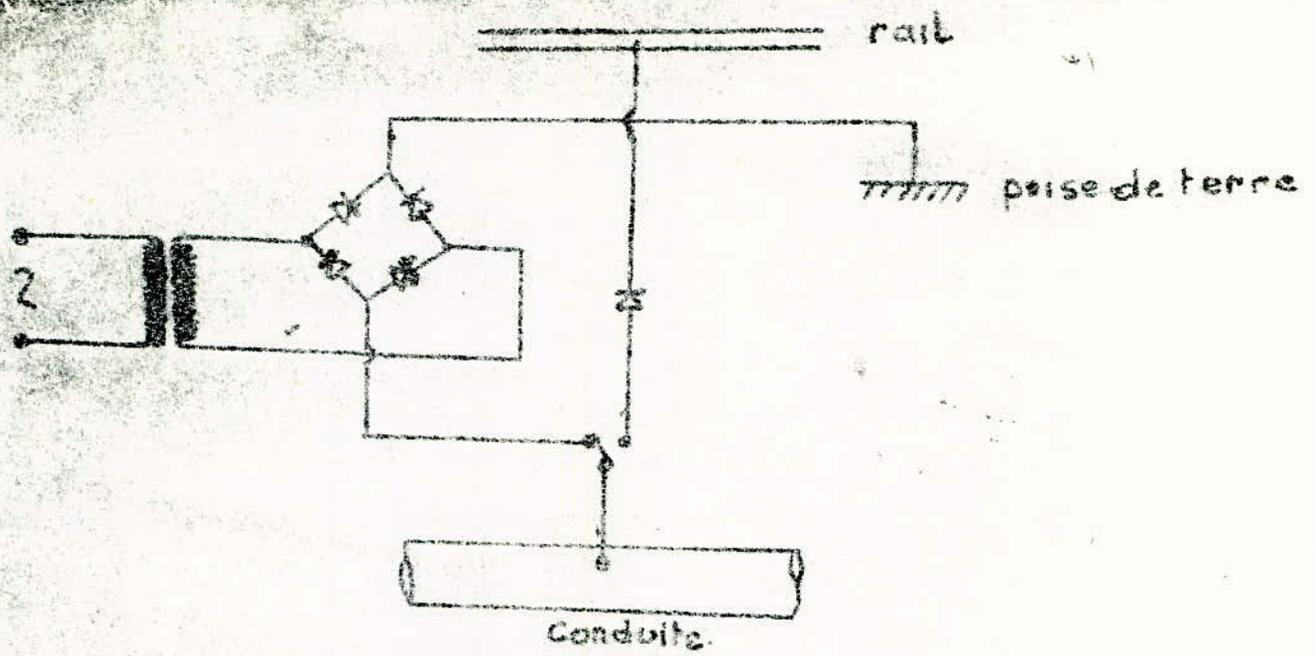
-Si les appareils ne sont pas au même endroit : la même fonction peut être assurée par un relais de tension qui n'enclenche le soutirage que lorsque le potentiel devient insuffisant.

4.2. MONTAGE COMPOUND : (Figure VI.11)

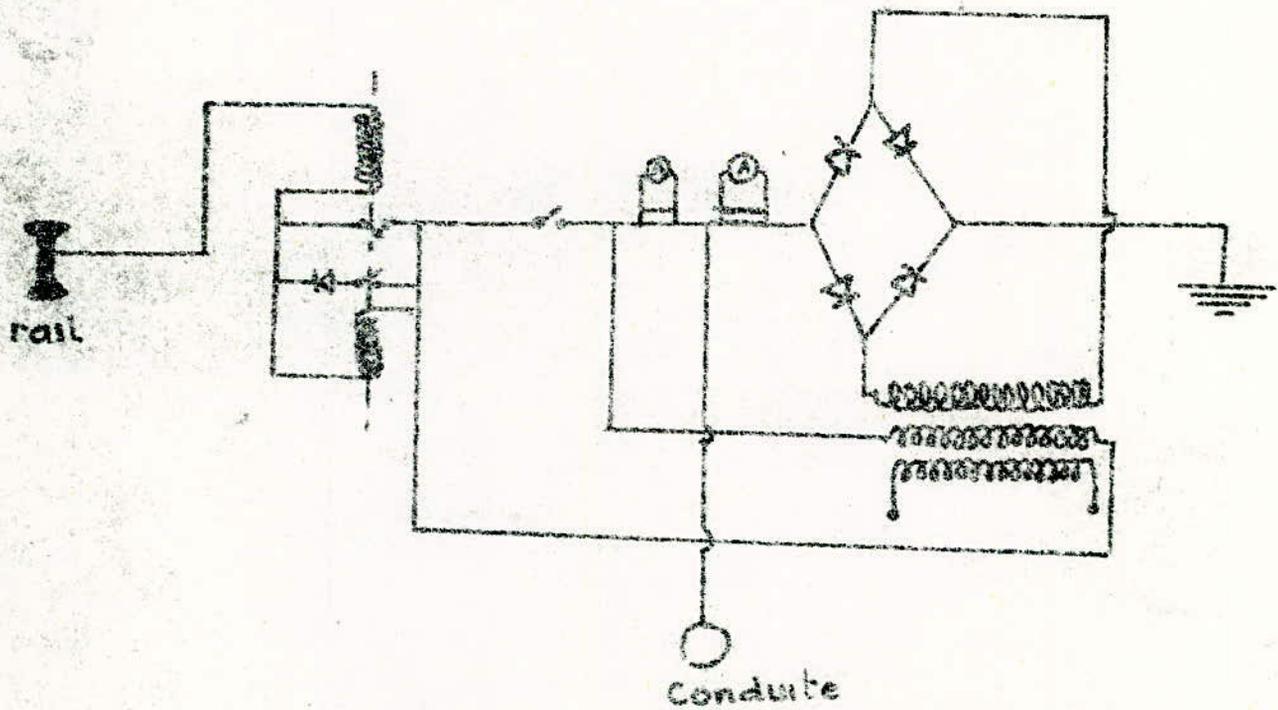
Dans ce montage, le soutirage électrique et le drainage électrique polarisés se relaient continuellement en fonction de la polarité de la voie. Soutirage en période de voie positive, drainage en période de voie négative. De plus le montage en opposition réalise et le troisième enroulement du transformateur écrase le redresseur qui ne débite un courant taxable que lorsque cela est nécessaire.

4.3. ASSOCIATION SOUTIRAGE ANODE REACTIVE.

Lorsque une conduite est protégée par soutirage de courant, il peut arriver qu'une portion de conduite, loin du soutirage ne puisse être protégée par cet appareil, on peut alors prolonger la protection par Anodes réactives dont l'effet sera local et limité.



Soutirage - Drainage Figure VI.30



soutirage - Drainage
Appareil Compound Figure VI.41

VII. METHODES DE CALCULS:

1°) BASE DE CALCULS POUR UNE STRUCTURE LONGILIGNE HOMOGENE

Lorsqu'une source de courant continue est connectée, le pôle positif à une prise de terre et le pôle négatif à un canalisation enterrée Il en résulte une circulation de courant. Celui-ci issu de la prise de terre se répartit dans le sol et retourne dans la conduite. Le passage du courant détermine dans la conduite un abaissement de potentiel.

E_0 et I_0 : chute de potentiel et d'intensité au point de soutirage

E_x : Chute de potentiel au point M d'abscisse x .

I_x : Intensité de courant au même point

r : Résistance électrique longitudinale de la conduite en Ω par mètre linéaire.

R : Résistance transversale de la conduite en Ω par mètre

HYPOTHESES DE CALCULS :

a) nous admettons que la prise de terre est très éloignée de la canalisation, donc les chutes de potentiel sont mesurées en dehors du champ de celle-ci.

b) Nous négligerons la résistance du sol. On admet que celle-ci est constante sur toute la longueur de la canalisation intéressée par le calcul.

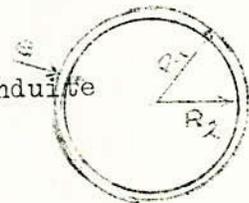
c) La résistance transversale R de la conduite a une forte influence sur les résultats numériques, et est généralement très mal connue. Elle dépend : de la nature du sol, de la qualité d'exécution de la pose du temps depuis lequel la conduite est en service, de la qualité initiale du revêtement et de sa constance le long de la conduite.

I. I. CALCULS DES RESISTANCES :

I. I. I. RESISTANCE LONGITUDINALE r

c'est une résistance linéaire, elle est exprimée en $\Omega \cdot m^{-1}$ et elle est supposée constante le long de la conduite.

$r = \frac{\rho_c}{S}$ avec ρ_c = Résistivité du métal
 S = Section transversale de la conduite



$$r = \frac{\rho_c}{\pi R_1^2 - \pi(R_1 - e)^2} = \frac{\rho_c}{2\pi e R_1 - \pi e^2}$$

$$r = \frac{\rho_c}{\pi e (\Phi - e)} \quad (I)$$

I.1.2. RESISTANCE DES ELECTRODES ENTERREES :

Si l'on place deux morceaux de métal dans un électrolyte quelconque ou dans le sol, on peut mesurer la résistance qu'ils offrent entre eux. Cette résistance est la somme de trois composantes.

- La résistance métallique des morceaux de métal : cette résistance est faible.

- La résistance à l'interface : Cette résistance dépend du revêtement utilisé. Si on a un revêtement en graisse ou avec de la peinture, la résistance à l'interface est importante. Pour l'Acier nu : la résistance à l'interface est très faible.

- La résistance de l'électrolyte. cette résistance est très importante. Si on connaît la résistivité ρ de l'électrolyte donc la résistance transversale peut être déterminée par la formule de DWIGHT.

On considère l'analogie électrique de deux corps métalliques immergés dans un électrolyte de résistivité ρ et de résistance R , maintenant une différence de potentiel V . Donc il circule un courant. $I = \frac{V}{R}$

, il existera en tous points de l'électrolyte une intensité électrique qui correspond exactement à celle qui existerait par suite de la présence de deux charges électrostatiques $+Q$ et $-Q$ sur des corps semblables dans le vide.

Si la capacité électrostatique entre ces deux corps dans le vide est C la résistance entre eux dans l'électrolyte est donnée par la formule

$$R = \frac{\rho}{4\pi C}$$

Cette condition est toujours valable si l'un des corps est infiniment mince et enveloppe totalement l'autre.

Si l'on donne au corps enveloppant un diamètre infini on considère la cas particulier de deux corps dans l'un est l'image de l'autre par rapport à un plan.

$$R_T = \frac{\rho}{4\pi C_1}$$

C_1 : Capacité totale par rapport à l'infini.

La résistance de chacun calculée à partir de leur potentiel commun et du courant qui circule dans chacun des deux séparément sera

$$R = \frac{\rho}{2\pi C_1}$$

La disposition étant symétrique par rapport au plan on peut enlever l'image de la conduite par rapport au sol. Donc le raisonnement est toujours le même, on a alors la représentation d'un corps unique plongé dans un électrolyte semi-infini.

Sa résistance par rapport à l'infini sera

$$R_1 = \frac{1}{2\pi C_1} \rho$$

Pour une tige mince de longueur $2L$ et de rayon (a) la capacitance est donnée par la formule.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) = \frac{2\pi R}{\rho} = \frac{1}{L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{8L}{\phi} - 1 \right)$$

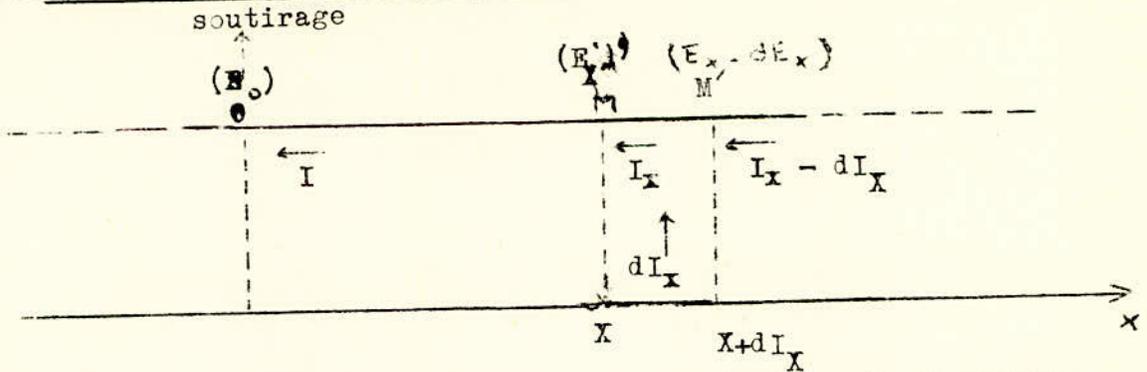
La résistance transversale est une résistance lineaire elle est donnée en $(\Omega \cdot m)$

Donc
$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\ln \frac{8L}{\phi} - 1 \right)$$

EN présence d'un revêtement, la résistivité doit être multipliée par un coefficient k qui traduit le pouvoir d'isolement du revêtement.

$$R = \frac{k\rho}{2\pi} \left(\ln \frac{8L}{\phi} - 1 \right)$$

I.2. RESOLUTION GENERALE DU PROBLEME:



Situation generale d'une structure protégée cathodiquement

En supposant linéaire la courbe de polarisation cathodique de la structure l'intensité qui pénètre dans celle-ci entre les point M et M' par:

$$dI = \frac{E}{R} \cdot dx$$

$$\frac{dI}{dx} = \frac{E}{R}$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{dE}{dx} \right) = \frac{d}{dx} (rI) \implies \frac{d^2 E}{dx^2} = r \frac{dI}{dx} = r \cdot \frac{E}{R}$$

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

$$\text{Avec : } a = \sqrt{\frac{r}{R}}$$

La solution generale s'écrit:

$$E = Ae^{ax} + Be^{-ax} \quad (3)$$

$$I = \frac{1}{r} \cdot \frac{dE}{dx} = \frac{1}{r} (a \cdot Ae^{ax} - aBe^{-ax})$$

$$I = \frac{a}{r} (Ae^{ax} - Be^{-ax}) = \frac{1}{R_k} (Ae^{ax} - Be^{-ax}) \quad (4)$$

Si l'on pose: $R_k = \sqrt{r \cdot R}$

a : Coefficient d'atténuation de la structure (exprime m^{-1})
 R_k : Résistance caractéristique de la structure (exprime en Ω)

Condition aux limites:

$$x = 0 \implies \begin{cases} E = E_0 \\ I = I_0 \end{cases}$$

$$E_0 = A + B$$

$$I_0 = \frac{1}{R_k} (A - B)$$

$$A = \frac{E_0 + \sqrt{r_k R} I_0}{2}$$

$$B = \frac{E_0 - \sqrt{r_k R} I_0}{2}$$

Ce qui conduit aux equations:

$$E_x = \frac{(E_0 + R_k I_0) e^{ax} + (E_0 - R_k I_0) e^{-ax}}{2}$$

$$= E_0 \left(\frac{e^{ax} + e^{-ax}}{2} \right) + R_k I_0 \left(\frac{e^{ax} - e^{-ax}}{2} \right)$$

$$\boxed{E_x = E_0 \operatorname{ch} ax + R_k I_0 \operatorname{sh} ax} \quad (5)$$

$$I_x = \frac{1}{R_k} \left(\frac{E_0 + R_k I_0}{2} e^{ax} + \frac{E_0 - R_k I_0}{2} e^{-ax} \right) =$$

$$= \frac{E_0}{R_k} \left(\frac{e^{ax} - e^{-ax}}{2} \right) + \frac{1}{R_k} \left(\frac{I_0 R_k}{2} e^{ax} + \frac{I_0 R_k}{2} e^{-ax} \right)$$

$$\boxed{I_x = \frac{E_0}{R_k} \operatorname{sh} ax + I_0 \operatorname{ch} ax} \quad (6)$$

Ce groupe d'equations (5) et (6) permet de resoudre tous les cas. Il peut en raison de sa symetrie donner lieu a des developpements importants

1.2.1. Discussion du groupe (5) et (6)

Elle s'annule pour:

$$E_x = E_0 \operatorname{ch} ax + R_k I_0 \operatorname{sh} ax$$

$$\frac{E_0}{R_k I_0} = - \operatorname{th} ax \quad (7)$$

D'autre part sa dérivée :

$$E'_x = E_0 a \cdot \operatorname{sh} ax + R_k I_0 a \cdot \operatorname{ch} ax$$

Elles s'annule pour: $\frac{E_0}{R_k I_0} = -\operatorname{Coth} ax \quad (8)$

a) Lorsque $E_0 > R_k I_0$ (Figure VII. 1)

$$\frac{E_0}{R_k I_0} > 1 \text{ Donc l'égalité}$$

$\frac{E_0}{R_k I_0} = -\operatorname{th} ax$ Est impossible car $-1 < \operatorname{th} ax < +1$,
donc pour ce cas E ne s'annule jamais.

par contre :

$$\frac{E_0}{R_k I_0} = -\operatorname{coth} ax \text{ est possible}$$

$$ax = \operatorname{Arc} \operatorname{coth} \left(-\frac{E_0}{R_k I_0} \right)$$

$$x = -\frac{1}{a} \operatorname{Arc} \operatorname{coth} \left(\frac{E_0}{R_k I_0} \right)$$

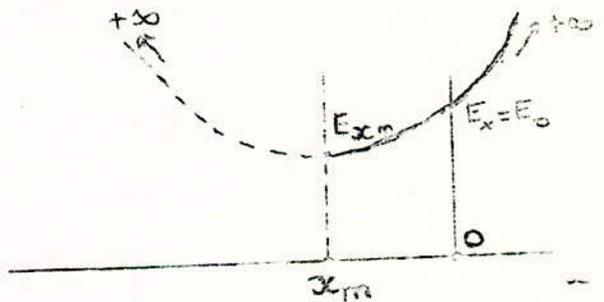
Le minimum à pour valeur:

$$E_{x_m} = E_0 \operatorname{ch} ax_m + R_k I_0 \operatorname{sh} ax_m$$

$$\frac{E_x}{\operatorname{sh} ax} = E_0 \frac{\operatorname{ch} ax}{\operatorname{sh} ax} + R_k I_0$$

Or on a $\frac{I_0 R_k}{E_0} = -\operatorname{th} ax_m$ Pour $ax = ax_m$

$$\frac{E_{x_m}}{E_0} \cdot \frac{1}{\operatorname{sh} ax_m} = \operatorname{Coth} ax_m - \operatorname{th} ax_m = \frac{\operatorname{ch}^2 ax - \operatorname{sh}^2 ax}{\operatorname{sh} ax \operatorname{ch} ax}$$



(Figure VII. 1)

$$\frac{1}{\operatorname{sh} a x_m} \cdot \frac{E_{x_m}}{E_0} = \frac{1}{\operatorname{sh} a x_m \operatorname{ch} a x_m} \Rightarrow \boxed{E_{x_m} = \frac{E_0}{\operatorname{ch} a x_m}} \quad (9)$$

b) Lorsque $E_0 < I_0 R_k$ (Figure VII. 2)

$$\frac{E_0}{R_k I_0} < 1 \quad \text{Pour } E_{x=0} = 0 \text{ ON A} \quad \frac{E_0}{R_k I_0} = -\operatorname{th} a x < 1$$

Cette equation est possible pour $x = -\frac{1}{a} \left(\operatorname{argth} \frac{E_0}{R_k I_0} \right)$

Par contre sa derivée ne s'annule jamais

$$I_x = E_0 \frac{\operatorname{sh} a x}{R_k} + I_0 \operatorname{ch} a x$$

cette équation s'annule pour:

$$\frac{E_0}{R_k I_0} = -\operatorname{coth} a x \quad \text{et sa derivée}$$

$$I'_x = \frac{E_0}{R_k} \cdot a \cdot \operatorname{ch} a x + I_0 a \operatorname{sh} a x$$

elle s'annule pour $\frac{E_0}{R_k I_0} = -\operatorname{th} a x$

c) Lorsque $E_0 > R_k I_0$ (Figure VII. 3)

$$\frac{E_0}{R_k I_0} > 1 \quad I_x \text{ s'annule pour } x_m = -\frac{1}{a} \left(\operatorname{argcoth} \frac{E_0}{R_k I_0} \right)$$

I'_x ne s'annule jamais

(Figure VII. 3)

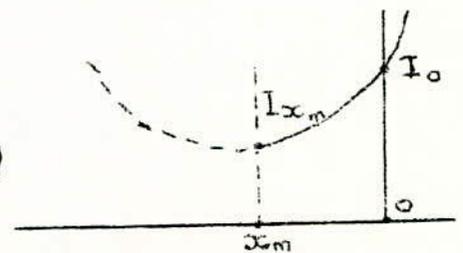
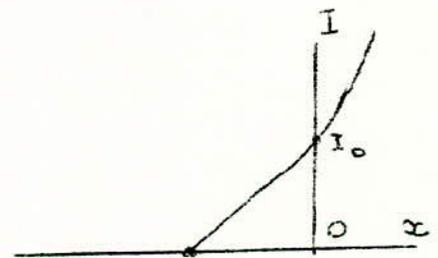
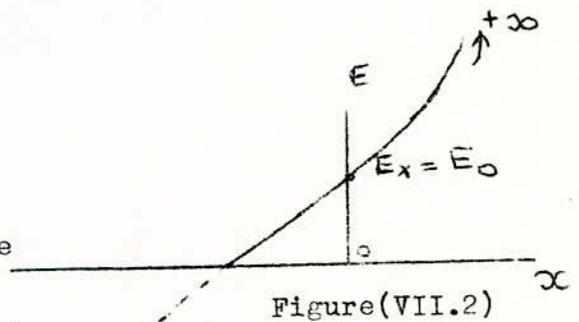
d) Lorsque $E_0 < R_k I_0$ (Figure VII. 4)

Donc $\frac{E_0}{R_k I_0} < 1$ I_x ne s'annule jamais

$$I'_x = 0 \quad \text{Pour} \quad x_m = -\frac{1}{a} \left(\operatorname{argth} \frac{E_0}{\operatorname{ch} a x_m} \right)$$

Et le minimum a pour valeur

$$\boxed{\bar{E}_{x_m} = \frac{I_0}{\operatorname{ch} a x_m}} \quad (10)$$



(Figure VII. 4)

La discussion précédente montre que l'on doit toujours avoir $E_0 > R_k I_0$

En effet E_x doit bien s'annuler en un point de la canalisation. au delà de ce point E_x change de signe, partie virtuelle de la courbe E_x

E_x ne doit pas s'annuler, le minimum correspond à $I = 0$

E_0, I_0, E_x, I_x sont toujours de même signes puisqu'il s'agit ici de chute de potentiel et d'intensité qui y correspond.

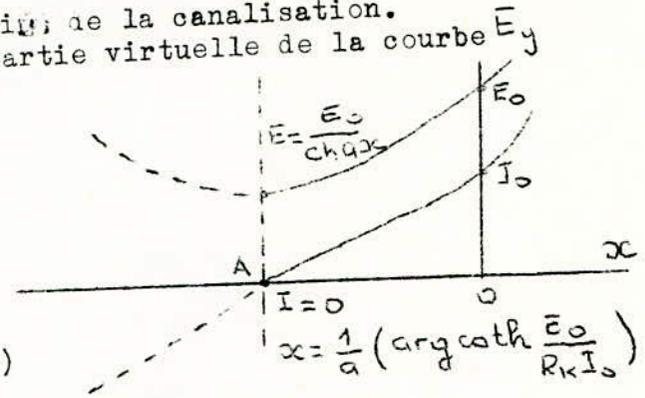


Figure VII.5)

RESISTANCE EQUIVALENTE DU CIRCUIT

$$R_{eq} = \frac{E_x}{I_x} = \frac{E_0 \operatorname{ch} ax + R_k I_0 \operatorname{sh} ax}{I_0 \operatorname{ch} ax + \frac{E_0}{R_k} \operatorname{sh} ax}$$

$$R_{eq} = \frac{E_0 + R_k I_0 \operatorname{th} ax}{E_0 / R_k \operatorname{th} ax + I_0} \quad (11)$$

1.3 CAS D'UNE STRUCTURE LONGILIGNE HOMOGENE DEMI-INFINIE

Si on suppose que $I_x \rightarrow 0$ quand $x \rightarrow +\infty$

l'équation $I_x = I_0 \operatorname{ch} ax + \frac{E_0}{R_k} \operatorname{sh} ax$ peut s'écrire

$$0 = I_0 \operatorname{ch} ax + \frac{E_0}{R_k} \operatorname{sh} ax$$

$$E_0 = -R_k I_0 \operatorname{coth} ax \quad \text{ou} \quad E_0 = -R_k I_0 \quad (12)$$

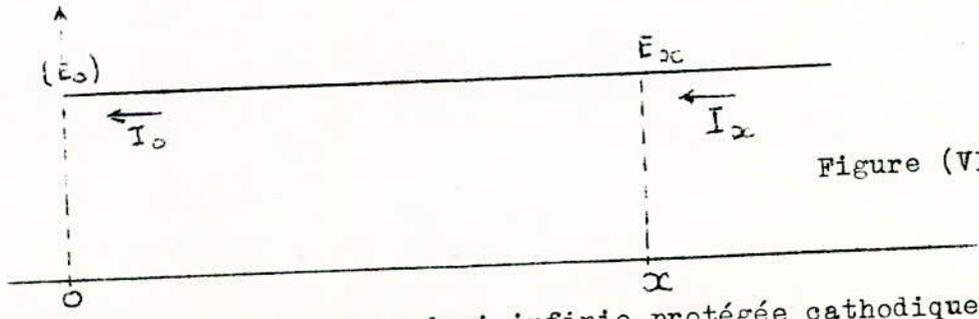


Figure (VII.6)

Situation d'une structure demi infinie protégée cathodiquement

(car pour x grand $\coth ax \approx 1$)

$$E_x = E_0 \coth ax - E_0 \sinh ax = E_0 \left(\frac{e^{ax} + e^{-ax}}{2} - \frac{e^{ax} - e^{-ax}}{2} \right)$$

$$E_x = E_0 e^{-ax} \quad (13)$$

$$I_x = I_0 \coth ax - I_0 \sinh ax = I_0 \left(\frac{e^{ax} + e^{-ax}}{2} - \frac{e^{ax} - e^{-ax}}{2} \right)$$

$$I_x = I_0 e^{-ax} \quad (14)$$

$$\boxed{\begin{aligned} E_x &= E_0 e^{-ax} \\ I_x &= I_0 e^{-ax} \end{aligned}}$$

Equation de PRITULA

En tout point de la structure, E_x est proportionnel à I_x suivant :

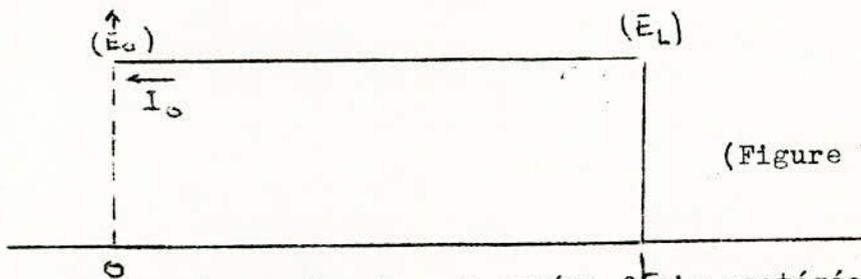
$$E_x = R_k \cdot I_x$$

La resistance equivalente :

$$(15) \quad R_{eq} = \frac{E_x}{I_x} = \frac{E_0 e^{-ax}}{I_0 e^{-ax}} = \frac{E_0}{I_0}$$

1.4 CAS D'UNE STRUCTURE LONGILIGNE HOMOGENE FINIE

Soit une structure de longueur L et E_L l'abaissement de potentiel à son extremité; en ce point l'intensite qui circule dans la structure devient nulle ($I_L = 0$)



(Figure VII.7)

Situation d'une structure homogene finie protégée cathodiquement

$$E_x = A e^{ax} + B e^{-ax}$$

$$x = L$$

$$E_L = E_x$$

$$I_L = I_x = 0$$

$$E_L = A e^{aL} + B e^{-aL}$$

$$I_L = 0 = \frac{1}{R_k} (A e^{aL} - B e^{-aL})$$

$$E_L = 2A e^{aL}$$

$$E_L = 2B e^{-aL}$$

$$A = \frac{E_L \cdot e^{-aL}}{2}$$

$$B = \frac{E_L e^{aL}}{2}$$

$$E_x = \frac{E_L \cdot e^{-aL}}{2} \cdot e^{ax} + \frac{E_L e^{aL}}{2} \cdot e^{-ax}$$

$$E_x = E_L \left(\frac{e^{a(L-x)} + e^{-a(L-x)}}{2} \right) = E_L \cdot \text{ch } a(L-x)$$

$$I_x = \frac{1}{R_k} \left(\frac{E_L \cdot e^{-aL}}{2} \cdot e^{ax} - \frac{E_L \cdot e^{aL}}{2} \cdot e^{-ax} \right)$$

$$I_x = \frac{E_L}{R_k} \left(\frac{e^{-a(L-x)} - e^{a(L-x)}}{2} \right) = -\frac{E_L}{R_k} \text{sh } a(L-x)$$

$E_x = E_L \cdot \text{ch } a(L-x)$	(16)
$I_x = -\frac{E_L}{R_k} \cdot \text{sh } a(L-x)$	(17)

$$R_{eq} = \frac{E_x}{I_x} = R_k \frac{\text{ch } a(L-x)}{\text{sh } a(L-x)} = R_k \cdot \text{coth } a(L-x)$$

$$R_{eq} = R_k \text{coth } a(L-x) \quad (18)$$

En pratique les equation les plus souvent utilisées sont celles qui relie l'abaissement de potentiel ou l'intensité au point de soutirage avec l'abaissement de potentiel à l'extrémité de la structure.

Pour $x=0$ on a :

$$E_0 = E_L \cdot \text{ch } aL \Rightarrow E_L = \frac{E_0}{\text{ch } aL}$$

$$I_0 = \frac{E_L}{R_k} \cdot \text{sh } aL \Rightarrow E_L = \frac{R_k I_0}{\text{sh } aL}$$

- En fonction de

$$E_x = E_0 \frac{\operatorname{ch} a(L-x)}{\operatorname{ch} aL} \quad (19)$$

$$I_x = \frac{E_0}{R_k} \frac{\operatorname{sh} a(L-x)}{\operatorname{sh} aL} \quad (20)$$

- En fonction de

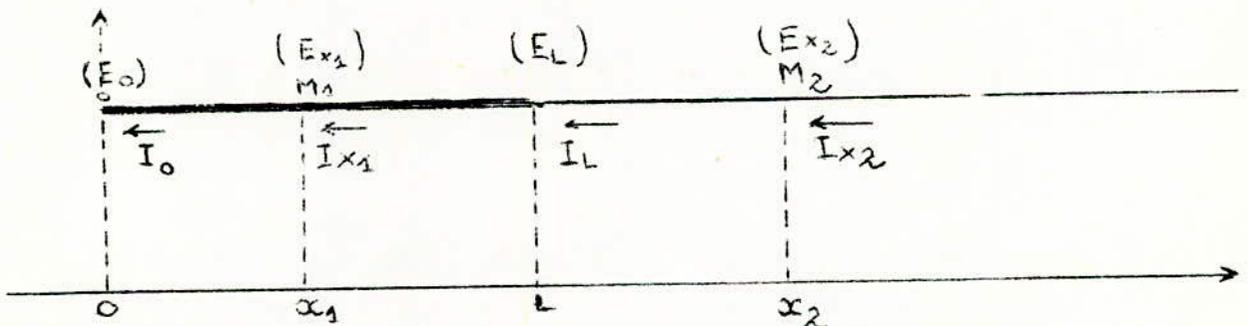
$$E_x = R_k I_0 \frac{\operatorname{ch} a(L-x)}{\operatorname{sh} aL} \quad (21)$$

$$I_x = I_0 \frac{\operatorname{sh} a(L-x)}{\operatorname{sh} aL} \quad (22)$$

I.5. CAS D'UNE STRUCTURE COMPOSEE D'UN TRONCON PROLONGE PAR UNE PARTIE DEMI INFINIE DE CARACTERISTIQUES DIFFERENTES

Soit un tronçon (I) de longueur L et de caractéristiques r_1, R_1, a_1 et R_{k1} connecté en son origine à un poste soutirant, un courant I_0 qui y produit un abaissement de potentiel E_0 .

Ce tronçon est prolongé à son extrémité par une partie demi-infinie de caractéristiques r_2, R_2, a_2 et R_{k2} . On désigne par E_L l'abaissement de potentiel à l'interface entre le tronçon (I) et la partie demi-infinie (2) de la structure et par I_L le courant qui circule à ce niveau.



(Figure VII.8) situation sur un tronçon prolongé par une partie infinie. L'abaissement de potentiel et l'intensité correspondant à un point $M_2(x_2)$ de la partie (2) du tronçon, peuvent s'écrire.

$$E_{x_2} = E_L \cdot e^{-a_2(x_2 - L)}$$

$$I_{x_2} = I_L \cdot e^{-a_2(x_2 - L)}$$

Pour une demi-infinie on a:

$$E_x = R_{K_2} \cdot I_x \quad \text{Donc} \quad E_L = R_{K_2} \cdot I_L \quad (23)$$

L'abaissement de potentiel et de correspondant à un point $M_1(x_1)$ du tronçon (I) peuvent être calculés:

$$E_{x_1} = A e^{a_1 x_1} + B e^{-a_1 x_1}$$

$$I_{x_1} = \frac{1}{R_{K_1}} (A e^{a_1 x_1} - B e^{-a_1 x_1})$$

$$x = L \quad E_{x_1} = E_L \quad I_{x_1} = I_L$$

$$E_L = A e^{a_1 L} + B e^{-a_1 L}$$

$$I_L = \frac{1}{R_{K_1}} (A e^{a_1 L} - B e^{-a_1 L})$$

$$A = \frac{E_L + R_{K_1} \cdot I_L}{2} e^{-a_1 L}$$

$$B = \frac{E_L - R_{K_1} I_L}{2} e^{a_1 L}$$

Ce qui conduit à:

$$(24) \quad E_{x_1} = E_L \operatorname{ch} a_1 (L - x_1) + R_{K_1} I_L \operatorname{sh} a_1 (L - x_1)$$

$$(25) \quad I_{x_1} = I_L \operatorname{ch} a_1 (L - x_1) + \frac{E_L}{R_{K_1}} \operatorname{sh} a_1 (L - x_1)$$

Si on fait $x_1 = 0$ on a:

$$E_0 = E_L \operatorname{ch} a_1 L + R_{K_1} I_L \operatorname{sh} a_1 L$$

$$I_0 = I_L \operatorname{ch} a_1 L + \frac{E_L}{R_K} \operatorname{sh} a_1 L$$

Or on sait que:

$$E_{x_1} = E_0 \operatorname{ch} a_1 x_1 + R_{K_1} I_0 \operatorname{sh} a_1 x_1$$

$$I_{x_1} = I_0 \operatorname{cha}_1 x_1 + \frac{I_0}{R_{K_1}} \operatorname{sha}_1 x_1$$

Pour $x_1 = L$ on a :

$$E_L = E_0 \operatorname{ch} a_1 L + R_{K_1} I_0 \operatorname{sh} a_1 L$$

$$I_L = I_0 \operatorname{cha}_1 L + \frac{E_0}{R_{K_1}} \operatorname{sha}_1 L$$

$$R_{K_1} \cdot I_L = \frac{E_0 - E_L \operatorname{cha}_1 L}{\operatorname{sha}_1 L}$$

$$E_{x_1} = E_L \operatorname{ch} a_1 (L - x_1) + \frac{E_0 \operatorname{sh} a_1 (L - x_1) - E_L \operatorname{cha}_1 L \operatorname{sh} a_1 (L - x_1)}{\operatorname{sha}_1 L}$$

$$E_{x_1} = \frac{E_L \operatorname{sh} a_1 x_1 + E_0 \operatorname{sh} a_1 (L - x_1)}{\operatorname{sha}_1 L}$$

$$I_L = \frac{E_0 - E_L \operatorname{cha}_1 L}{R_{K_1} \operatorname{sha}_1 L}$$

$$I_{x_1} = \frac{E_0 - E_L \operatorname{cha}_1 L}{R_{K_1} \operatorname{sha}_1 L} \operatorname{cha}_1 (L - x_1) + \frac{E_L}{R_{K_1}} \operatorname{sh} a_1 (L - x_1)$$

$$I_{x_1} = \frac{-E_L \operatorname{cha}_1 (L - x_1) + E_0 \operatorname{cha}_1 (L - x_1)}{R_{K_1} \operatorname{sh} a_1 L}$$

$$I_{x_1} = \frac{E_0 \operatorname{cha}_1 (L - x_1) - E_L \operatorname{cha}_1 x_1}{R_{K_1} \operatorname{sh} a_1 L}$$

Donc

- En fonction de E_0 et E_L

$$E_{x_1} = \frac{E_0 \operatorname{sh} a_1 (L-x_1) + E_L \operatorname{sh} a_1 x_1}{\operatorname{sh} a_1 L} \quad (26)$$

$$I_{x_1} = \frac{E_0 \operatorname{ch} a_1 (L-x_1) - E_L \operatorname{ch} a_1 x_1}{R_{K_1} \operatorname{sh} a_1 L} \quad (27)$$

Par la même démonstration que ci dessus on a :

- En fonction de I_0 et I_L

$$E_{x_1} = R_{K_1} \frac{I_0 \operatorname{ch} a_1 (L-x_1) - I_L \operatorname{ch} a_1 x_1}{\operatorname{sh} a_1 L} \quad (28)$$

$$I_{x_1} = \frac{I_0 \operatorname{sh} a_1 (L-x_1) + I_L \operatorname{sh} a_1 x_1}{\operatorname{sh} a_1 L} \quad (29)$$

- en fonction de E_0 et I_L

$$E_{x_1} = \frac{E_0 \operatorname{ch} a_1 (L-x_1) - R_{K_1} I_L \operatorname{sh} a_1 x_1}{\operatorname{ch} a_1 L} \quad (30)$$

$$I_{x_1} = \frac{E_0 / R_{K_1} \operatorname{sh} a_1 (L-x_1) + I_L \operatorname{ch} a_1 x_1}{\operatorname{ch} a_1 L} \quad (31)$$

- en fonction de E_L et I_0

$$E_{x_1} = \frac{R_{K_1} I_0 \operatorname{sh} a_1 (L-x_1) + E_L \operatorname{ch} a_1 x_1}{\operatorname{ch} a_1 L} \quad (32)$$

$$I_{x_1} = \frac{I_0 \operatorname{ch} a_1 (L-x_1) - \frac{E_L}{R_{K_1}} \operatorname{sh} a_1 x_1}{\operatorname{sh} a_1 L} \quad (33)$$

REMARQUE/

En faisant $I_L = 0$ dans ces équations on retrouve les équations correspondantes pour une structure finie.

On montre que l'abaissement de potentiel en tout point M est relié à l'intensité y circulant par une résistance équivalente.

$$E_{x_1} = R_{eq} x_1 \cdot I_{x_1}$$

Il s'agit donc de calculer :

$$\frac{E_{x_1}}{I_{x_1}}$$

$$E_{x_1} = E_L \cdot \operatorname{ch} a_1 (L - x_1) + R_{K_1} I_L \operatorname{sh} a_1 (L - x_1)$$

$$E_L = R_{K_2} \cdot I_L$$

$$\frac{E_{x_1}}{E_L} = \operatorname{ch} a_1 (L - x_1) + \frac{R_{K_1}}{R_{K_2}} \operatorname{sh} a_1 (L - x_1)$$

$$\frac{E_{x_1}}{E_L} = \frac{(R_{K_1} + R_{K_2}) e^{a_1(L-x_1)} + (R_{K_2} - R_{K_1}) e^{-a_1(L-x_1)}}{2 R_{K_2}}$$

$$\frac{E_{x_1}}{E_L} = \frac{e^{a_1(L-x_1)} + \frac{R_{K_2} - R_{K_1}}{R_{K_2} + R_{K_1}} e^{-a_1(L-x_1)}}{1} \cdot (R_{K_1} + R_{K_2})$$

on pose:

$$F = \frac{R_{K_2} - R_{K_1}}{R_{K_2} + R_{K_1}} \quad (34)$$

$$\frac{E_{x_1}}{E_L} = \frac{e^{a_1(L-x_1)} + F \cdot e^{-a_1(L-x_1)}}{\frac{2 R_{K_2}}{R_{K_1} + R_{K_2}} + 1 \cdot 1} = \frac{e^{a_1(L-x_1)} + F e^{-a_1(L-x_1)}}{1 + F}$$

D'après l'équation: (25)

$$\frac{I_{x_1}}{E_L} = \frac{I_L}{E_L} \operatorname{ch} a_1 (L - x_1) + \frac{1}{R_{K_1}} \operatorname{sh} a_1 (L - x_1)$$

On a: $E_L = R_{K_2} \cdot I_L$ Donc $\frac{I_L}{E_L} = \frac{1}{R_{K_2}}$

$$\frac{I_{x_1}}{E_L} = \frac{1}{R_{K_2}} \operatorname{ch} a_1 (L - x_1) + \frac{1}{R_{K_1}} \operatorname{sh} a_1 (L - x_1)$$

$$\frac{I_{x_1}}{E_L} = e^{a_1(L-x_1)} \left(\frac{1}{2R_{K_2}} + \frac{1}{2R_{K_1}} \right) + e^{-a_1(L-x_1)} \left(\frac{1}{2R_{K_2}} - \frac{1}{2R_{K_1}} \right)$$

$$\frac{I_{x_1}}{E_L} = \frac{e^{a_1(L-x_1)} - F \cdot e^{-a_1(L-x_1)}}{2R_{K_1}R_{K_2}} = \frac{e^{a_1(L-x_1)} - F \cdot e^{-a_1(L-x_1)}}{R_{K_1} \cdot \frac{2R_{K_2}}{R_{K_1} + R_{K_2}}}$$

$$\frac{I_{x_1}}{E_L} = \frac{e^{a_1(L-x_1)} - F \cdot e^{-a_1(L-x_1)}}{R_{K_1}(1+F)}$$

$$\frac{E_{x_1}}{I_{x_1}} = R_{K_1} \cdot \frac{1 + F \cdot e^{-2a_1(L-x_1)}}{1 - F \cdot e^{-2a_1(L-x_1)}}$$

$$E_{x_1} = R_{eq_{x_1}} \cdot I_{x_1}$$

Ce qui implique:

$$R_{eq_{x_1}} = R_{K_1} \cdot \frac{1 + F \cdot e^{-2a_1(L-x_1)}}{1 - F \cdot e^{-2a_1(L-x_1)}} \quad (35)$$

Pour connaître R_{eq_0} il suffit de remplacer $x = 0$.

$$R_{eq_0} = R_{K_1} \cdot \frac{1 + F \cdot e^{-2a_1L}}{1 - F \cdot e^{-2a_1L}} \quad (36)$$

Pour connaître le profil d'abaissement de potentiel le long du tronçon (I) il faut connaître en tout point x_1 le rapport d'abaissement de potentiel. K_{x_1}

Telle que $E_0 = K_{x_1} \cdot E_{x_1}$ Avec $K_{x_1} > 1$

En faisant $x=0$ On aura :

$$\frac{E_0}{E_L} = \frac{e^{a_1 L} + F e^{-a_1 L}}{1 + F}$$

Donc on a : $K_L = \frac{E_0}{E_L} = \frac{e^{a_1 L} + F e^{-a_1 L}}{1 + F}$

$$K_L = \frac{1 + F e^{-2a_1 L}}{(1 + F) e^{-a_1 L}} = e^{a_1 L} \frac{1 + F e^{-2a_1 L}}{1 + F}$$

$$\frac{E_0}{E_{x_1}} = \frac{e^{a_1 L}}{e^{a_1(L-x_1)}} \frac{1 + F e^{-2a_1 L}}{1 + F e^{-2a_1(L-x_1)}} = e^{a_1 x_1} \frac{1 + F e^{-2a_1 L}}{1 + F e^{-2a_1(L-x_1)}}$$

$$K_{x_1} = e^{a_1 x_1} \frac{1 + F e^{-2a_1 L}}{1 + F e^{-2a_1(L-x_1)}}$$

On retrouve les équations régissant une structure demi infinie homogène
 on faisant $F=0$ de même on retrouve celle qui régissent une structure
 homogène en faisant $F=1$

-Structure demi infinie homogène :

$$R_{eq \infty} = R_{K_1}$$

$$K_{x_1} = \frac{E_0}{E_{x_1}} = e^{a_1 x_1}$$

-structure finie homogène :

$$\frac{E_{x_1}}{I_{x_1}} = R_{eq} = R_{K_1} \frac{1 + e^{-2a_1(L-x_1)}}{1 - e^{-2a_1(L-x_1)}}$$

$$K_{x_1} = e^{a_1 x_1} \frac{1 + e^{-2a_1 L}}{1 + e^{-2a_1(L-x_1)}}$$

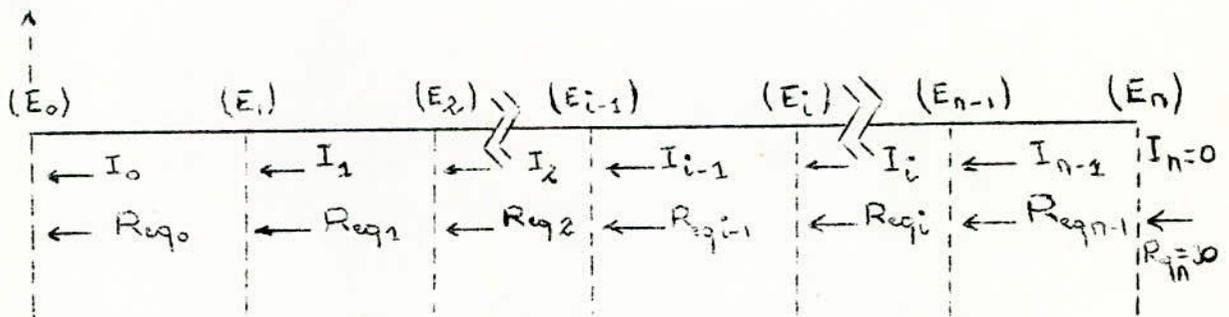
2°) STRUCTURE LONGILIGNE FINIE COMPORTANT UN NOMBRE INDETERMINE

DE TRONCON: (Figure VII.9)

Soit une structure longiligne finie constituée de n tronçons de caractéristiques différentes: r_1, R_1, a_1 et R_{K1} pour le tronçon (1).

(le plus proche du point de soutirage) r_i, R_i, a_i, R_{Ki} pour le tronçon $i, \dots, 2n, R_n, a_n$ et R_{Kn} pour le dernier tronçon n .

Designons par $L_1, \dots, L_i, \dots, L_n$ la longueur (en m) des différents tronçons



Situation sur une structure longiligne à plusieurs tronçon

(Figure VII.9)

On designe par i le numero de l'interface entre le tronçon i et le tronçon $i+1$.

Pour établir le profil d'abaissement de potentiel le long de la structure composite il s'agit de déterminer le rapport d'abaissement de potentiel K_i entre l'origine et l'extrémité de chaque tronçon.

$$K_i = \frac{E_{i-1}}{E_i} = e^{a_i L_i} \frac{1 + F_i e^{-2a_i L_i}}{1 + F_i} \quad (37)$$

$$F_i = \frac{R_{eq_i} - R_{K_i}}{R_{eq_i} + R_{K_i}} \quad (38)$$

On utilisera la notion de résistance équivalente pour établir le profil d'intensité circulant le long de la structure.

$$I_i = \frac{E_i}{R_{eqi}}$$

R_{eqi} : Résistance équivalente à l'interface

$$R_{eqi} = R_{k_{i+1}} \frac{1 + F_{i+1} e^{-2a_{i+1} L_{i+1}}}{1 - F_{i+1} e^{-2a_{i+1} L_{i+1}}} \quad (39)$$

Le calcul doit être opéré de proche à partir de l'extrémité de la structure

$$I_n = 0, \quad R_{eqn} = \infty, \quad F_n = 1.$$

Il est possible de trouver à quelle distance du point de soutirage on a un certain abaissement de potentiel E_p pour E_0 donné. on cherche d'abord à déterminer sur quel tronçon on a l'abaissement E_p ; on calcul les E_i à partir des K_i .

On suppose que: $E_i < E_p < E_{i-1}$

$$\frac{E_p}{E_i} = \frac{e^{a_i(L_i - x'_p)} + F_i e^{-a_i(L_i - x'_p)}}{1 + F_i}$$

On pose: $C = \frac{E_p}{E_i} (1 + F_i)$

$$\frac{E_p}{E_i} = \frac{e^{a_i(L_i - x'_p)} + F_i e^{-a_i(L_i - x'_p)}}{1 + F_i}$$

$$C = \frac{e^{a_i(L_i - x'_p)} + F_i e^{-a_i(L_i - x'_p)}}{1 + F_i} \cdot (1 + F_i)$$

$$C = e^{a_i L_i} \cdot e^{-a_i x'_p} + F_i e^{-a_i L_i} e^{a_i x'_p} = e^{a_i L_i} e^{-a_i x'_p} (1 + F_i \cdot e^{-2a_i L_i} e^{2a_i x'_p})$$

$$\ln C = a_i(L_i - x'_p) + \ln(1 + F_i e^{-2a_i(L_i - x'_p)})$$

On pose: $x = a_i(L_i - x'_p)$

$$\ln c = x + \ln(1 + F_i e^{-2x}) \Rightarrow e^x = \frac{c}{1 + F_i \cdot e^{-2x}}$$

D'où $e^{2x} - c e^x + F = 0$

On pose $y = e^x$ $y^2 - c y + F = 0$ $y = \frac{c \pm \sqrt{c^2 - 4F}}{2}$

$$x = \ln \frac{c + \sqrt{c^2 - 4 \cdot F}}{2}$$

Donc: (10) $x'_p = L_i - \frac{1}{a_i} \ln \frac{c + \sqrt{c^2 - 4 \cdot F}}{2}$

3°) DETERMINATION DE R ET r AINSI QUE LA DISTANCE x:

Il arrive fréquemment que l'on procède sur une canalisation posée, à des "essais de soutirage" afin de déterminer les caractéristiques d'une installation de protection cathodique.

On connaît alors: E_0, I_0, E_x, I_x , ET x Donc on peut déduire R et r

3.1. Calcul de R (Figure VII.10)

Soit E_x et I_x chute de tension et de courant en un point M d'abscisse x

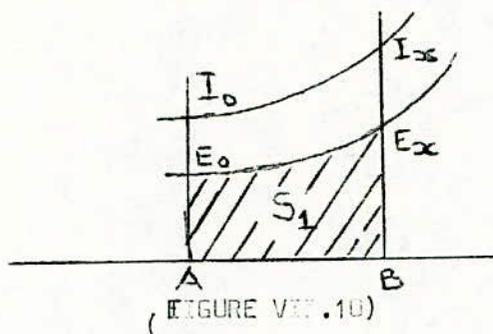
E_0 et I_0 chute de tension et de courant en $x=0$ (point de soutirage)

$$E_x = E_0 \operatorname{ch} ax + R_k I_0 \operatorname{sh} ax$$

$$S_1 = \int_0^x E_x \cdot dx = \int_0^x (E_0 \operatorname{ch} ax + R_k I_0 \operatorname{sh} ax) dx =$$

$$\left[\frac{E_0}{a} \operatorname{sh} ax + \frac{I_0 R_k}{a} \operatorname{ch} ax \right] = \frac{E_0}{a} \operatorname{sh} ax + \frac{R I_0}{a} \operatorname{ch} ax - \frac{R_k I_0}{a}$$

S_1 : Etant la surface hachurée :



$$\frac{E_0}{a} \Delta h a x + \frac{R_k I_0}{a} c h a x = \left[I_0 c h a x + \frac{E_0}{R_k} \Delta h a x \right] \frac{R_k}{a}$$

$\underbrace{\hspace{15em}}_{I_x}$

$$S_1 = I_x \cdot \frac{R_k}{a} - \frac{R_k I_0}{a} = \frac{R_k}{a} (I_x - I_0)$$

Or $\frac{R_k}{a} = \frac{\sqrt{R \cdot r}}{\sqrt{\frac{r}{R}}} = R$ Donc $S_1 = R (I_x - I_0)$

$$R = \frac{S_1}{I_x - I_0}$$

Il y a lieu de remarquer que les revêtements des tubes au contact du sol constituent à des degrés divers des résistances électrolytiques !

Il en résulte que la résistance trouvée est souvent variable, dans une assez large mesure et fonction du courant soutiré I_n

3.2 CALCUL de r :

$$I_x = \frac{E_0}{R_k} \Delta h a x + I_0 c h a x$$

$$S_1 = \int_0^x \left(\frac{E_0}{R_k} \Delta h a x + I_0 c h a x \right) dx = \left[\frac{E_0}{a \cdot R_k} c h a x + \frac{I_0}{a} \Delta h a x \right]_0^x$$

$$s_i = \frac{E_0}{R_K \cdot a} \operatorname{ch} ax + \frac{I_0}{a} \operatorname{sh} ax - \frac{E_0}{R_K \cdot a}$$

$$\begin{aligned} \Delta i &= \left(\frac{E_0}{R_K} \operatorname{ch} ax + I_0 \operatorname{sh} ax \right) \frac{1}{a} - \frac{E_0}{R_K \cdot a} = \frac{E_x}{R_K \cdot a} - \frac{E_0}{R_K \cdot a} = \\ &= \frac{1}{a \cdot R_K} (E_x - E_0) \end{aligned}$$

$$a \cdot R_K = \sqrt{\frac{r}{R}} \cdot \sqrt{R x^2} = \frac{r}{x} \quad S_i = \frac{1}{x} (E_x - E_0)$$

$$r = \frac{E_x - E_0}{S_i} \quad (42)$$

3.3. DETERMINATION DE LA DISTANCE X

La détermination de (x) peut se poser lorsqu'on étudie un vieux réseau dont la topographie n'est **pas** connue. Lorsqu'on connaît R et r et on procède à essaie de soutirage donc E_0 et I_0 connu.

On peut alors mesurer à une distance inconnue (x) la chute de potentiel qui en résulte.

On rencontre aussi le même problème lorsque étant donné E_0 et I_0 on désire savoir à quelle distance (x) on a un abaissement de potentiel E_x , dont la valeur est imposée.

Cas où l'intensité à l'extrémité de la structure est nulle:

$$E_x = E_0 \operatorname{ch} ax$$

$$I_x = E_0 \frac{\operatorname{sh} ax}{R_K}$$

On connaît E_x et E_0 donc on a:

$$\frac{E_x}{E_0} = \operatorname{ch} ax \quad ax = \operatorname{argch} \frac{E_x}{E_0} \Rightarrow \boxed{x = \frac{1}{a} \operatorname{argch} \frac{E_x}{E_0}} \quad (43)$$

3.4. EQUILIBRE ENTRE DEUX POINTS DE SOUTIRAGE CONSECUTIFS: (Figure VII.II)

Le problème est la recherche du point où $I_0 = 0$ entre deux points de soutirage.

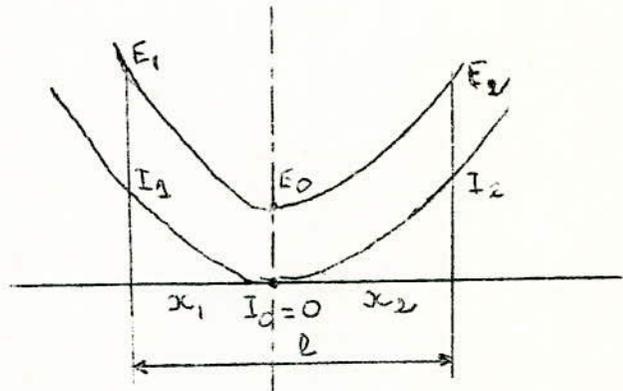
$$E_1 = E_0 \operatorname{ch} ax_1$$

$$E_2 = E_0 \operatorname{ch} ax_2$$

Avec:

$$x_1 + x_2 = l$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{E_1}{E_2} = \frac{\operatorname{ch} ax_1}{\operatorname{ch} ax_2} \\ x_1 + x_2 = l \end{array} \right.$$



(Figure VII.II)

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\operatorname{ch} a(l-x_2)}{\operatorname{ch} ax_2} = \frac{\operatorname{ch} al \operatorname{ch} ax_2 - \operatorname{sh} al \operatorname{sh} ax_2}{\operatorname{ch} ax_2}$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \operatorname{ch} al - \operatorname{sh} al \operatorname{th} ax_2 \Rightarrow \operatorname{th} ax_2 = \frac{-\frac{E_1}{E_2} + \operatorname{ch} al}{\operatorname{sh} al}$$

$$\operatorname{th} ax_2 = \frac{E_2 \operatorname{ch} al - E_1}{E_2 \operatorname{sh} al}$$

$$\operatorname{th} ax_1 = \frac{E_1 \operatorname{ch} al - E_2}{E_1 \operatorname{sh} al}$$

$$x_2 = \frac{1}{a} \operatorname{arg} \operatorname{th} \left[\frac{E_2 \operatorname{ch} al - E_1}{E_2 \operatorname{sh} al} \right] \quad (44)$$

$$x_1 = \frac{1}{a} \operatorname{arg} \operatorname{th} \left[\frac{E_1 \operatorname{ch} al - E_2}{E_1 \operatorname{sh} al} \right] \quad (45)$$

4°) PREMIERE APPLICATION DE LA METHODE GENERALE :

4.I. INCIDENCE DES PUITES SUR LA PROTECTION CATHODIQUE DES PLATES FORMES FIXES.

Les Puits d'exploitation des gisements pétroliers onshore ne sont pas systématiquement protégés Cathodiquement, par contre les Puits Offshore supportés par des plates formes fixes de forage sont nécessairement soumis aux systèmes de protection Cathodique destinés à celles-ci. La Conception de ces systèmes doit prendre en compte la demande en courant des puits considérés généralement comme parasite.

Les Puits sont en contact électrique avec la masse de la plate-forme ce qui conduit à ce qu'ils sont eux aussi soumis à la protection Cathodique, cette opération est considérée généralement comme involontaire.

4.I.I. SPECIFICITE DE LA PROTECTION CATHODIQUE DES PUITES OFFSHORE

1°) CAS DES PUITES ONSHORE.

Les Casings des puits d'exploitation de Gaz naturel ou de pétrole sont en contact directe avec le sol sur une grande partie de leur longueur, en dehors des zones cimentées. En principe on ne procède pas à priori à leur protection Cathodique, Quand il s'agit de puits Onshore; Car les dégats causés par cette corrosion sont la plupart du temps limités, cependant des cas de corrosion importants peuvent apparaître sur certains puits en raison d'une mauvaise cimentation, conjugué avec un terrain particulièrement agressif, de plus une forte corrosion est souvent causée par la formation de piles géologiques le long du Casing. Un grand nombre de fuites de Casing ont été évitées à partir du moment où les lignes ont été isolées électriquement des têtes de puits.

2°) CAS DES PUITES SUPPORTES PAR UNE PLATE FORME EN ACIER:

Toute plate-forme en acier doit être protégée Cathodiquement et dans la grande majorité des cas les systèmes de protection sont installés avant la mise à eau de la plate forme. Les Conductor pipes dans lesquels sont installés les puits sont toujours en contact mécanique avec les guides frames qui les maintiennent à différents niveau du Jacket.

Il est donc nécessaire de tenir compte des puits lorsqu'on effectue la conception des systèmes de protection Cathodique destinés aux plates formes fixes de forage.

3°) PROBLEMES COMMUNS A TOUS LES PUITES OFFSHORE :

Un autre problème spécifique aux puits supportés par des plates-formes est que ces puits sont étroitement groupés. Du moins près de la surface avant qu'ils ne soient éventuellement déviés en profondeur. Cette proximité de nombreux puits sur plusieurs centaines de mètres de profondeur conduit à accentuer les phénomènes d'interférence mutuelle liées à la protection Cathodique qui ont pour conséquence de faire chuter le courant consommé par chacun des puits, et par suite l'Amplitude de leur protection par rapport à ce qui se passerait pour un même point isolé.

4.2.2 CAICUL DE LA DEMANDE EN COURANT D'UN PUIT :

Le Calcul a un intérêt restreint pour les puits onshore vu que la protection Cathodique étant installée après leur équipement et généralement en se basant sur des mesures. Mais il est primordial d'estimer sans trop d'erreur ce que sera la part de courant consommé par des puits sur des plates formes de forage.

UTILISATION D'UNE VALEUR FORFAITAIRE :

Une pratique courante est non de faire réellement le calcul, mais d'adopter un certain nombre d'Ampères par puits lors de la conception des systèmes de protection Cathodique des plates formes. Cette valeur déduite de l'expérience est simplement fonction du site, c'est à dire de l'agressivité du fond sous-marin et grossièrement de la profondeur du puits.

Golf du Mexique	3A/ puits
Mer du Nord	5A/puits

La valeur du courant augmente avec la profondeur du puits.

METHODES FAISANT APPEL A LA DENSITE DE COURANT DE PROTECTION

Une première méthode jugée comme conservatrice est de calculer le courant à fournir pour protéger un puits en multipliant la surface exposée des Casings par une densité de courant de 5 à 30 mA/m². Ceci s'applique aux Casings et la partie du Conducteur pipe situé au dessous du mudeline.

METHODES FAISANT APPEL A L'ATTENUATION:

Cette methode a été étudiée précédemment, à l'extrémité de la structure on a :

$$R_{eq} = \infty \quad F = 1 \quad I_n = 0$$

ON A : $a_i = \sqrt{\frac{r_i}{R_i}}$ Coefficient d'attenuation

$$R_{ki} = \sqrt{r_i \cdot R_i} \quad \text{Resistance caracteristique}$$

On peut calculer la resistance équivalente en tout point de la structure

$$R_{eqi} = R_{ki+1} \frac{1 + F_{i+1} \cdot e^{-2\alpha_{i+1} L_{i+1}}}{1 - F_{i+1} \cdot e^{-2\alpha_{i+1} L_{i+1}}}$$

Où F_{i+1} est le facteur de réflexion de l'interface $i+1$

$$F_i = \frac{R_{eqi} - R_{ki}}{R_{eqi} + R_{ki}}$$

$$K_i = \frac{E_{i-1}}{E_i} = e^{\alpha_i L_i} \frac{1 + F_i e^{-2\alpha_i L_i}}{1 + F_i}$$

CALCUL DE R

ρ ($\Omega \cdot m$)	$k\rho$ ($\Omega \cdot m$)	$\frac{k\rho}{2\pi}$	L (m)	Φ (m)	$\frac{8L}{\Phi}$	$\ln \frac{8L}{\Phi}$	$\ln \frac{8L}{\Phi} - 1$	R_r (Ω)
0,8	0,8	0,1273	50	0,6096	656,167	6,48	5,48	0,699
0,8	8	1,273	140	0,4060	2758,62	7,92	6,92	8,79
0,8	8	1,273	1150	0,2730	33699,63	10,42	9,42	11,97
0,8	8	1,273	860	0,1936	35537,19	10,478	9,478	12,037
6	60	9,554	15	0,1936	619,73	6,429	5,429	51,87
1	10	1,592	340	0,1936	14039	8,550	8,550	13,612

CALCUL DE r :

N ^o	Φ (m)	e	$\Phi - e$	$e(\Phi - e)$	$\frac{1}{e(\Phi - e)}$	$0,0541 \frac{1}{e(\Phi - e)}$
I	0,6096	0,0012	0,6084	14,46.10	55,64	3,74
2	0,4064	0,0095	0,3968	3,778.10	126,906	6,8656
3	0,2730	0,0088	0,2641	2,348.10	243,813	13,1902
4	0,1936	0,0095	0,1841	1,753.10	570,400	30,85
5	0,1936	0,0095	0,1841	1,753.10	570,400	30,85
6	0,1936	0,0095	0,1841	1,753.10	570,400	30,85

CALCUL DE a ET R_k

r x 10	R	a x 10	R _k
3,74	0,699	2,311	1,616
6,8656	8,79	0,78	7,76843
13,1902	11,97	1,0497	12,5652
30,85	12,037	1,6009	19,2702
30,85	51,87	0,7712	40,0023
30,85	13,612	1,5054	20,4921

Resumé de toutes les valeurs obtenues

NIVEAU E/mud-litg	p L.m	Tube EXTERNE		K CIMENT	K _{sp} (L.m)	N ^o du Tronçon	L(m)	r. 10 ⁶ (L.m ⁻¹)	R (L.m)	a. 10 ³ (m ⁻¹)	R _K (L)	K	Req (-R)	F
		Φ(mm)	e(mm)											
0													6,512	1
-50	0,8	60,96	17,	10	8	1	50	3,74	0,699	2,311	1,616	1,0137	11,794	0,758
-190		40,60	9,52			2	140	6,8656	8,79	0,78	7,7684	2,0707	13,114	0,2560
-1340		27,30	8,89			3	1150	13,1902	11,97	1,049	12,5652	2,7545	20,237	0,2389
-2200		19,36	9,52			4	860		12,037	1,6009	19,2702	2,9319	43,338	0,3844
-2215	6				60	5	15	30,85	51,87	0,7712	40,00	1,0114	43,496	0,0418
-2555	1				10	6	340		13,612	1,5054	20,4921	1,1340		

EXEMPLE DE CALCUL POUR UN PUIT OFFSHORE

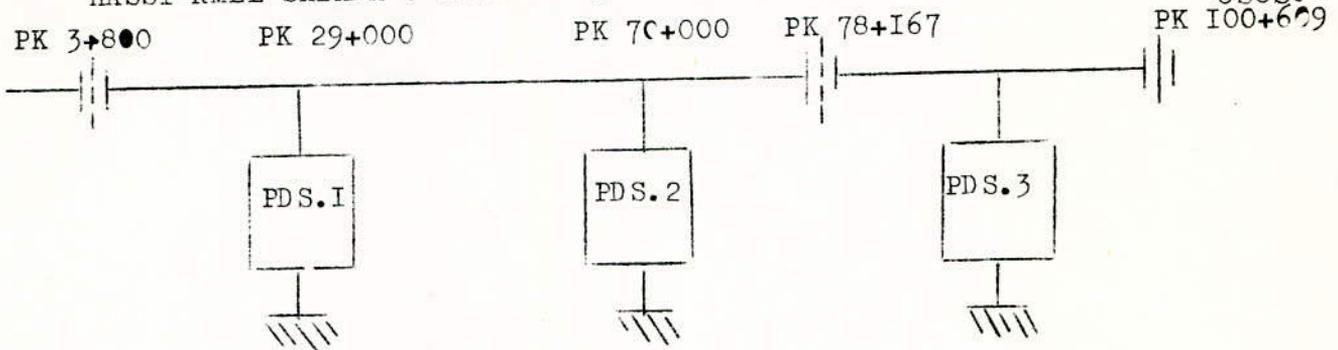
$$I_0 = \frac{E_0}{R_{eq}} = 39,91$$

(E₀ est estimé à 0,2V)

5°) DEUXIEME APPLICATION DE LA METHODE GENERALE

5.1 CAS D'UNE STRUCTURE HOMOGENE FINIE: *oléoduc reliant SKIKDA-EL KHROUB*

Cet oléoduc est constitué par deux pipes lines paralleles de diamètre 10 3/4 de POUCES et 6 5/8 de POUCES. Du terminal de départ (SKIKDA) jusqu'au PK 78 + 167. Cet Oléoduc est parallele au Gazoduc HASSI-RMEL SKIKDA. Donc les postes de soutirages (1) et (2) sont imposés.



5.1.1. CARACTERISTIQUES DES TUYAUX:

-Le diametre des tuyaux

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$$

$$\Phi = 10 + 3/4 + 6 + 5/8 = 17 + 3/8 \text{ DE POUCES}$$

$$\Phi = 441,23 \text{ mm}$$

-La longueur du pipe

$$L = 96 + 809 \text{ Km}$$

- L'épaisseur prédominante: l'épaisseur moyenne des pipes est de

$$4,87 \text{ mm}$$

- Type de revêtement : laminés plastiques.

Les sections des conduites délimitées par les joint isolants installés au terminal de départ au PK 3+800 seront protégés avec les ouvrages externes de la raffinerie de SKIKDA donc on considère le PK 3 + 800 comme point initial des conduites.

5.1.2. RESISTIVITE DU SOL :

Le long du tracé des conduites, les valeurs moyennes relevées sont les suivantes:

Du PK 3 + 800 AU PK 78 + 167 on a: $\rho = 30 \Omega \cdot m$

Du PK 78 + 167 AU PK 100 + 609 on a: $\rho = 100 \Omega \cdot m$

5.1.3. VALEURS D'ISOLEMENT VERS LA TERRE DES CONDUITES:

Du PK 3 + 800 au PK 78 + 167 on a :

$$R = 6000 \Omega \cdot m^2$$

Du PK 78 + 167 au PK 100 + 609 on a :

$$R = 10.000 \Omega \cdot m^2$$

5.1.4. Les installations de protection cathodique assureront un état satisfaisant de la protection des conduites dans tous les points avec une ddp référée à l'électrode de sulfate de cuivre négative et supérieur en valeur absolue à 0,850 V .

- La résistance longitudinale r :

$$r = \frac{\rho_c}{\pi e (\Phi - e)}$$

- La résistance transversale R :

$$R = \frac{R_c}{P} = \frac{R_c}{\pi \Phi}$$

- La constante de propagation a :

$$a = \sqrt{\frac{r}{R}}$$

- La résistance caractéristique :

$$R_k = \sqrt{r \cdot R}$$

N° du Tronçon	R $\Omega \cdot m^2$	r $\Omega \times Km$	R $\Omega \cdot Km$	ρ_c $\Omega \cdot m$	Φ (mm)	e (mm)	a	R_k
1 ^{er}	6000	0,02695	4,3276	18.10	441,32	4,87	0,07891	0,3415
2 ^{ème}	10.000	0,02695	7,2126	18.10	441,32	4,87	0,07891	0,4409

$$E_{xc} = E_0 \operatorname{ch} ax + R_k I_0 \operatorname{sh} ax$$

$$I_x = I_0 \operatorname{ch} ax + \frac{E_0}{R_k} \operatorname{sh} ax$$

A l'extrémité de la conduite et pour $x=L$ on a $I = 0$

$$I_0 \operatorname{sh} aL + \frac{E_0}{R_k} \operatorname{sh} aL = 0 \Rightarrow$$

$$R_k I_0 = -E_0 \operatorname{th} aL$$

$$E_L = E_0 \operatorname{ch} aL - E_0 \frac{\operatorname{sh}^2 aL}{\operatorname{ch} aL} = E_0 \left[\frac{\operatorname{ch}^2 aL - \operatorname{sh}^2 aL}{\operatorname{ch} aL} \right]$$

$$\bar{E}_L = \frac{E_0}{\operatorname{ch} aL} \quad \text{donc} \quad \boxed{E_0 = E_L \operatorname{ch} aL}$$

Pour une structure homogène finie, l'abaissement de potentiel E est donnée par la formule:

$$E_x = E_L \operatorname{ch} a(L-x)$$

$$\bar{E}_x = \frac{E_0}{\operatorname{ch} aL} \operatorname{ch} a(L-x)$$

Les potentiels canalisation sol seront égaux aux différences calculées augmentés de $-0,50$ V (potentiel naturel moyen vers la terre assumés par les conduites;

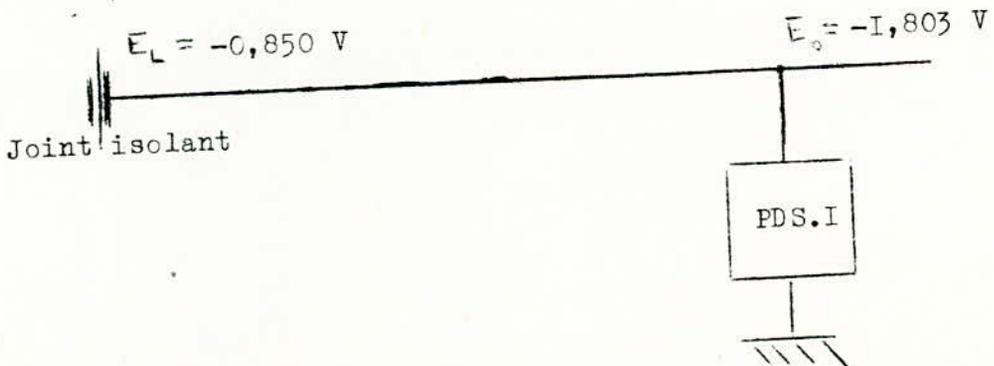
CALCUL DE L'ABAISSEMENT DE POTENTIEL LE LONG DE LA STRUCTURE

- DU PK 3+800 AU PK 29+000

PK	x (Km)	E (V)	a	L (Km)	$E_{ch}(L-x)$	E_{∞}
3+800	25,200	-0,350	0,0789	25,200	-0,350	-0,850
4+588	24,412	-0,350	0,0789	25,200	-35,06	-85,06
5+770	23,230	"	"	"	-35,42	-85,42
7+800	21,200	"	"	"	-35,75	-0,8675
10+700	18,300	"	"	"	-0,4031	-0,9031
15+000	14,000	"	"	"	-0,4877	-0,9877
18+500	10,500	"	"	"	-0,6131	-1,1131
21+560	7,450	"	"	"	-0,7334	-1,2534
25+470	3,530	"	"	"	-0,9286	-1,4286
27+270	1,730	"	"	"	-1,1430	-1,6430
29+000	0,000	"	"	"	-1,3027	-1,8027

PK 3 + 800

PK 29+ 000

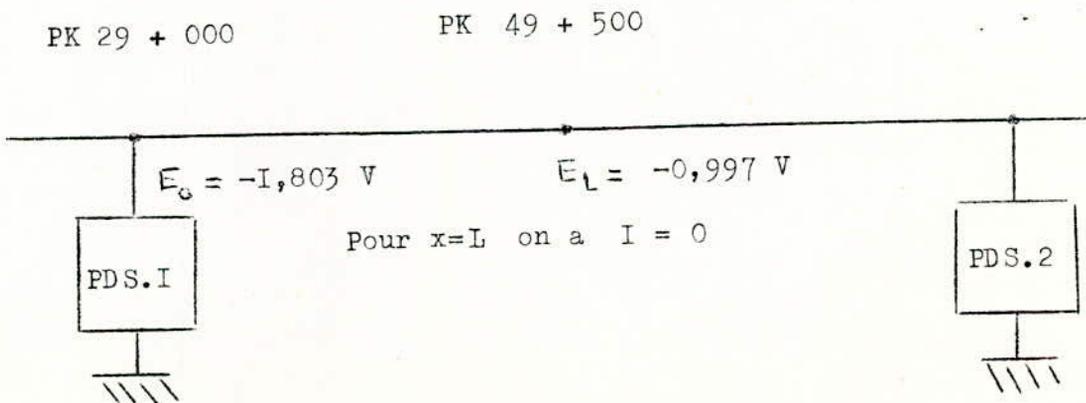


-DU PK 29 + 000 AU PK 49+ 500

$$E_L = \frac{E_0}{\text{Ch.OL}}$$

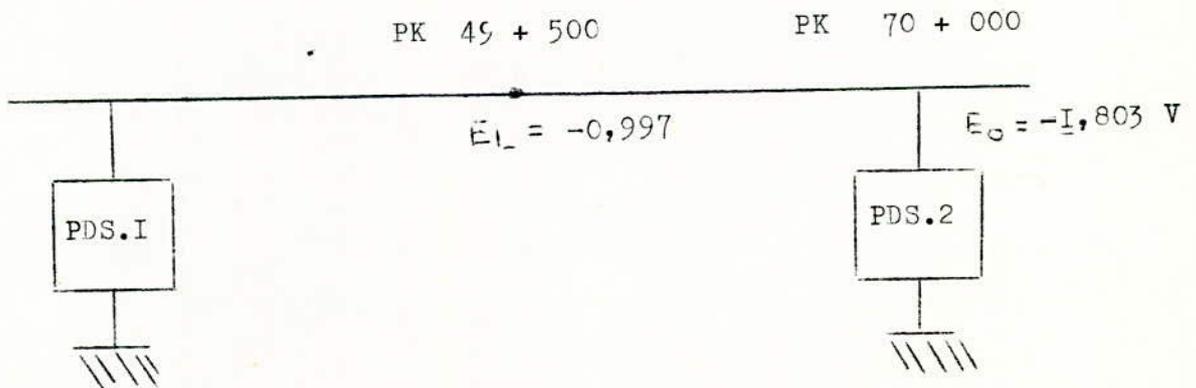
Avec $E_0 = 1,302$

PK	x (Km)	E_L (V)	a	L (Km)	$E_{Lch(L-x)}$	E_x (V)
29+000	0	-0,497	0,0789	20,500	-1,302	-1,802
29+557	0,557	-0,497	"	"	-1,250	-1,750
30+432	1,432	"	"	"	-1,174	-1,674
31+623	2,623	"	"	"	-1,079	-1,579
35+780	6,780	"	"	"	-0,8180	-1,318
38+150	9,150	"	"	"	-0,710	-1,172
41+680	12,680	"	"	"	-0,594	-1,094
42+445	13,445	"	"	"	-0,576	-1,076
46+900	17,900	"	"	"	-0,507	-1,007
48+760	19,760	"	"	"	-0,498	-0,998
49+500	20,500	"	"	"	-0,497	-0,997



-DU PK 49 + 500 AU PK 70 + 000

PK	x (Km)	E_L (V)	a	L (Km)	$E_{Lch}(L-x)$	E_{∞} (V)
49+000	20,500	-0,497	0,0789	20,500	-0,497	-0,997
51+000	19,000	"	"	"	-0,501	-1,001
55+000	15,000	"	"	"	-0,545	-1,045
58+0,12	11,988	"	"	"	-0,613	-1,113
61+900	8,100	"	"	"	-0,755	-1,255
65+000	5,000	"	"	"	-0,998	-1,418
68+240	1,750	"	"	"	-1,147	-1,647
69+750	0,250	"	"	"	-1,279	-1,779
70+000	0,000	"	"	"	-1,303	-1,803

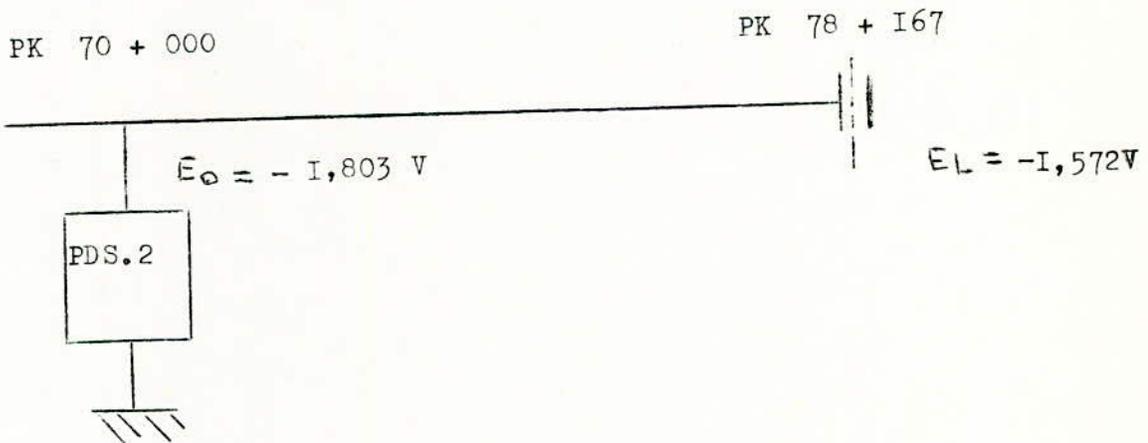


-DU PK 70+000 AU PK 78+ 167

$$E_L = \frac{E_0}{CRal}$$

Avec $E_0 = 1,303 \text{ V}$

PK	x (Km)	E_L (V)	a	L (Km)	$E_{ch}(L-x)$	E_x (V)
70+000	0,000	-1,072	0,0789	8,167	-1,303	-1,803
70+600	0,600	"	"	"	-1,269	-1,769
71+520	1,520	"	"	"	-1,223	-1,723
74+700	4,700	"	"	"	-1,112	-1,612
78+167	8,167	"	"	"	-1,072	-1,572

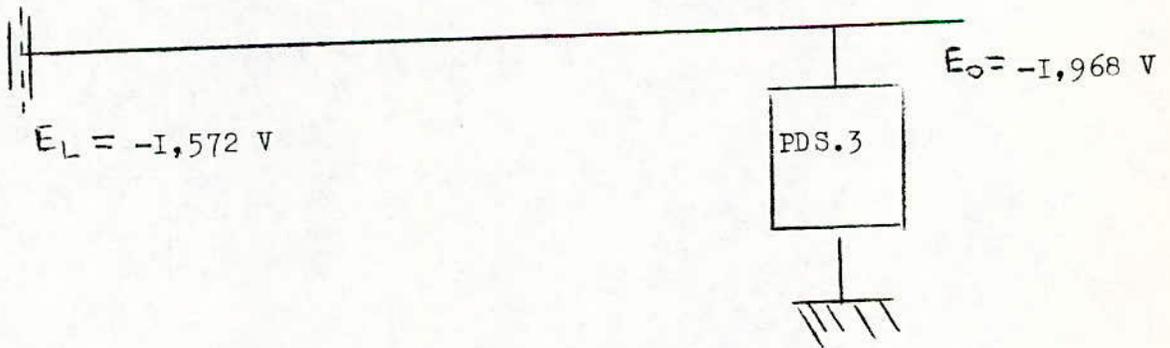


DU PK 78 + I67 AU PK 9I + 834

PK	x (Km)	E_L (V)	a	L (Km)	$E_{L \text{ ch}(L-x)}$	E_x (V)
78+I67	I3,667	-I,072	0,06II	I3,667	-I,072	-I,572
8I+420	I0,2I4	"	"	"	-I,096	-I,596
84+320	7,5I4	"	"	"	-I,I49	-I,549
85+320	6,626	"	"	"	-I,I73	-I,673
88+000	3,834	"	"	"	-I,27I	-I,77I
9I+834	0,000	"	"	"	-I,468	-I,968

Joint isolant
PK 78 + I67

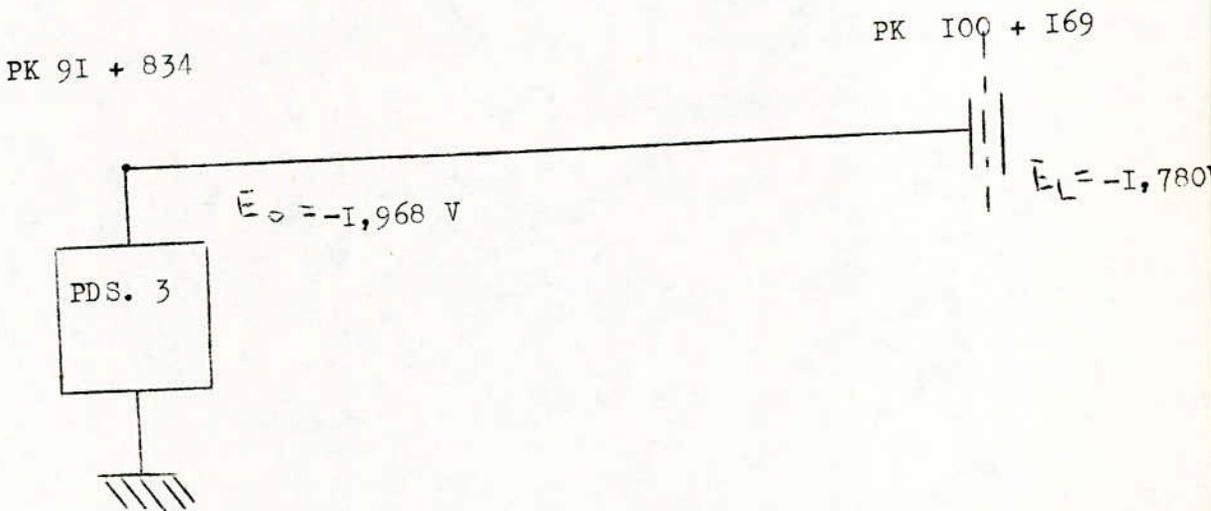
PK 9I + 834



PK 91 + 834 AU PK 100 + 169

$$E'_L = \frac{E_0}{\text{chal}} = -1,280 \text{ V}$$

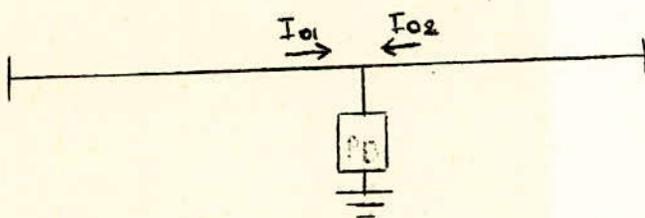
PK	x (Km)	E_L (V)		L (Km)	$E_L \text{ ch}(L-x)$	$E_{oc}(V)$
91+834	0,000	-1,280	0,0611	1,775	-1,468	-1,968
91+940	0,106	"	"	"	-1,464	-1,964
94+122	2,288	"	"	"	-1,322	-1,882
95+030	3,196	"	"	"	-1,355	-1,855
96+900	5,066	"	"	"	-1,313	-1,813
100+169	8,775	"	"	"	-1,280	-1,780



Calcul des courants de soutirage

$$I_{0_i} = \left(\frac{E_0 - 0,5}{R_k} \right) k_{hal_i} \quad (i=1,2)$$

$$I_0 = I_{0_1} + I_{0_2}$$



	I_{0_1}	I_{0_2}	I_0
PDS N°1	3,677	3,528	7,195
PDS N°2	3,528	2,168	5,697
PDS N°3	2,280	1,636	3,916

VIII.

MESURES ET CONTRÔLES

I°) MESURE DE LA RESISTIVITE DU SOL.

Il existe plusieurs méthodes de mesure de la résistivité du Sol. Les plus importantes d'entre elles sont :

- La méthode des deux terres
- La méthode des quatre terres
- La méthode de Sheppard

I.I. METHODE DES QUATRE TERRES : (Figure VIII - I)

On plante légèrement dans le sol quatre piquets métalliques sur la même ligne à la même distance (a).

A l'aide d'une pile, on fait passer un courant entre le couple extérieur (A; B) et on mesure la différence de potentiel entre le couple intérieur (C; D) . On utilise un voltmètre à haute résistance.

Si les piquets sont très peu enfoncés (0,05 a) dans le sol et si l'on admet que l'électrolyte est uniforme.

La densité de courant dans le sol en supposant une symétrie hémisphérique à la distance r de A ou B

$$J = \frac{I}{S} \quad \text{avec } I = \text{Courant total du circuit}$$

$$S' = 4\pi r^2 \Rightarrow S = \frac{S'}{2} = 2\pi r^2 \quad \text{Donc}$$

$$J = \frac{I}{2\pi r^2}$$

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= R_1 \cdot I = \rho \frac{r_1}{S} \cdot I \\ V_2 &= R_2 \cdot I = \rho \frac{r_2}{S} \cdot I \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_2 - V_1 = \frac{\rho I}{S} (r_2 - r_1)$$

$$\text{Donc} \quad \Delta V = \frac{\rho I}{S} \cdot \Delta r$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta r} = \frac{\rho I}{S} = \frac{\rho I}{2\pi r^2}$$

$$\frac{dV}{dr} = \frac{\rho I}{2\pi r^2} \Rightarrow V' = \int_r^{r_2} \frac{\rho I}{2\pi r^2} dr = -\frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right)$$

$$V' = -\frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) = \frac{\rho I}{4\pi a}$$

La différence de potentiel entre les points C et D, en raison du courant qui sort de A c'est V'.

La différence de potentiel entre les points C et D en raison du courant qui entre par l'électrode B.

$$V'' = \frac{\rho I}{4\pi a}$$

$$V_T = V' + V'' = \frac{\rho I}{4\pi a} + \frac{\rho I}{4\pi a} = \frac{\rho I}{2\pi a}$$

$$V_T = \frac{I}{2\pi a} \cdot \rho \quad \text{donc}$$

$$\rho = \frac{2\pi a \cdot V_T}{I}$$

La méthode donne la résistivité du sol à une profondeur " a " environ en changeant " a " on peut effectuer des mesures aux différents volumes.

Cette méthode est très utile pour la détermination des points d'implantation des prises de terre.

1.2. METHODE DES DEUX TERRES (Figure VIII .2.)

Deux barres à mine de 1 m. de longueur sont enfoncées dans le sol à une distance minimale de deux mètres l'une de l'autre. On mesure à l'aide d'un pont de KOHLASCH (courant alternatif, pour éviter la polarisation des deux électrodes). La résistance entre ces deux électrodes ...

Si nous considérons l'analogie électrostatique de deux corps (Piquets) immergés dans un électrolyte infini de résistivité (Sol) s'il existe entre eux une résistance finie R, en maintenant une différence de potentiel V, il circulera entre ces deux corps un courant .

Il existera en tous point de l'électrolyte une intensité électrique (I) qui correspond exactement à celle qui existerait par suite de la présence de charges électrostatiques +Q et -Q sur des corps semblables dans le vide est C. La résistance entre eux R

$$R = \frac{1}{4\pi C} \cdot g$$

R est donnée par le pont de KOHLAUGH.

$$g = 4\pi C \cdot R$$

I.1.3. METHODE SHEPPARD :

Le sol ne devant pas être disloqué au cours de la mesure, la méthode consiste à enfoncer une sonde portant deux électrodes en acier inoxydable reliée à un pont de KOHLAUGH.

Elle s'intéresse d'autre part, qu'un volume réduit de terre (dispersion réduite du champ électrique) et évite en effet tout phénomène de polarisation.

Cette façon d'opérer est la meilleure que les méthodes des deux terres ou des quatre terres qui demandent l'emploi des millivoltmètres et des milliampères. La sonde unique en forme de cannes convenablement étalonnée permet de nombreuses mesures en une même station, chaque mesure dure une vingtaine de seconde environ (Figure VIII.3)

2°) CONTROLE DE LA PROTECTION ACTIVE :

La protection cathodique bien conçue est toujours efficace à 100% à condition de fonctionner en permanence, mais la sécurité est illusoire si les installations de la protection cathodique ne sont pas surveillées rigoureusement.

La protection cathodique d'une structure est réalisée lorsque le critère de protection cathodique est vérifiée, c'est à dire que le potentiel de la structure enterrée par rapport à une électrode impla-
risable est plus négatif qu'une tension V.

Par exemple pour une électrode de Sulfate de cuivre, le potentiel de la structure doit être plus négatif que :

- 0,850 V (pour l'Acier)
- 0,700 V (pour le plomb)
- 0,600 V (pour le cuivre)

Le controle de la protection cathodique portera essentiellement sur les deux points suivants :

-Le maintient du potentiel dans le temps à des valeurs acceptables sur toute la surface à protéger.

-Le bon fonctionnement des dispositifs produisant ces potentiels

2.1. LES ELECTRODES IMPOLARISABLES (Tableau VIII.I.).

Ils existent quatre sortes principales d'électrodes de référence dites impolarisables, ce qui signifie que le passage de courant dans un sens ou dans l'autre ne déterminera aucune variation de potentiel propre de l'électrode.

- Electrode à Hydrogène (ou Electrode de NERNST.)

- Electrode au Calomel

- Electrode au Sulfate de cuivre $Cu / CuSO_4$

- Electrode au Chlorure d'Argent $Ag / AgCl$

2.1.1. ELECTRODES A HYDROGENE

Elle n'est utilisée qu'en laboratoire, elle est constituée par une lame de platine plongée dans une atmosphère d'Hydrogène pur soufflé par une solution d'Acide sulfurique en H^+ .

- Son potentiel constant à 10^{-4} V Près est adopté comme Zéro conventionnel.

- Par rapport au potentiel Zéro (réel) ou absolu, le potentiel de l'électrode d'Hydrogène est 0,277 Volts.

2.1.2. ELECTRODES AU CALOMEL (Figure VIII.4)

Elle est constituée par la chaîne $KCl / Hg_2Cl_2 / Hg$ Cette demi-pile est réalisée par une solution de Chlorure de Potassium de concentration variable.

L'Electrode de KCl saturé est facile à préparer, mais son potentiel est quelquefois plus long à se stabiliser lors des changements de température que celui des électrodes non saturés. L'Electrode à 0: IN à le plus bas coefficient de température.

2.1.3. ELECTRODES A SULFATE DE CUIVRE .(Figure VIII. 5)

Cette Electrode est constituée de cuivre métallique immergé dans du Sulfate de cuivre saturé. Son utilisation principale est la mesure dans les terrains qui nécessitent l'emploi d'une Electrode résistante aux chocs et ses dimensions importantes minimisent les erreurs de polarisation

Son usage est très répandu en raison de sa grande simplicité et aussi parce que la précision est suffisante pour la plupart des mesures de corrosion.

2.1.4. ELECTRODES A CHLORURE D'ARGENT.

Elle est constituée par un récipient contenant du Chlorure d'argent en solution saturées dans laquelle est plongée une barre d'argent.

Le potentiel doit être fréquemment vérifié par rapport à une Electrode au Calomel, car il évolue continuellement en vieillissant. Cette Electrode est très utilisée en eau de Mer.

REMARQUE:

Le potentiel propre des électrodes impolarisables varie avec la température. La formule de correction est la suivante:

$$E = E_0 + \frac{dE}{dt} (t - 25^{\circ}C)$$

Avec E_0 : potentiel de l'électrode impolarisable à 25° C

$$\frac{dE}{dt} = -2,4 \times 10 \quad \text{Pour l'électrode à calomel I N}$$

$$\frac{dE}{dt} = -7,6 \times 10 \quad \text{Pour l'électrode à calomel saturé}$$

$$\frac{dE}{dt} = -6,5 \times 10 \quad \text{Pour l'électrode au sulfate d'argent}$$

$$\frac{dE}{dt} = -9 \times 10 \quad \text{Pour l'électrode au sulfate de cuivre}$$

2.2. MESURE DES POTENTIELS

La connaissance du potentiel des canalisations en acier dans le sol est indispensable pour connaître l'efficacité de la protection cathodique. On pourrait mesurer ce potentiel en intercalant un voltmètre entre la canalisation et un piquet métallique fiché à terre. Ce piquet devient lui-même une demi pile dont le potentiel varie selon l'état et selon la nature du sol.

De telles mesures ne sont pas compatibles et reproductibles dans le temps, donc on utilise les électrodes impolarisables ou électrodes de référence. Le potentiel de la conduite par rapport au sol est donnée par la formule.

E_s : Potentiel de la canalisation/Sol

E : Potentiel de la canalisation/électrode de référence

$E_s = E + R$ Avec

R : Potentiel propre de l'électrode de référence

Dans l'utilisation du voltmètre comme appareil de mesure du potentiel conduite-électrode de référence il existe deux sources d'erreurs possibles

- Le courant qui circule à travers l'instrument de mesure introduit une chute de tension dans le reste du circuit et cette chute de tension n'est pas incluse dans la lecture.

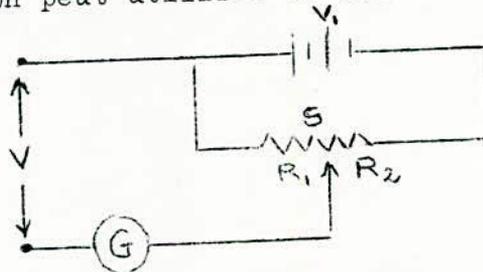
Par exemple : si la résistance du circuit extérieur (pipe, sol et électrode) est le 1/4 de résistance du voltmètre, alors le voltmètre indiquera seulement le 4/5 du potentiel total, donc on aura une erreur de 20 %

- Le passage du courant à travers le circuit peut polariser l'électrode ou même la conduite et ainsi change le potentiel que l'on désire mesurer.

- Ces erreurs peuvent être minimisées en utilisant des millivoltmètres très sensibles et qui ont des résistances internes très élevées, une résistance interne de 50 000 Ω / volt ou 100 000 Ω /volt donnent en général une précision suffisante.

On peut aussi utiliser des potentiomètres simples ou des potentiomètres électroniques pour déterminer le potentiel de la conduite.

I. On peut utiliser le Schéma suivant : (Figure VIII.6)



(Figure VIII.6)

Quand le potentiomètre est ajusté alors, il n'y a aucune déviation du galvanomètre G.

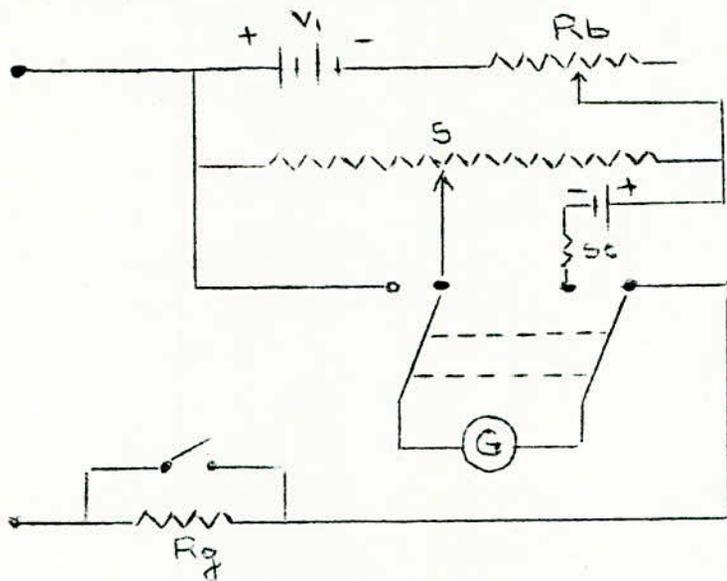
Quand une tension est appliquée à l'entrée, alors cette tension est directement déterminée par la position du curseur.

Soit V_1 : La tension de la batterie

la tension V appliquée à l'entrée est donnée par la formule

V : Potentiel conduite-électrode de référence.

2. On peut utiliser le Schéma (I) avec quelques modifications



(Figure VIII. 7)

On a ici le circuit (I) modifié avec l'utilisation d'une batterie de tension réglable par la résistance R_b , et utilisant une électrode standard pour le calibrage (S_c). La résistance R_g protège le galvanomètre contre les excès de courant, cette résistance est court-circuitée si on a un courant normal.

2.2.1. EN fouille ouverte la conduite étant accessible (figure VIII . 8)

On placera l'électrode sur le sol aussi près que possible de la conduite et si nécessairement on mouillera convenablement à son emplacement et on cherche ainsi le potentiel conduite électrode.

2.2.2. Lorsque la conduite n'est pas accessible. Figure VIII . 9 .)

On placera l'électrode sur le sol, au dessus de la conduite. Il est souhaitable dans ce cas de disloquer le sol à l'aide d'un briquet à mine sur quelques centimètres de profondeur, de verser de l'eau dans l'entonnoir ainsi constitué et d'y placer ensuite l'électrode.

On veillera à placer l'électrode hors de l'influence d'une prise de terre en service ou d'une Anode réactive parceque le champ électrique qui régné dans le voisinage de ces installations faussera les mesures

pour les structures de grandes dimensions, il n'est pas pensable de mesurer en permanence le potentiel en chaque point.

Si le potentiel est stable, une mesure permanente n'a d'ailleurs aucun intérêt et si le potentiel est évolutif un enregistreur en chaque point serait prohibitif du point de vue économique. Or le potentiel étant produit par des sources extérieures aux caractéristiques bien définies. On peut logiquement penser que tant que ces caractéristiques se maintiendront, les résultats se maintiendront également. cependant il faut tenir compte de ce que les conditions de corrosion du milieu peuvent évoluer par exemple pour les pipes.

-Polarisation

-modification de la résistivité de la terre

-Présence des voies ferrées électrifiées

Pose dans le voisinage d'autres conduites protégées

2.3. MESURE DES INTENSITES.

- Dans le circuit des Anodes réactives, les débits sont faibles et dépassent rarement 500mA.

- Dans une coupure de canalisation, s'il n'y a qu'un courant d'origine géologique le débit est aussi faible, si par contre il existe des courants vagabonds les intensités mesurées peuvent être très élevées

2.3.1. MESURE DES DEBITS ELEVES.

Les intensités supérieures à un ampère peuvent être mesurées avec un milliampermètre ou un ampermètre du type courant, c'est à dire de résistance interne assez élevée sans qu'il en résulte d'erreur sensible.

2.3.2. MESURE DES DEBITS FAIBLES.

Lorsque les intensités à mesurer sont faibles, alors il convient d'utiliser des milliampermètres très sensibles, toutefois leur résistance interne est suffisamment élevée pour que les lectures soient faites par défaut si le courant à mesurer est très faible.

1. Il y a alors lieu de faire plusieurs mesures deux par exemple sur des sensibilités différentes. On peut connaître les résistances internes de l'appareil qui y correspond.

- On fait une première mesure sur la sensibilité \mathcal{I}_1 On relève alors le courant I_1 , et la résistance de l'appareil r_1 .

- On fait une deuxième mesure sur la sensibilité \mathcal{I}_2 On relève alors le courant I_2 et la résistance de l'appareil r_2 .

Donc on a :

$$(R + r_1) I_1 = R I \Rightarrow R (I - I_1) = r_1 I_1 \quad (1)$$

$$(R + r_2) I_2 = R I \Rightarrow R (I - I_2) = r_2 I_2 \quad (2)$$

I: c'est le débit réel. D'après les équations (1) et (2)

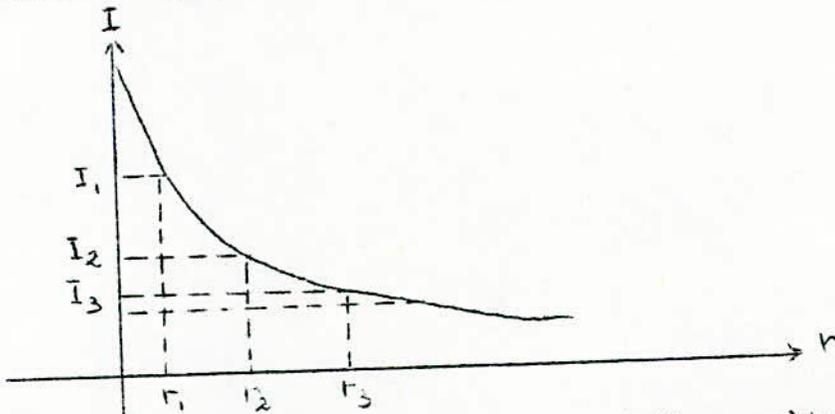
$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{r_1 I_1}{I - I_1} \\ R &= \frac{r_2 I_2}{I - I_2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{r_2 I_2}{I - I_2} = \frac{r_1 I_1}{I - I_1}$$

$$I \left[\frac{1}{r_1 I_1} - \frac{1}{r_2 I_2} \right] = \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}$$

Donc

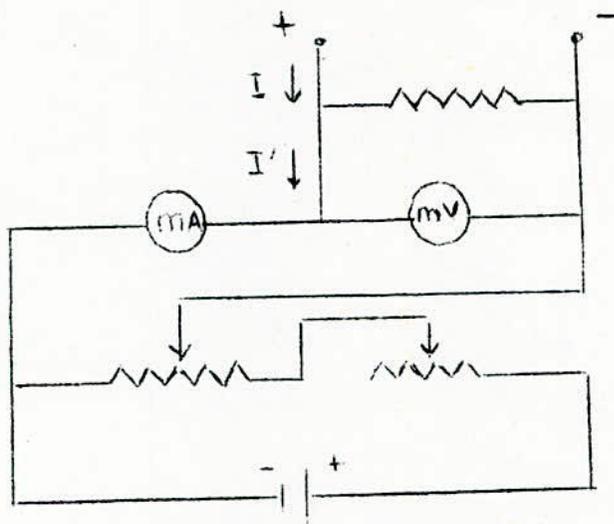
$$I = \frac{(r_2 - r_1) I_1 I_2}{r_2 I_2 - r_1 I_1}$$

2. On peut aussi, après avoir fait quatre ou cinq mesures sur des sensibilités différentes, construire par point la courbe et l'extrapoler jusqu'à $r = 0$.



3. Enfin le mieux est d'utiliser un milliampermètre à opposition de courant dans la résistance interne peut alors être considérée comme nulle

Le courant à mesurer I et le courant I' passant dans le milliampermètre sont en opposition dans la résistance R , ils sont amenés à égalité par le jeu du Rhéostat et du potentiomètre. Cette égalité est appréciée par le millivoltmètre. (Figure VIII.10)



(Figure VIII.10)

2.4. PERIODICITE DES OPERATIONS DE CONTROLE ET D'ENTRETIEN DE LA PROTECTION CATHODIQUE.

2.4.1. OPERATIONS SYSTEMATIQUES ET INDISPENSABLES

Elles peuvent être effectuées par un agent non spécialisé en protection Cathodique, mais connaissant le maniement du voltmètre et de l'ampermètre.

I. tous les huit jours

I.1. Pour le Soutirage

-

- Relevé des indications des instruments de mesure

- Voltmètre (Tension de sortie)

- Ampermètre (Débit de protection)

- Compteur Secteur (Consommation électrique)

I.2. POUR LE DRAINAGE.

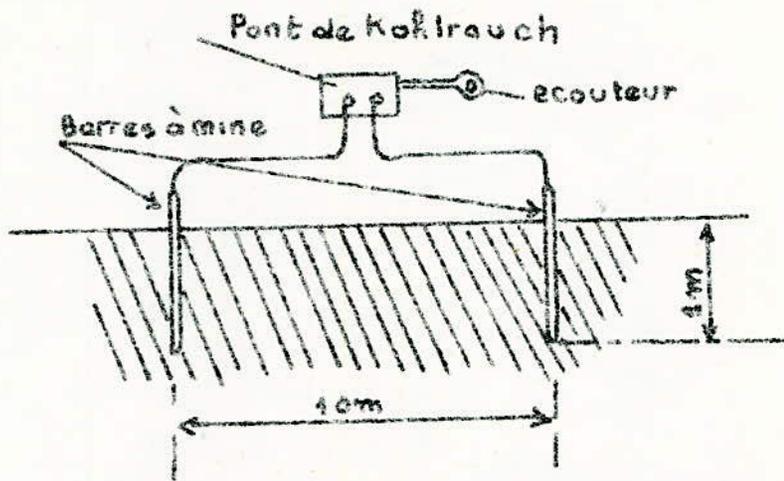
- 1. Relevé des indications des instruments

- Compteur horaire

- Compteur d'impulsion

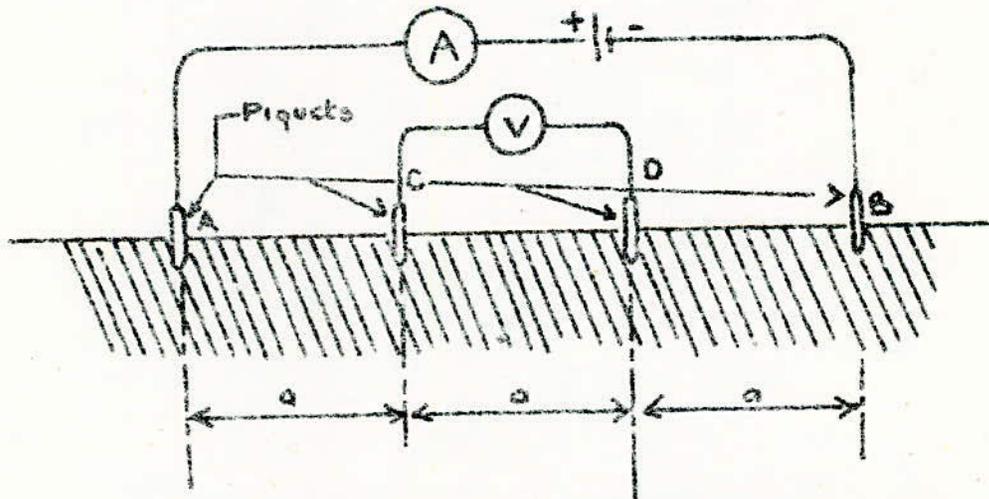
2. DEUX FOIS PAR AN.

2.1. Mesure de potentiel de l'ensemble de la structure à l'aide d'un voltmètre et d'une électrode impolarisable.



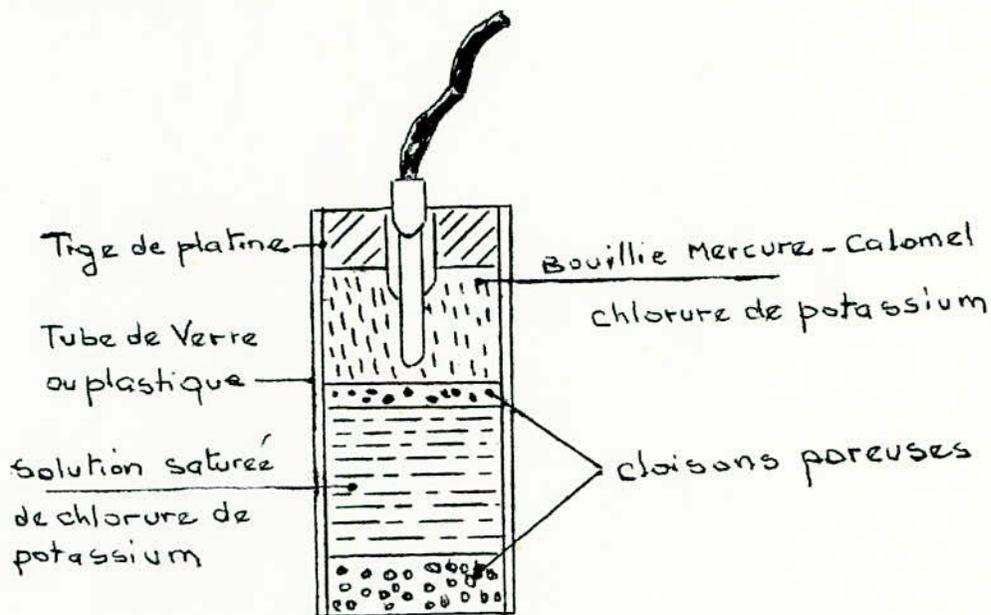
METHODE DES DEUX TERRES

Figure VIII. 2



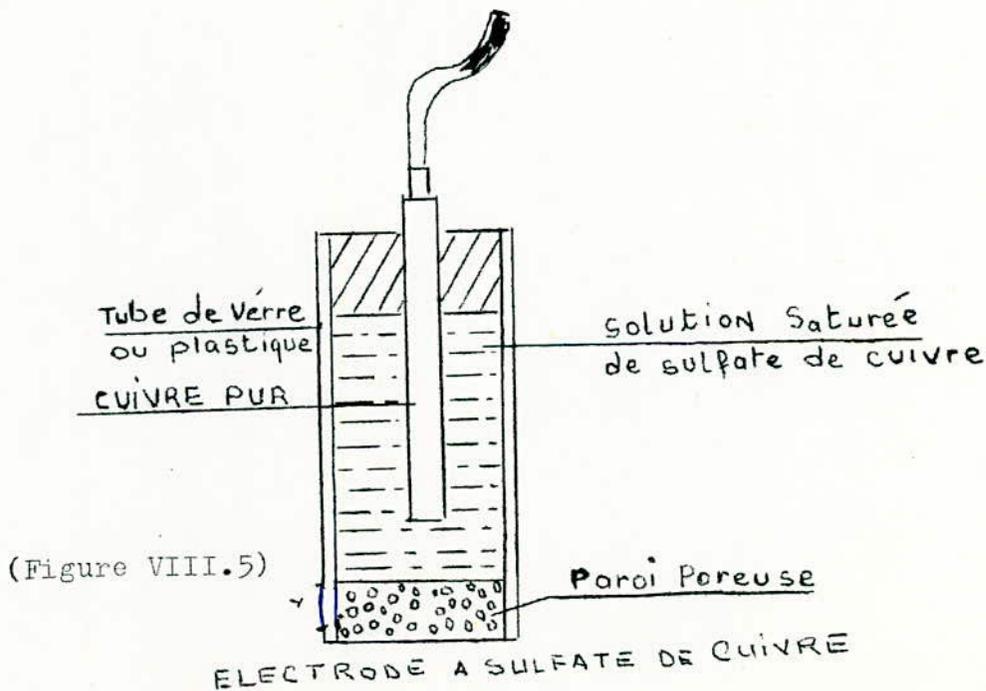
METHODE DES QUATRE TERRES

Figure VIII. 2



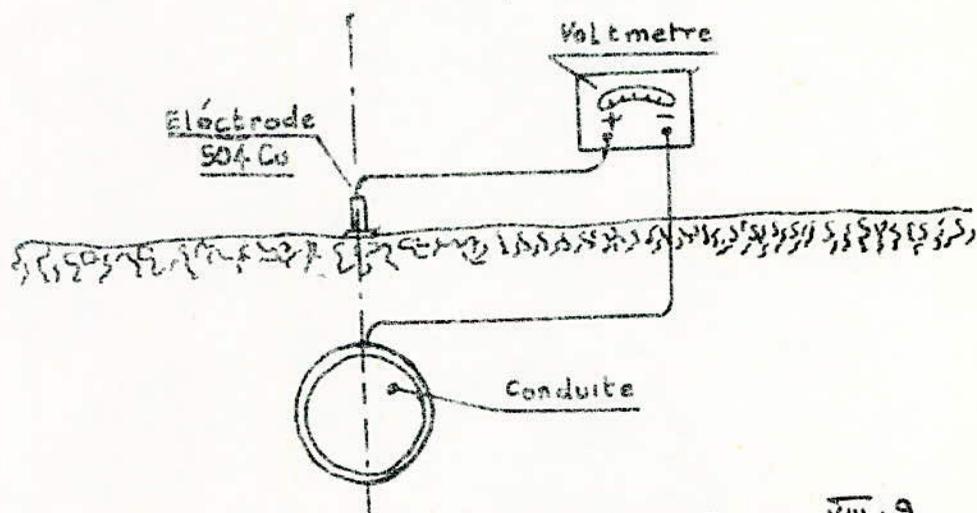
ELECTRODE au CALOMEL

(Figure VIII.4)

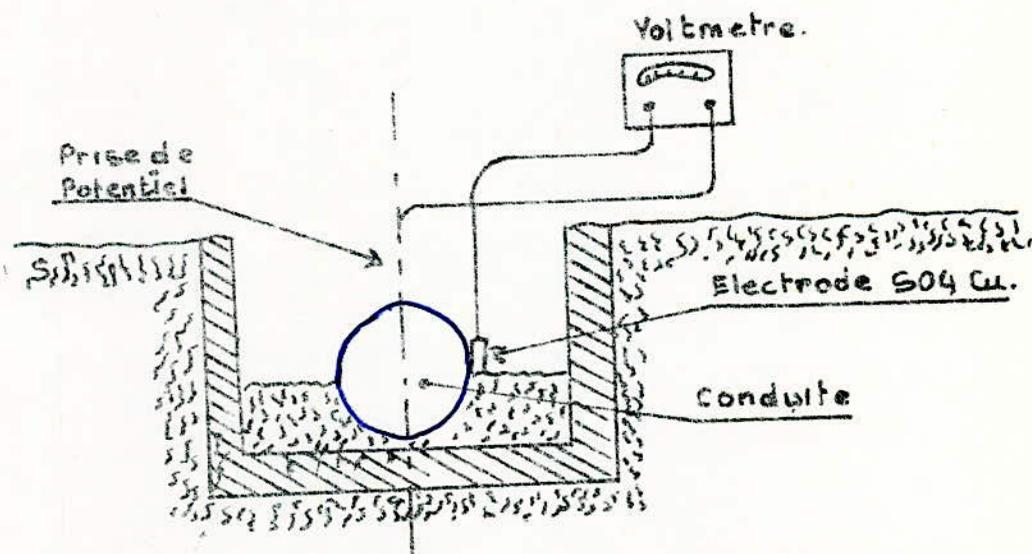


(Figure VIII.5)

MESURE DU POTENTIEL



Canalisation non accessible. Figure VIII-9



Canalisation accessible. - mesure de potentiel

en fouille ouverte. Figure VIII-8

2.2. Mesure des potentiels produits par les anodes réactives et du débit de celle-ci.

2.4.2. OPERATION SOUHAITABLE CHAQUE SEMESTRE

- La visite complète de l'installation .
- Les mesures contrôlant la bonne utilisation de l'appareillage

3°) CONTROLE DE LA PROTECTION PASSIVE :

3.1. CONTROLE DU REVETEMENT :

Une fois la canalisation posée et remblayée, il est possible de suivre les variations de l'efficacité du revêtement ou même de détecter les défauts sans accéder directement au tube.

DETECTION DES DEFAUTS DU REVETEMENT :

La détection peut être effectuée par la méthode de PEARSON; Elle consiste à créer une différence de potentiel alternative entre le tube et le sol puis à détecter la chute de potentiel au voisinage d'un défaut de revêtement.

La détection est réalisée par deux zones qui se déplacent le long de la conduite séparés l'un et l'autre par une distance de sept mètres environ. Chaque homme porte des crampon métalliques aux chaussures, on peut détecter la différence de potentiel entre les deux hommes qui se traduit par un signal audible par l'homme qui marche en tête. Lorsque celui-ci approche d'une zone présentant des défauts l'intensité du signal augmente passe par un maximum lorsqu'il se trouve au dessus des défauts.

3.2. CONTROLE DES JOINTS ISOLANTS.

On appelle ensemble isolant : un élément de canalisation destiné à séparer électriquement deux parties de cette structure. Le contrôle ne porte pas sur le joint isolant lui-même mais sur un raccord ou un ensemble isolant.

3.2.1. CONTROLE DU JOINT ISOLANT EN USINE.

Le contrôle des ensembles isolants comprendra :

- Un éventuel contrôle radiographique des soudures
- des essais hydrostatique

-Le contrôle diélectrique des ensembles isolants devra être vérifié à une tension électrique : fonction des conditions auxquelles la conduite est soumise.

3.2.2. CONTROLE SUR CHANTIER A LA POSE

Un contrôle ohmique devra être fait après raccordement d'une des manchettes et avant raccordement de la deuxième (une cote de l'ensemble en l'air).

De plus le cas échéant le bon isolement des tiges filetées isolées sera contrôlé par rapport à chaque bride. Ce contrôle pourra être fait à l'ohmètre ou à la magnéto.

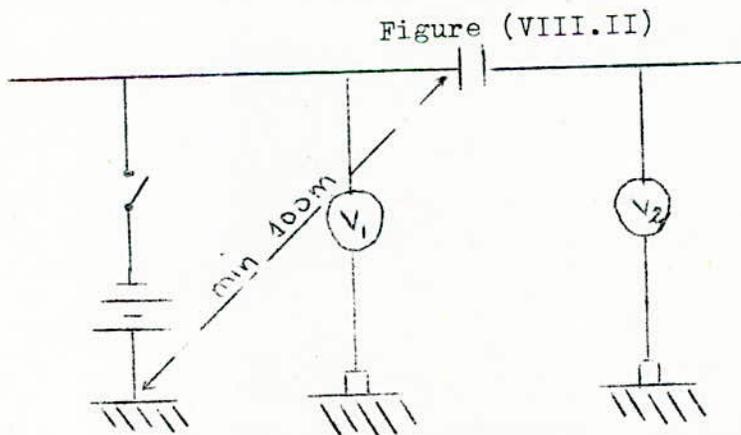
3.2.3. CONTROLE AU COURS D'EXPLOITATION.

Un ensemble isolant est caractérisé par sa résistance électrique. Celle-ci est difficilement mesurable sur un joint en place. Il faut des mesures délicates, précises et le pourcentage d'erreurs est souvent élevé. On se contente en général de contrôler le potentiel de la conduite par rapport au sol de part et d'autre du joint.

En cas de variation par rapport aux mesures précédentes on cherchera à apprécier l'état du joint, alors on utilisera l'une des méthodes décrites en (1). Si le joint isolant est douteux et s'il s'avère indispensable de connaître la valeur de la résistance; alors on utilisera l'une des méthodes décrites en (2).

(1) APPRECIATION DU JOINT ISOLANT:

I.1 PAR VARIATION DE POTENTIEL



La variation de potentiel doit être la plus grande possible pour permettre la meilleure appréciation du joint. un interrupteur périodique peut être intercalé dans le circuit du poste de soutirage existant. Si cette solution ne crée pas une ΔV suffisant il faudra mettre en place un poste provisoire à proximité du joint isolant sur lequel sera monté l'interrupteur périodique.

- Le joint est en bonne état si V_2 ne varie pas ou varie dans le sens contraire de V_1 .

- Le joint est douteux si V_2 varie de quelques dizaines de millivolts dans le même sens que V_1 .

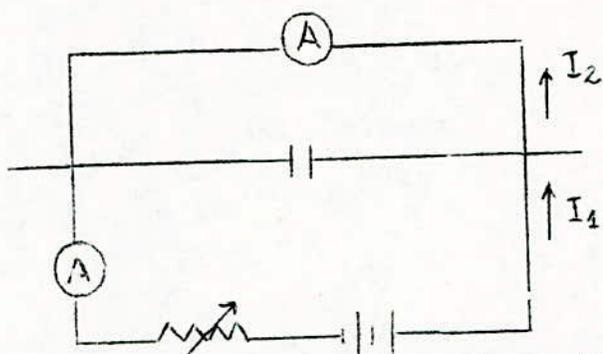
- Le joint est mauvais si V_2 est voisin ou égale à V_1 .

1.2 PAR VARIATION D'INTENSITE:

La méthode se fait en deux temps

- Lors de la pose de la canalisation ce qui permet de connaître la valeur de l'intensité I_2 initial.

- Au moment du contrôle, en utilisant des appareils de même résistance interne.



(Figure VIII.12)

On applique aux bornes du joint isolant une tension que l'on règle par l'intermédiaire d'une résistance variable pour obtenir une intensité donnée I_1 égale à celle obtenue lors du 1^o contrôle du joint isolant alors qu'il était en bonne état.

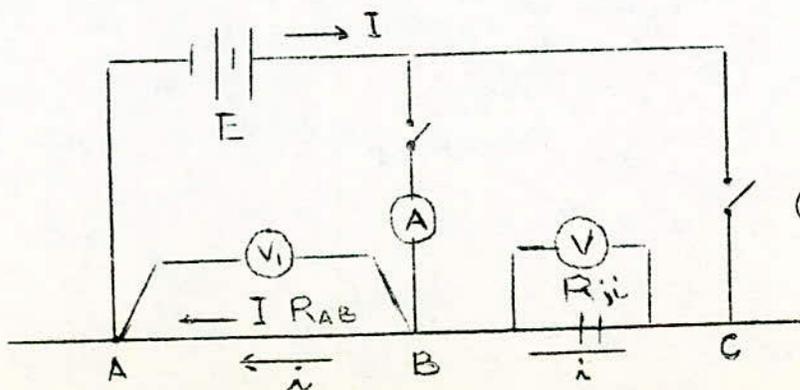
- Le joint est en bonne état si I_2 voisin de I_2 initial

- Le joint est douteux si I_2 est inférieur à I_2 initiale

- Le joint est mauvais si I_2 est égal ou voisin de zéro.

2) DETERMINATION DE LA VALEUR EN D'UN JOINT ISOLANT:

Méthode de contrôle par circulation du courant



(Figure VIII.13)

La conduite doit être hors de terre et parfaitement isolée du sol entre les points A et C.

Un courant i circulant à travers le joint détermine une chute de tension

V_1 : Entre A et B

V : aux bornes du joint

Il est nécessaire que la chute de tension V soit suffisante pour être mesurable avec une précision acceptable, ce qui peut obliger à surimposer au courant de protection un courant supplémentaire obtenu à l'aide de la batterie E.

$$R_{ji} \text{ du joint} = \frac{V}{i}$$

Avec $i = \frac{V_1}{R_{AB}}$

R_{AB} EST déterminé par étalonnage en injectant un courant I entre A et B, courant qui produit une variation de tension V

On a ; $R_{AB} = \frac{\Delta V_1}{I}$

$$R_{ji} = \frac{V}{V_1} \cdot \frac{\Delta V_1}{I}$$

Cette méthode, précise pour les faibles diamètres, ne peut s'appliquer pour les diamètres importants qu'à la condition de disposer d'une longueur AB suffisante pour permettre une lecture significative de V_1 .

IX CONCLUSION.

Les frais de construction des ouvrages pétroliers sont toujours très élevés. Il importe donc d'assurer la bonne gestion du capital ainsi immobilisé. Dans ce but il convient :

- D'accroître au maximum la durée de vie des ouvrages
- D'éviter les arrêts imprévus susceptibles d'entraîner des manques à gagner importants.
- De réduire les frais d'entretien en évitant les réparations.

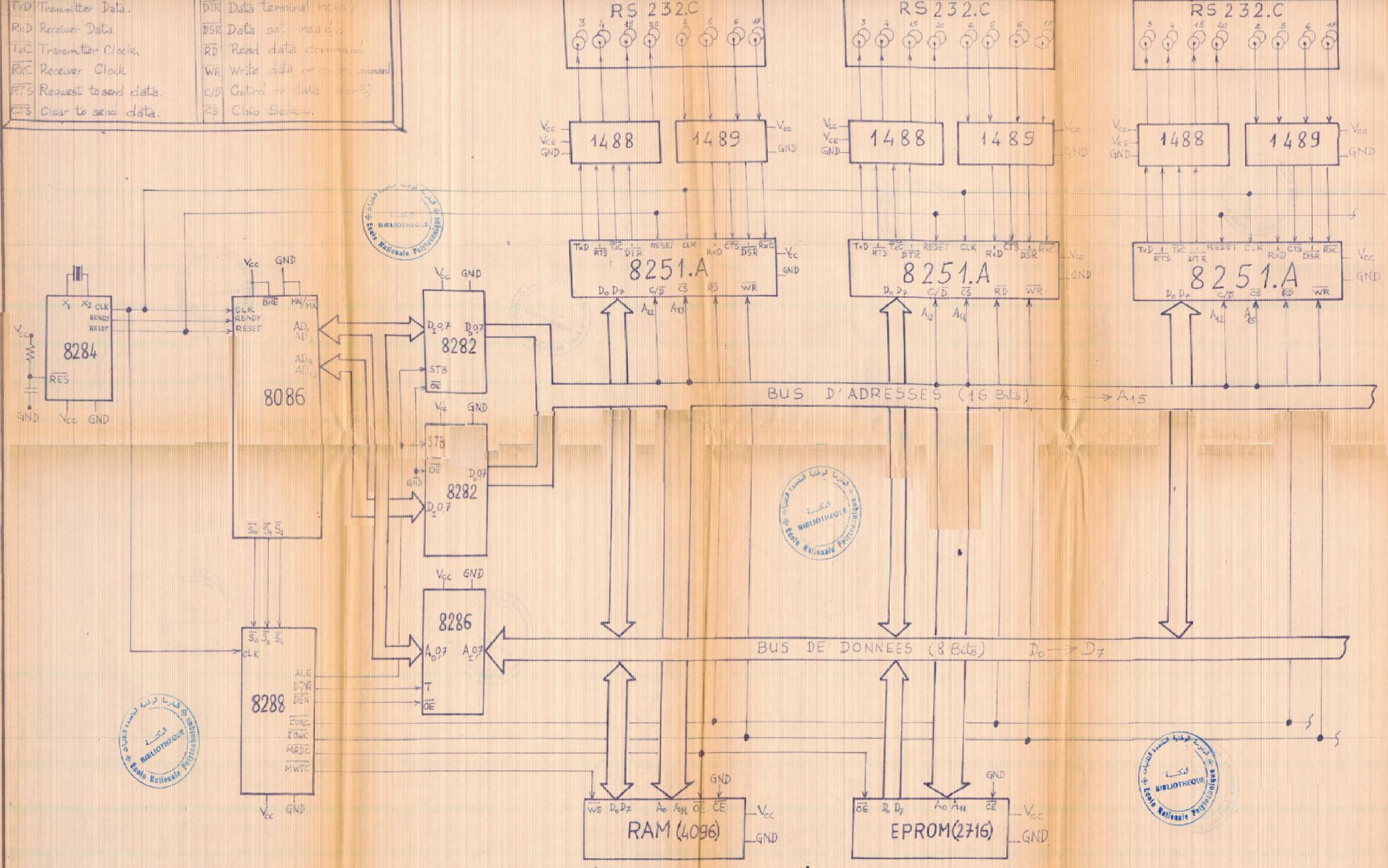
Or la protection Cathodique permet d'éviter toute Corrosion extérieure et a de ce fait une incidence bénéfique directe sur chacun de ces facteurs.

Comme on le voit la protection Cathodique est presque un remède universel. Il ne faudrait pas en déduire qu'elle est toujours facile à mettre en oeuvre. Appliquée sans discernement elle peut conduire à des désastres: Influence sur les voisins, décollement de peinture, destructions d'inoxidables, etc.... Elle doit être confiée à des personnes compétentes qui l'appliquant dans les règles de l'Art en tirant une efficacité égale à Cent pour Cent, pour un coût que tous les utilisateurs s'accordent à reconnaître vraiment négligeable par rapport aux valeurs des ouvrages protégés.

BIBLIOGRAPHIE.

- LE TRANSPORT DES HYDROCARBURES LIQUIDES ET GAZEUX PAR CANALISATION
par J.VINCENT
- CATHODIC PROTECTION INDSAY M.APPLEGATE
- METALLURGIE GENERALE par J.BENARD A. MICHEL
- LA CORROSION DES CONDUITES D'EAU ET DE GAZ MARC NEVEUX
- I F P (Institut Français du Pétrole) . I.77. M. ROCHE
- IFP. (Institut français du Pétrole). 6.76 M. ROCHE J.P.SAMARAN
- PROTECTION CATHODIQUE JOHN H. MORGAN.
- PROTECTION CATHODIQUE DES CANALISATIONS ET OUVRAGES ENTERRES
par R. LEGRAND.
- CORROSION ET PROTECTION . H.H. UHLIG.
- MANUEL DE PROTECTION CATHODIQUE
(Chambre Syndicale de la Recherche et de la Production du Pétrole
et du Gaz Naturel).
- PROTECTION CONTRE LA CORROSION par LOUIS LACOURCELLE
- I F P 5.1974 par P.ROCHELLE ET J. ANDREYEWISLER
- PIPE LINE CORROSION AND CATHODIC PROTECTION
par MARSHALL E.PARKER
- COURS D'HYPERFREQUENCES par AHMED ZARGUERAS (Année 77-78)
- POIRIER (G) PRECIS DE PROTECTION CATHODIQUE APPLIQUEE
AUX CANALISATION EN ACIER.

TxD	Transmitter Data.	DTR	Data Terminal Ready
RxD	Receiver Data.	DSR	Data set ready
TxC	Transmitter Clock.	RD	Read data command
RxC	Receiver Clock.	WR	Write data or control command
RTS	Request to send data.	C/D	Control or data (chip?)
CTS	Clear to send data.	CS	Chip Select.



SCHEMA DE LA CARTE D'AIGUILLAGE.