

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Chimique

**MEMOIRE DE**  
**POST-GRADUATION SPECIALISEE**  
*« Economie de l'Energie, Maîtrise et Applications »*

Intitulé :

**CONTRIBUTION DE LA LUTTE CONTRE LA  
CORROSION DES CANALISATIONS ENTERREES  
DANS LES ECONOMIES D'ENERGIE**

Présenté par : BELABED Wassil,  
TAHRAOUI Abdelhalim

Soutenu le 25 Novembre 2008 devant la commission d'examen :

Pr. T. AHMED ZAÏD  
Dr. F. MOHELLEBI

Pr. M. HADDADI

Président  
Examineur  
Examineur  
Rapporteur

Invité

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERAL</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : APPROCHE ECONOMIQUE</b>	<b>2</b>
<b>CHAPITRE II : GENERALITES SUR LA CORROSION</b>	<b>3</b>
<b>II.1 Facteurs de corrosion</b>	<b>4</b>
II.1.1 Milieu d'attaque	
II.1.2 Nature du métal	
II.1.3 Conditions d'emploi	5
II.1.4 Influence du temps	
<b>II .2 Les différents types de corrosion</b>	<b>6</b>
II.2.1 Corrosion par attaque directe	
II.2.2 Corrosion par formation de piles	
II.2.2.1 Hétérogénéité de la structure	
II.2.2.1.a Corrosion galvanique	
II.2.2.1.b Hétérogénéité de la matière	7
II.2. 2.2 Hétérogénéité de l'électrolyte	
II.2.2.2.a Aération différentielle	
II.2.2.2.b Pile géologique	8
II.2.3 Corrosion biologique	9
II.2.4 Corrosion par courants vagabonds	10
<b>II. 3 Pile électrochimique</b>	<b>12</b>

<b>II. 4 Equivalent poids du courant de corrosion</b>	<b>13</b>
<b>II .5 Résistivité électrique des sols</b>	<b>15</b>
<b>II. 6 Potentiel d'un métal</b>	<b>19</b>
<b>II.7 Diagramme de corrosion</b>	<b>21</b>

## **CHAPITRE III : LA PROTECTION CONTRE LA CORROSION**

<b>III Principes des protections anti-corrosion</b>	<b>23</b>
<b>III 1 Protection passive</b>	<b>25</b>
<b>III 1 1 Les revêtements diélectriques</b>	
<b>III 1 1 1 Les différents types de revêtement</b>	<b>26</b>
<b>III 1 1 2 Qualités d'un revêtement</b>	<b>27</b>
<b>III 1 1 3 Mode d'application</b>	
<b>III 1 2 Les raccords isolants</b>	<b>28</b>
<b>III 1 2 1 Raccord isolant monobloc</b>	
<b>III 1 2 2 Raccord isolant à brides</b>	
<b>III 2 Protection active</b>	<b>30</b>
<b>III 2 1 Protection cathodique</b>	
<b>III 2 1 1 Protection par anodes réactive</b>	<b>34</b>
<b>III 2 1 2 Protection par soutirage de courant</b>	<b>35</b>
<b>III 2 2 Drainage de courant</b>	

## **CHAPITRE III : CALCUL DU COURANT DE PROTECTION**

<b>III 1 Calcul du courant protecteur</b>	<b>37</b>
<b>III 2 Rôle et importance du revêtement</b>	<b>40</b>

**CHAPITRE IV : ETUDE DE CAS**

**IV 1 Description de l'ouvrage**

**IV 2 Caractéristique de la protection**

**IV 2 1 Protection passive**

**IV 2 1 1 Le revêtement**

**IV 2 1 2 Les raccords isolants**

**IV 2 1 3 Coffrets de shuntage**

**IV 2 2 Protection active**

**IV 2 2 1 Protection provisoire**

**IV 2 2 2 Protection définitive**

**IV 2 2 2 a Emplacement des postes de soutirage**

**IV 2 2 2 b Emplacement des prises de terre**

**IV 2 2 2 c Rail pour prise de terre**

**IV 2 2 2 d Poussier de coke**

**IV 3 La mise à la terre des postes gaz et postes de soutirages**

**IV 4 Liste du matériel**

**IV 5 Résultats des calculs**

**IV 6 Mise en service**

# **CHAPITRE V : ETUDE ET PROPOSITION D'UN CIRCUIT DE COMMANDE POUR LE TRANSFO-REDRESSEUR**

## **V 1 Etude de redresseur**

### **V 1 1 Schéma de principe**

### **V 1 2 Etude du fonctionnement**

### **V 1 3 Etude des tensions**

### **V 1 4 Etudes des courants**

## **V 2 circuit de commande**

### **V 2 1 Générateur de dents de scie**

### **V 2 2 Le comparateur**

### **V 2 3 Multivibrateur Astable**

### **V 2 4 La mise en forme**

### **V 2 5 Amplificateur de courant**

### **V 2 6 Transformateur d'impulsions**

### **V 2 7 Diodes de roue libre**

## **CONCLUSION**

## **ANNEXES**

## **BIBLIOGRAPHIE**

## **INTRODUCTION**

Tous les ouvrages métalliques enterrés ou immergés sont soumis à des phénomènes de corrosion plus ou moins intenses. Ils nuisent à la pérennité des structures, compromettent l'environnement et coûtent à la société des dizaines de millions de dollars chaque année dans le monde.

Parmi les dispositions mises en œuvre pour se prémunir contre cette agression, la protection cathodique est aujourd'hui, sans conteste, le moyen le plus sûr et le plus efficace.

Elle a été reconnue comme telle par l'ensemble des spécialistes mondiaux de la corrosion et des salissures marines.

Grâce à une polarisation électrique adéquate de la structure en contact avec un électrolyte (sol ou eau), la protection cathodique interdit tous les phénomènes d'oxydation du métal qui sont alors thermodynamiquement irréalisables.

L'objectif de notre travail dans une étape préliminaire, est de faire une étude détaillée sur la technique de protection cathodique par soutirage de courant.

Dans une deuxième étape, on se propose de développer un circuit électronique de commande pratique permettant le réglage du potentiel d'injection d'une façon automatique..

Nous terminons cette étude par une application à un cas réel.

## **IMPACT DE LA CORROSION SUR L'ECONOMIE**

La corrosion est un phénomène naturel ayant un impact financier dans de nombreux secteurs industriels partout dans le monde. En effet, une étude récente a montré qu'aux Etats-Unis, les dépenses liées à la corrosion que ce soit en investissement ou en maintenance, représentent 3 % du PIB. C'est donc un facteur économique important qui se double, dans le cas du transport des hydrocarbures, de considérations sécuritaires majeures. Le réseau de transport des hydrocarbures Algériens est âgé en moyenne de 25 ans. Les résultats d'expertises de l'état des canalisations d'une part et Les inspections par piston instrumenté d'autre part, accréditent la thèse selon laquelle le risque d'atteinte à l'intégrité des canalisations du fait de la corrosion augmenterait dans les décennies à venir si des mesures compensatoires n'étaient pas prises.

Le niveau de vigilance doit donc être accru afin de garder un niveau de sécurité optimal sur le réseau Algérien.

L'estimation des coûts directs et indirects de la corrosion et de la lutte contre la corrosion varie entre 1.5 et 5% du PNB (Produit National Brut) dans les pays industrialisés. Ceci comprend les pertes en métal, les frais d'entretien et de réparation, le coût des études et de la protection.

Aux Etats Unies ce coût à été évalué entre 1.5 à 2% du PNB; Cette statistique peut paraître déconcertante si l'on ne réalise pas à quelles conditions extrêmes peuvent êtres soumis les métaux et leurs alliages dans notre civilisation industrielle.

Il convient donc de développer notre connaissance de la lutte contre la corrosion au même rythme que celui du développement des industries de pointes.

Aux USA, ½ tonnes d'acier est détruite à chaque heure par la corrosion.

On évalue la quantité de fer détruite annuellement par corrosion à ¼ de la production annuelle de fer.

## **I GENERALITES SUR LA CORROSION**

La corrosion est le résultat de l'action qu'exerce un réactif liquide ou gazeux sur un métal ou un alliage. Sa forme la plus connue est la rouille du fer exposé à l'air humide. Elle présente une grande importance étant donné les conséquences qu'elle a dans des domaines très variés de l'activité humaine. Dans le domaine économique, par exemple, les dommages causés par la corrosion ont une incidence non négligeable sur l'établissement des prix de revient. C'est ainsi que l'on estime à 20 % environ de la production, la quantité d'acier qui est chaque année utilisée pour le remplacement des installations de toutes sortes détruites par la corrosion. Le remplacement du matériel corrodé constitue donc, pour l'industrie en particulier, une charge financière très élevée à laquelle il faut ajouter le manque à gagner correspondant à l'arrêt des installations nécessaires pour effectuer les réparations.

Les recherches sur la corrosion sont anciennes puisque, dès 1830, le physicien Auguste De La Rive en proposait une théorie électrochimique. Cependant, ces recherches n'ont véritablement pris leur essor qu'au XX<sup>e</sup> siècle. Leur but est double: déterminer le processus des phénomènes afin de leur trouver un remède, et définir les matériaux susceptibles d'être utilisés dans des conditions données pendant une durée qui est parfois de plusieurs décennies, comme c'est le cas pour certaines installations nucléaires.

L'étude de la corrosion constitue une branche de la chimie puisqu'elle correspond à des réactions qui font intervenir un métal et un réactif. Mais, pour résoudre les problèmes qu'elle pose, on ne peut pas se contenter d'appliquer les lois

classiques de la chimie. En effet, de nombreux facteurs spécifiques, se rapportant au métal ou au réactif, peuvent avoir une grande influence sur la genèse et le développement des phénomènes de corrosion, si bien qu'il est indispensable pour les étudier de faire également appel aux lois de la métallurgie et de l'électrochimie.

## **I.1 FACTEURS DE CORROSION**

Le comportement à la corrosion d'un matériau en service dépend d'une multitude de facteurs :

### **I.1.1 MILIEU D'ATTAQUE**

- Concentration d'un réactif
- Impuretés
- pH
- Température
- Pression –agitation -vitesse d'écoulement
- Particules solides
- Evolution avec le temps –renouvellement

### **I.1.2 NATURE DU METAL**

- Composition du métal ou de l'alliage
- Procédé d'élaboration
- Impuretés
- Traitement thermique
- Structure physico-chimique
- Ecrouissage

**I.1.3 CONDITIONS D'EMPLOI**

- Etat de surface
- Moyens de protection
- Sollicitations mécaniques
- Courants vagabonds
- Formes de pièces
- Conditions d'entretien
- Emploi d'inhibiteurs
- Soudures, brasure, contact de métaux différents
- Rivetage, agrafage par recouvrement
- Effet biologique

**I.1.4 INFLUENCE DU TEMPS**

- Métaux ne subissant pas de vieillissement
- Conditions mécaniques (alternances éventuelles)
- Températures (variation brusques possibles)
- Modification des enduits de protection.

## I.2 LES DIFFERENTS TYPES DE CORROSION :

Les phénomènes de corrosion peuvent se développer suivant différents processus: corrosions chimique, électrochimique, biologique et corrosion accompagnée d'érosion.

### I.2.1 CORROSION PAR ATTAQUE DIRECTE

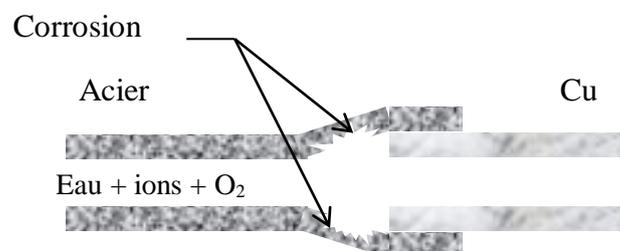
Si l'acier d'une conduite est en contact avec le sol, il se produit une réaction d'oxydation. Suivant l'aération et l'humidité du sol, l'oxygène et/ou l'eau jouent le rôle d'oxydant vis-à-vis de l'acier de conduite.

### I.2.2 CORROSION PAR FORMATION DE PILES

#### I.2.2.1 HETEROGENEITE DE LA STRUCTURE

##### I.2.2.1.a CORROSION GALVANIQUE

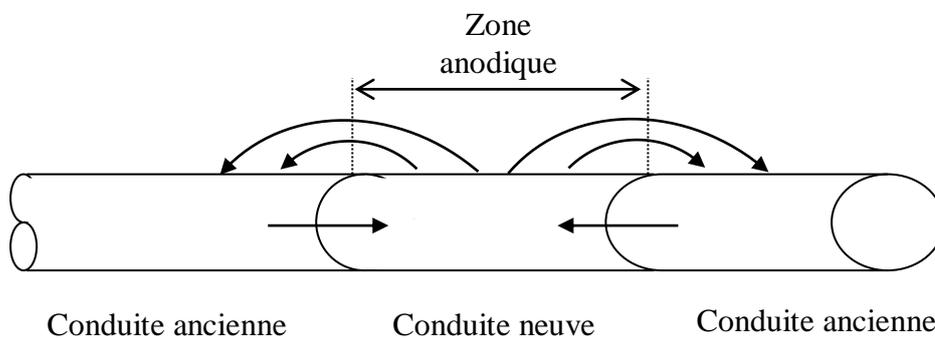
Appelée aussi corrosion bimétallique, elle est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux qui diffèrent par leur potentiel de corrosion. On peut provoquer un tel phénomène en joignant une conduite d'eau en acier galvanisé à une robinetterie en laiton sans prendre la précaution d'isoler électriquement les deux métaux (voir figure 1); la dégradation du métal le moins résistant s'intensifie.



**Fig. 1 : Corrosion galvanique**

### I.2.2.1.b HETEROGENEITE DE LA MATIERE

Une corrosion de même type que précédemment peut se produire dans le cas où le métal lui-même est hétérogène. On peut citer, par exemple (voir figure 2), l'association d'une conduite neuve à un réseau ancien forme également un couple : la conduite neuve jouant le rôle d'anode au profit de l'ancien réseau et les régions écrouies d'un métal seront attaquées préférentiellement aux régions non écrouies.



**Fig 2 : Hétérogénéité de la matière**

### I.2.2.2 HETEROGENEITE DE L'ELECTROLYTE :

#### I.2.2.2.a AERATION DIFFERENTIELLE OU EFFET EVANS :

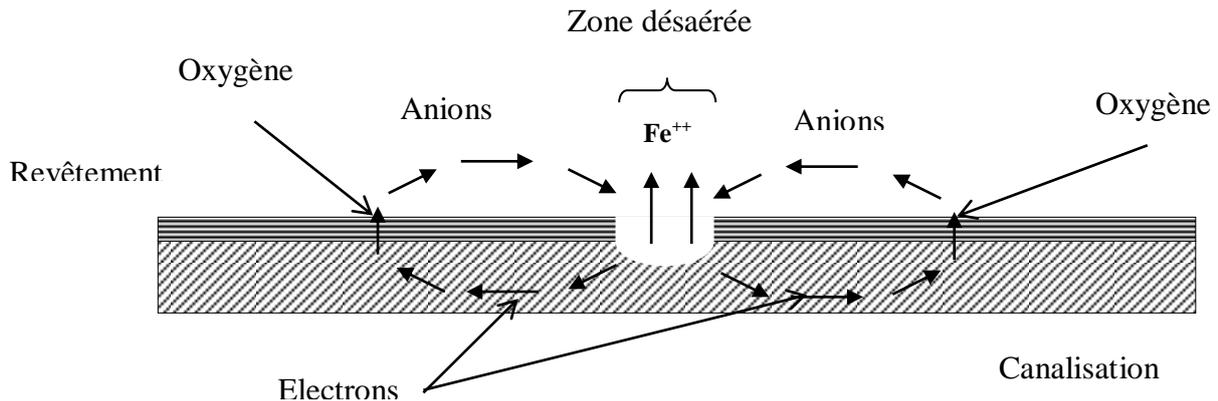
Une surface métallique aérée prend un potentiel moins négatif que celui d'une surface moins aérée.

L'acier aéré deviendra donc positif par rapport à l'acier non aéré.

Cette dernière surface jouera donc le rôle d'anode et se corrodera au profit de la surface plus aérée (voir figure 3).

Ce phénomène de corrosion résulte, en fait, de la formation d'une pile électrique **créée** par un micro-couple.

Une corrosion par aération différentielle est donc assimilable à une corrosion électrique.



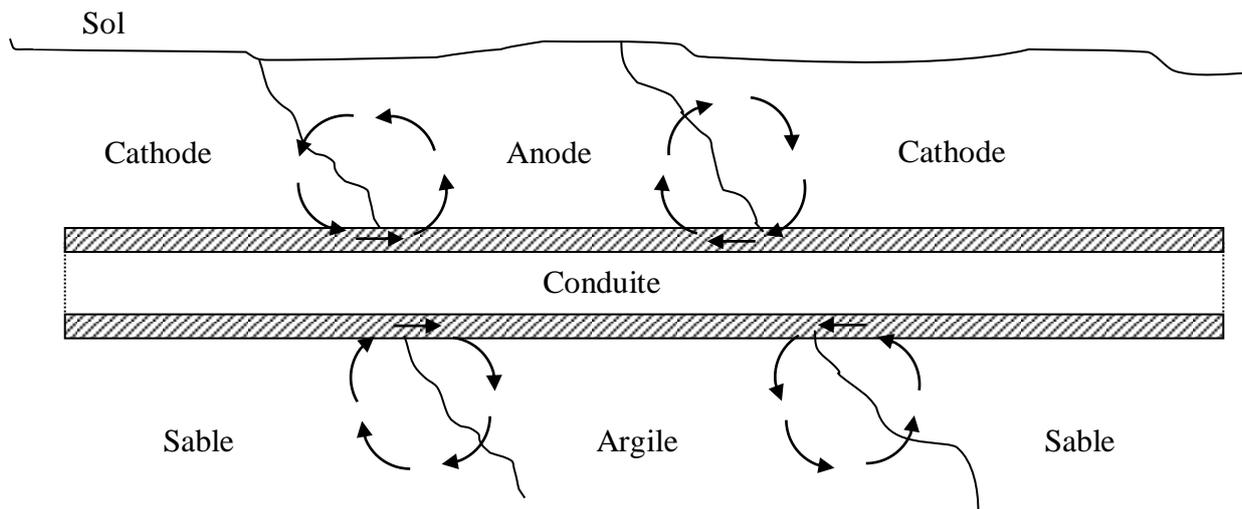
**Fig 3 : Corrosion par aération différentielle**

### I.2.2.2.b PILE GEOLOGIQUE

Une canalisation enterrée traverse des terrains de nature très différentes sable et argile par exemple (voir figure 4). Elle prend dans chacun de ces terrains un potentiel spontané différent et se créent ainsi des zones anodiques et cathodiques sur la canalisation, engendrant des courants dits courants de piles géologiques qui se reforment par le sol et détruisent également l'équilibre de la couche double.

Les courants fournis par les piles géologiques sont relativement faibles, de l'ordre de quelques dizaines de milliampères pour des canalisations de plusieurs kilomètres. Leurs dangers proviennent du fait que ces courants sont constants.

La différence du potentiel entre un terrain formé de sable et un terrain argileux est de l'ordre de 400mv.



**Fig 4 : Corrosion par pile géologique**

### I.2.3 CORROSION BIOLOGIQUE

Elle correspond à l'attaque directe ou indirecte des métaux par des bactéries. Celles-ci peuvent produire des composés, par exemple, le dioxyde de carbone, l'anhydride sulfureux ou des acides organiques qui attaquent le métal. Certaines bactéries comme *desulfovibrio desulfuricans* réduisent les sulfates en soufre, et le sulfure de fer peut se former. L'attaque bactérienne apparaît en particulier dans les canalisations enterrées.

On les rencontre dans les terrains imperméables, souvent à proximité de la mer ou avec des eaux déjà chargées de bactéries.

#### **I.2.4 CORROSION PAR LES COURANTS VAGABONDS**

Un courant vagabond est un courant qui quitte une installation électrique, passe dans le sol environnant (l'électrolyte), et retourne à cette installation à un autre endroit (voir figure 5). Lors de son passage dans le sol, il peut emprunter des conducteurs métalliques, tels que des canalisations et des gains de câble. En sortant de ces conducteurs, il provoque de la corrosion à l'endroit de sa sortie en augmentant le potentiel positif des ouvrages enterrés ; ce qui accélère la vitesse de corrosion.

Les installations électriques pouvant produire ces courants vagabonds sont principalement :

- Les réseaux de traction électriques :
  - Métro
  - Tramway
- Installations électriques
  - Grues industrielles
  - Poste de soudure
  - Galvanoplastie

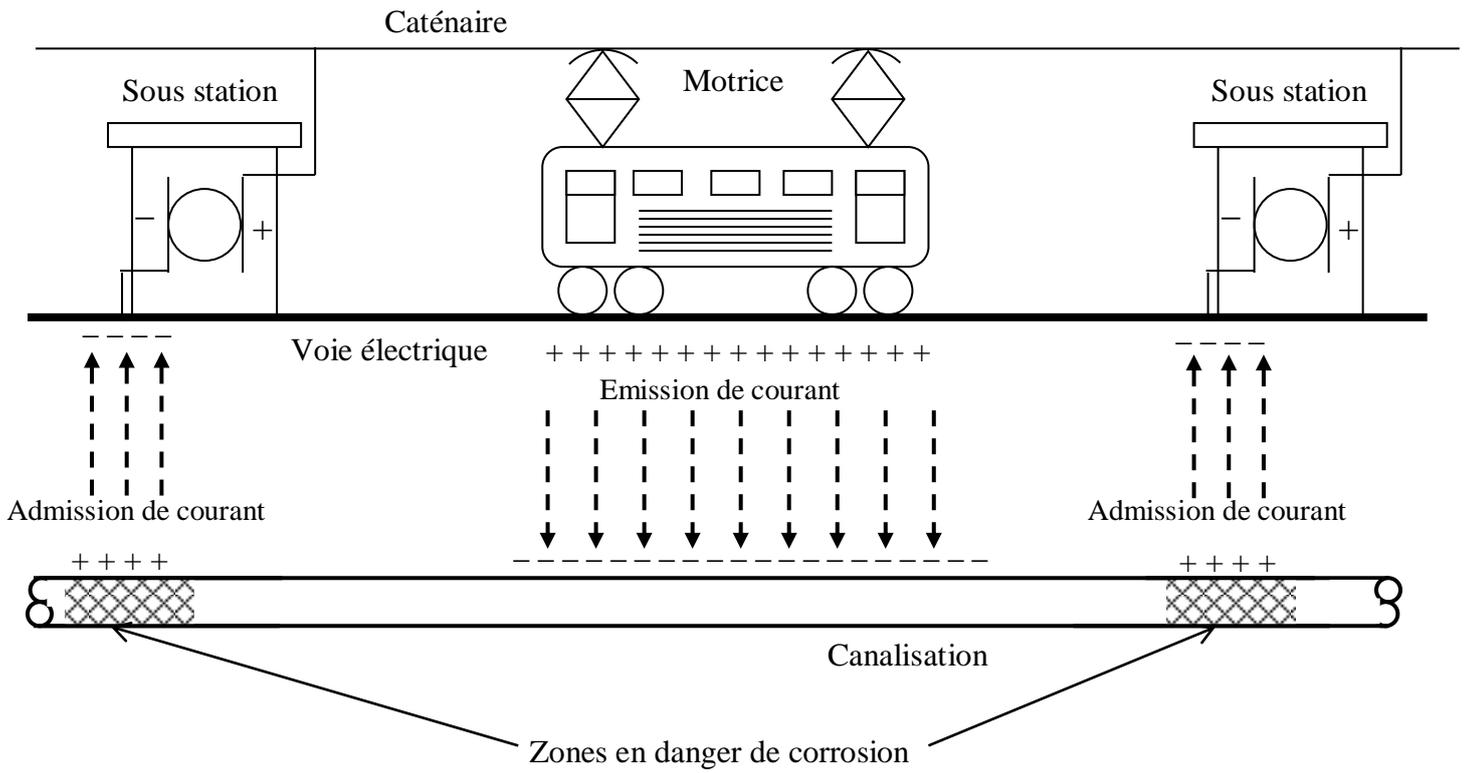


Fig 5 : Corrosion par courants vagabonds

### I.3 PILE ELECTROCHIMIQUE

Si nous polarisons deux électrodes de métal avec un générateur de courant, et dans notre cas une batterie, nous retrouvons une situation d'électrolyse.

L'électrode branchée au pôle positif de la batterie est donc positive et devient par conséquent l'anode, tandis que celle branchée au moins est la cathode. A nouveau, les ions de métal chargés positivement de l'anode se détachent au profit de la cathode qui les reçoit. Il y a corrosion de l'anode (voir figure 6).

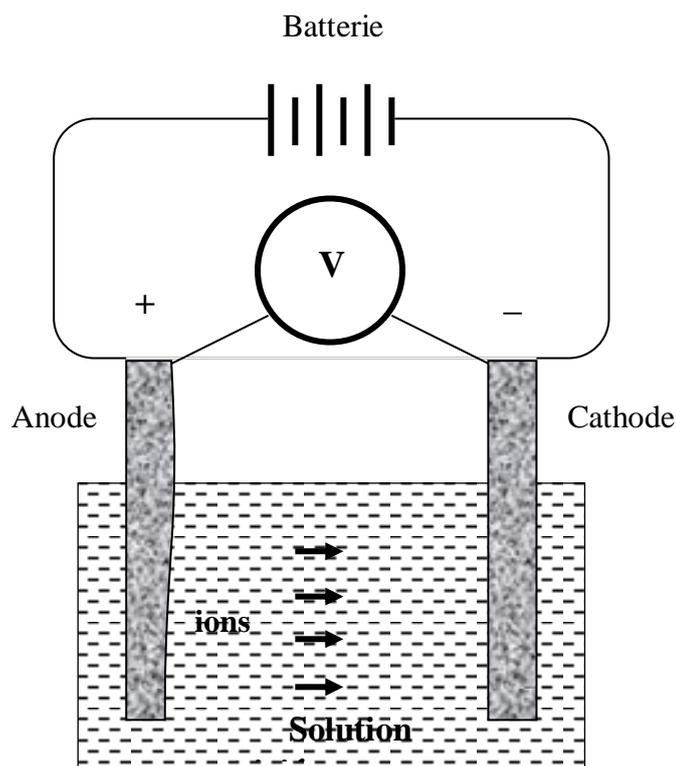


Fig 6 : Cellule d'électrolyte

## I.4 EQUIVALENT POIDS DU COURANT DE CORROSION ELECTROCHIMIQUE

D'après la loi de Faraday la masse perdue par corrosion est proportionnelle au courant :

$$m = \frac{1}{96540} \times \frac{M}{z} \times I \times t$$

où :

m : masse de métal corrodé (g)

M : masse moléculaire (g /mol)

Z : nombre d'électrons dans la réaction de corrosion

F : constante de faraday (96500 cb / eq , 1A =1CS<sup>-1</sup> )

I : courant (A)

Le taux de corrosion d'un métal en termes de perte de poids par unité de surface et par unité (g m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup>) ou taux de pénétration (mm/an) peut être calculé à partir de la loi de faraday si la densité de courant est connue, l'inverse est aussi vrai en supposant la corrosion uniforme et sa vitesse linéaire :

$$\text{Puisque } m = \rho \cdot S \cdot d, \text{ alors } \rho \cdot d = \frac{M \cdot i \cdot t}{Z \cdot F}$$

$$\text{et donc : } \frac{d}{t} = \frac{M \cdot i}{\rho \cdot Z \cdot F} \quad (\text{cm s}^{-1})$$

Où :

i: densité de courant A/cm<sup>2</sup>, i = I.s<sup>-1</sup>

t : temps (s)

ρ : densité du métal (g cm<sup>-3</sup>)

S : la surface du métal corrodé (cm<sup>2</sup>)

d : épaisseur du métal enlevé (cm)

si on changeait les unités :

i : (mA/cm<sup>2</sup>), d(mm) et t en années, alors :

$$\frac{d}{t} \times \frac{10^{-1}}{365 \times 24 \times 60 \times 60} = \frac{M \cdot i}{\rho \cdot z \cdot F} \cdot 10^{-3} \quad (\text{mm an}^{-1})$$

ou :

$$\frac{d}{t} = 3,2706 \cdot \frac{M \cdot i}{Z \rho} \quad (\text{mm an}^{-1})$$

On pourra donc se rappeler (moyen **mnémotechnique**) q'un courant de 1A/m<sup>2</sup> correspond à une vitesse de corrosion de 1 mm/an approximativement (pour l'acier).

## I.5 RESISTIVITE ELECTRIQUE DES SOLS

### DEFINITION

L'analyse de la résistivité électrique d'un sol est une étape préliminaire pour caractériser l'agressivité de ce dernier tels que la nature chimique, le taux d'humidité, l'acidité, la basicité, la granulométrie, l'aération et les bactéries.

Pour mesurer la résistivité du sol, on utilise la méthode de Wenner. Dans cette méthode, on emploie le plus souvent un dispositif quadripolaire constitué de quatre électrodes dont deux émettent un courant électrique et on mesure aux bornes des deux autres électrodes intermédiaires (voir figure 7) la chute de tension dans le sol due aux passages du courant émis.

### CALCUL DE LA RESISTIVITE

Pour calculer la résistivité, on utilise l'équation suivante qui décrit le champ de potentiel en un point M quelconque :

$$\varphi(r) = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right)$$

où ( voir la figure ci-dessous) :

r: distance MA

R: distance MB

$\rho$ : la résistivité de sol

I : le courant émis

En appliquant cette équation aux points C et D respectivement, on obtient un système de deux équations linéaires couplées,

$$\phi(C) = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \left( \frac{1}{b} - \frac{1}{a+b} \right)$$

$$\phi(D) = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \left( \frac{1}{a+b} - \frac{1}{b} \right)$$

La résolution de ce système donne la chute de tension et la résistivité :

$$\phi(C) - \phi(D) = U = \frac{\rho \cdot I}{\pi} \cdot \frac{a}{b \cdot (a+b)}$$

$$\rho = \frac{U}{I} \cdot \pi \cdot \frac{b \cdot (a+b)}{a}$$

Dans le cas où  $a = b$ , on obtient la formule simplifiée suivante donnant la résistivité du sol sondé:

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

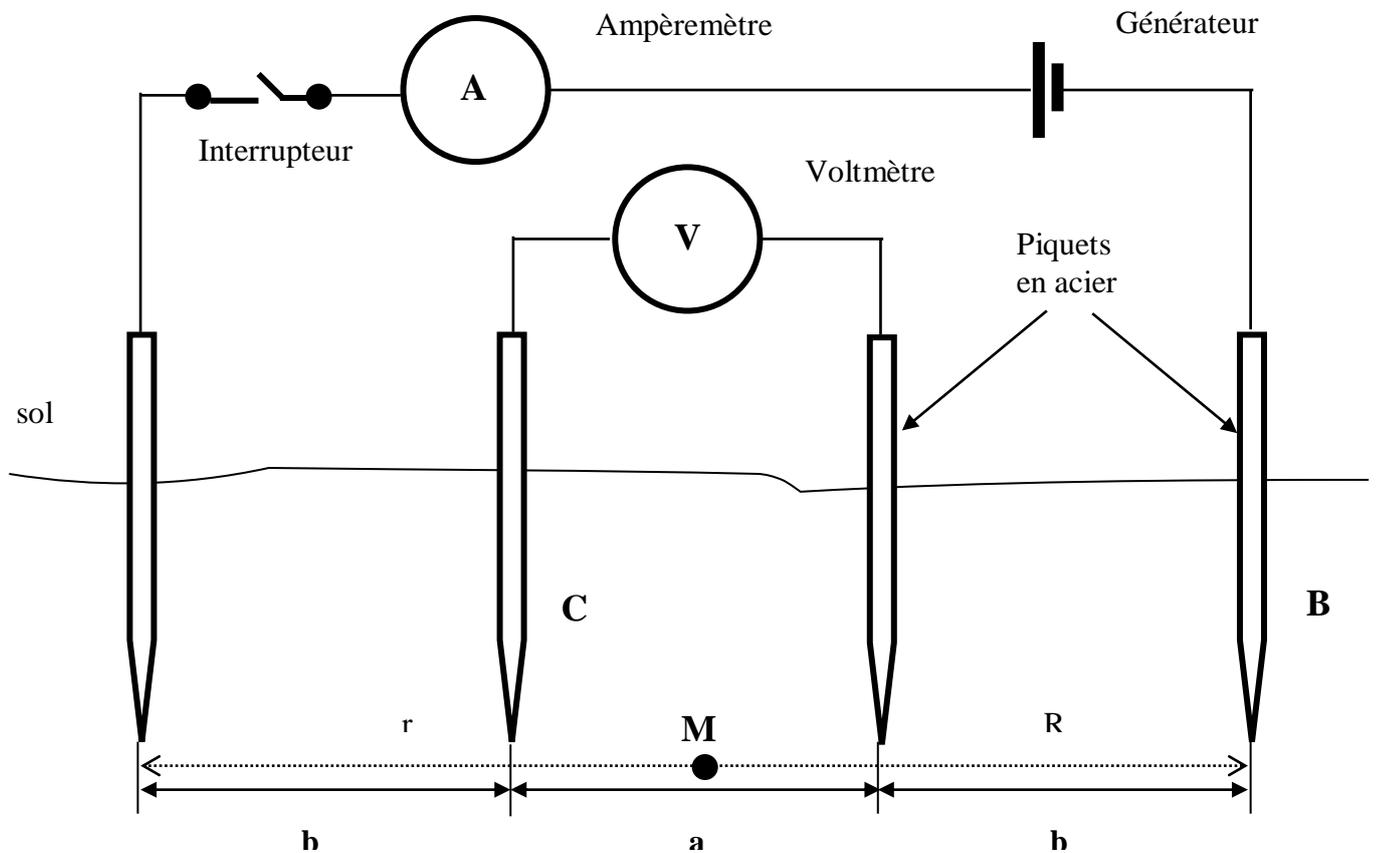


Fig 7 : Mesure de la résistivité de sol

Dans la pratique, on admet généralement les critères suivants pour l'acier :

- sol de résistivité  $\rho > 100 \ \Omega\text{m}$  : peu agressif
- sol de résistivité  $50 < \rho < 100 \ \Omega\text{m}$  : faiblement agressif
- sol de résistivité  $\rho < 50 \ \Omega\text{m}$  : agressif

Tableau N°1. Résistivité de différents terrains

NATURE DU TERRAIN	RESISTIVITE: $\rho$ [ $\Omega\text{m}$ ]
Schistes graphitiques	De l'ordre de 1 à 35
Terrains marécageux	De quelques unités à 30
limon	20 à 100
humus	10 à 150
Tourbe humide	5 à 100
Argiles et marno-calcaires	10 à 200
Argile plastique	50
Marnes et argiles compactes	100 à 200
Marnes du jurassique	30 à 40
Sables et graviers	50 à 3000 et plus
Sable argileux	50 à 500
Sable siliceux	200 à 3000
Sol pierreux nu	1500 à 3000
Sol pierreux recouvert de gazon	300 à 500
Galets ,blocs de silex	1000 à 10000 et plus
Calcaires	100 à 5000et plus
Calcaires tendres	100 à 300
Calcaires compacts	1000 à 5000
Calcaires fissurés	500 à 1000
Schistes	50 à 300 et plus
Micaschistes	De l'ordre de 800
Grés	100 à 10000 et plus
Roches éruptives	300 à 10000 et plus
Granites de vire	300 à 500
Granites de la truyere suivant altération	10000 à 15000
Granites de la Dordogne suivant altération	1500 à 10000
Granites très altérés	100 à 600
Basaltes, andésites	800 à 10000 et plus
Tufs silicifiés	20000 et plus

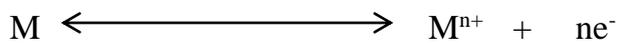
**I.6 POTENTIEL D'UN METAL :**

Le potentiel d'équilibre d'un métal est une grandeur électrochimique bien définie.

Elle exprime l'aptitude que possède ce métal à émettre des ions dans la solution de l'un de ses sels, selon un processus réversible comme :



Pour un métal bivalent. si la valence est n, on a bien sur



Le métal aura un potentiel défini par la valeur donnée par la formule de **Nernst** :

$$E = E_0 + \left( \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \right) \cdot \text{Log } C$$

avec :

$E$  : potentiel d'équilibre en volts

$E_0$  : potentiel normal correspondant au potentiel du métal plongé dans une solution (normale) d'un de ses sels (1 mole par litre) en volts

$R$  : Constante des gaz parfaits = 8.314 J/K

$n$  : Valence de l'ion

$F$  : 96540 coulombs

$C$  : Concentration en ions du métal dans l'électrolyte

Chaque métal possède évidemment un potentiel propre et le tableau suivant en rappelle quelques éléments à 25°C.

Tableau N°2. Potentiels normaux d'électrode par rapport a l'hydrogène

<b>METAUX</b>	<b>POTENTIELS NORMAUX (volts)</b>
<b>LITHIUM</b>	<b>- 3.030</b>
<b>POTASSIUM</b>	<b>- 2.925</b>
<b>SODIUM</b>	<b>- 2.713</b>
<b>MAGNESIUM</b>	<b>- 2.371</b>
<b>ALUMINUM</b>	<b>- 1.660</b>
<b>ZINC</b>	<b>- 0.762</b>
<b>CHROME</b>	<b>- 0.740</b>
<b>FER</b>	<b>- 0.440</b>
<b>CADMIUM</b>	<b>- 0.402</b>
<b>NICKEL</b>	<b>- 0.230</b>
<b>ETAIN</b>	<b>- 0.140</b>
<b>PLOMB</b>	<b>- 0.126</b>
<b>HYDROGENE</b>	<b>0.000</b>
<b>CUIVRE</b>	<b>+ 0.337</b>
<b>MERCURE</b>	<b>+ 0.792</b>
<b>ARGENT</b>	<b>+ 0.799</b>
<b>PLATINE</b>	<b>+ 1.200</b>
<b>OR</b>	<b>+ 1.450</b>

**I.7 DIAGRAMME DE CORROSION :**

Le diagramme d'équilibre électrochimique pH-Tension du Professeur POURBAIX (voir figure 8) représente, pour la plus part des métaux, les différents domaines théoriques que peut prendre un métal plongé dans une solution de l'un de ses sels à 25°C.

Ainsi pour le fer, on trouve :

**a) DOMAINE D'IMMUNITÉ :**

Les réactions d'oxydation dans cette zone sont thermodynamiquement impossibles.

**b) DOMAINE DE PASSIVATION :**

Dans ce domaine la corrosion est empêchée par certaines modifications à la surface de métal telles que la formation d'une couche protectrice d'oxyde ou d'hydroxyde de fer.

**c) DOMAINE DE CORROSION :**

Dans ce domaine les atomes de fer passent en solution sous forme d'ions ferreux ou ferriques ( $\text{Fe}^{3+}$ ), en fonction du pH de la solution et de la tension à l'électrode.

**d) LES DEUX LIGNES (a) et (b) :**

Celles-ci limitent le domaine de stabilité d'eau ; au dessous de la droite (b) il y a dégagement d'hydrogène et au dessus de la droite (a) il y'a dégagement d'oxygène.

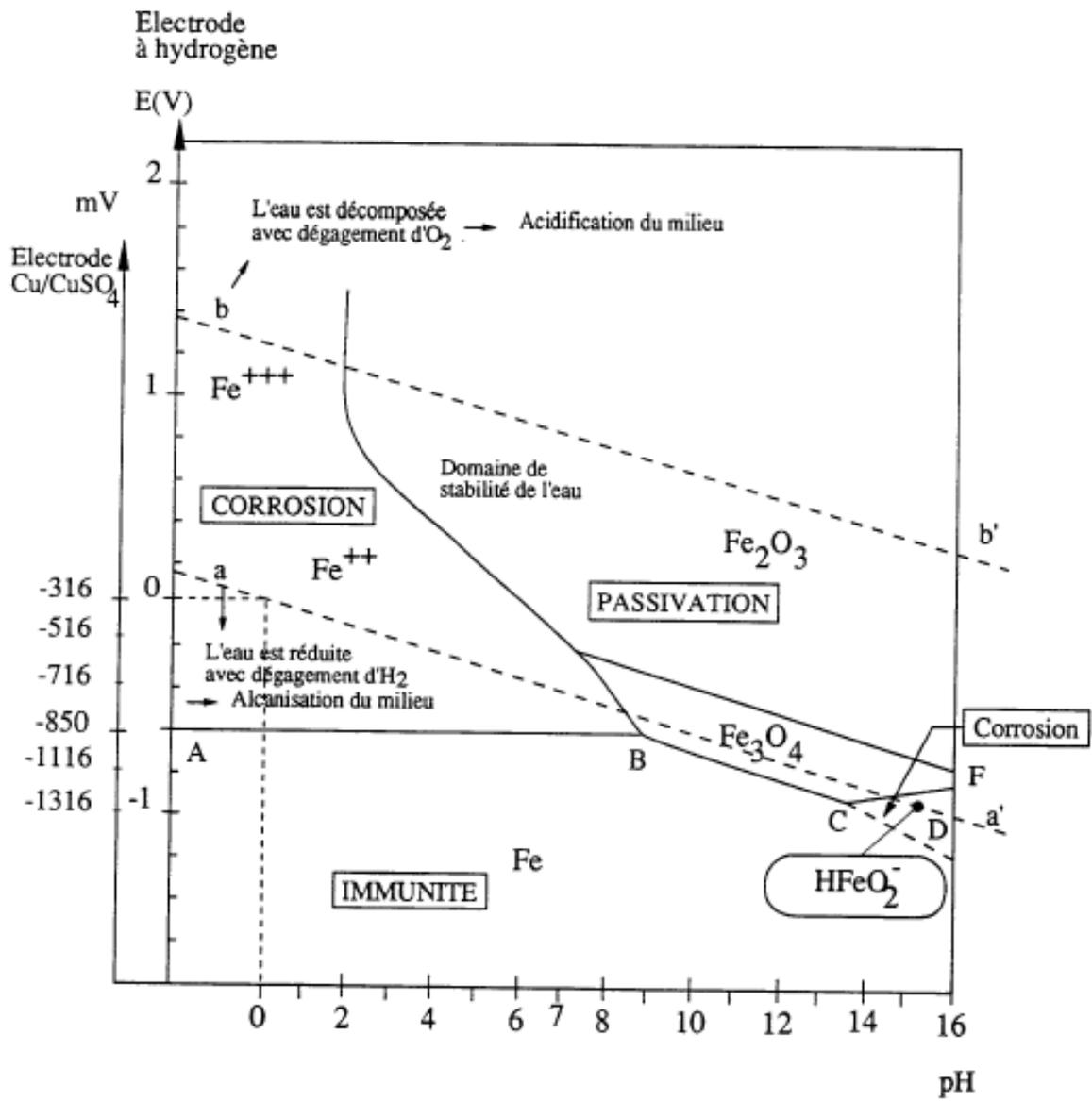


Fig 8 : Diagramme de POURBAIX (potentiel – pH)

**III PRINCIPES DES PROTECTIONS ANTI CORROSION**

En se basant sur le diagramme de POURBAIX ci-dessus montrant les différentes zones de corrosion, de passivation et d'immunité de l'acier, la prévention de la corrosion pourra s'établir de plusieurs façons :

- En passivant les surfaces par maintien d'un milieu suffisamment, oxydant et alcalin.
- Par l'adjonction d'inhibiteurs dans le sol.
- Par l'augmentation du pH au delà de 10.5.
- Par abaissement du potentiel d'électrode (protection cathodique).
- Par isolation chimique ou physique (revêtement).

### III.1 CRITERES D'APPLICATION DE LA PROTECTION CATHODIQUE :

#### III.1.1 CRITERE DU POTENTIEL

Il apparaît dans le diagramme de POURBAIX un domaine d'immunité où le fer reste à l'état métallique.

On admet que toute structure en acier enterrée dont le potentiel aura été rendu plus négatif que  $-850$  mV par rapport à l'électrode Cu / CuSO<sub>4</sub>, sera protégée cathodiquement [1].

Ce critère doit être porté à  $-950$  mV si le sol est particulièrement compact et contient des bactéries sulfato-réductrices.

#### III.1.2 CRITERE DU COURANT

Dans certains cas, si la mesure du potentiel n'est pas réalisable, il peut être utile de contrôler le courant assurant la protection cathodique.

Les résultats d'expériences donnent pour l'acier les densités de courant suivantes :

- $0.7$  mA/m<sup>2</sup> pour l'acier dans le ciment
- $5$  mA/m<sup>2</sup> pour l'acier nu dans un sol anaérobie sans bactérie.
- $35$  mA/m<sup>2</sup> pour l'acier nu dans sol aéré.
- $60$  mA/m<sup>2</sup> pour l'acier nu dans l'eau douce agitée.
- $100$  mA/m<sup>2</sup> pour l'acier nu dans eau de mer calme.
- $100$  à  $500$  mA/m<sup>2</sup> et plus pour l'acier nu dans eau de mer mise en mouvement.
- $400$  mA/m<sup>2</sup> pour l'acier nu en milieu anaérobie bactéries sulfato-réductrices.

L'utilisation de canalisation en acier pour le transport du gaz nécessite des moyens de protection contre les différents phénomènes d'attaque et d'agressivité du sol dans lequel la canalisation est posée.

### III.2 PROTECTION PASSIVE

La protection passive agit en coupant :

Soit le circuit ionique par l'isolement du métal par rapport au sol (rôle du revêtement).

Soit le circuit électronique en isolant les différentiels métaux constitutifs du réseau entre eux, par l'intermédiaire de raccords isolants.

La protection passive doit également pouvoir isoler la canalisation par rapport aux autres structures enterrées (câbles, conduites, etc....)

Ces dispositions ne sont réalisables économiquement qu'à la pose de l'ouvrage. Les équipements de protection passive sont en outre indispensables à l'obtention d'une efficacité satisfaisante de la protection active. Ils en réduisent le coût de façon importante.

#### III.2.1 LES REVETEMENTS DIELECTRIQUES

Le premier principe de protection des canalisations enterrées consiste d'abord à isoler les ouvrages du milieu ambiant par l'interposition d'un fourreau isolant qui est le revêtement protecteur : il permet de contrecarrer l'action des agents atmosphériques, les composants agressifs du sol, limiter la demande en courant de protection cathodique et améliorer la portée des installations.

- Le revêtement en général est constitué de trois composants :
- Le primaire : produit de liaison de la couche anticorrosive (revêtement) avec le métal.
- Le revêtement : ou couche anticorrosive.
- La couche de protection mécanique complémentaire éventuelle.

### **III.2.1.1 LES DIFFERENTS TYPES DE REVETEMENTS**

#### **III.2.1.1.a LES REVETEMENTS TYPES A ET B**

Elles sont constituées de jute imprégné de brai de houille. Leur résistance est comprises entre 1000 à 3000  $\Omega\text{m}^2$  et entre 3000 à 6000  $\Omega\text{m}^2$ . Ces revêtements sont délaissés [2].

#### **III.2.1.1.b REVETEMENT DE C**

Ils sont constitués d'une couche de carbolac qui est une peinture bitumeuse issue de la distillation de houille additionnée d'un solvant approprié, posée sur la conduite nue et propre, et de deux couches de soie de verre imprégnée de carboplast (émail de brai de houille)

La résistance d'isolement de ce type peut atteindre 10000 à 50000  $\Omega\text{m}^2$  suivant l'épaisseur. Ils s'appliquent à chaud.

#### **III.2.1.1.c LES REVETEMENTS PAR BANDES PLASTIQUES MINCES**

Ils s'appliquent à froid.

#### **III.2.1.1.d LES REVETEMENTS PLASTIQUES DE TYPE**

##### **THERMODURCISSABLES :**

- Les époxydes
- le polyuréthane.

#### **III.2.1.1.e LES REVETEMENTS THERMOPLASTIQUES**

- Le polyéthylène.
- Les revêtements plastiques sont caractérisés par une résistance d'isolement très élevée.

### **III.2.2 QUALITES D'UN REVETEMENT**

Le revêtement est généralement constitué par un ensemble de matériaux isolants. Il doit posséder les qualités suivantes :

- Adhérence

- Résistance aux chocs
- Résistance aux poinçonnements
- Flexibilité
- Résistance électrique
- Inertie chimique
- Résistance thermique

### **III.2.3 MODE APPLIQUATION**

L'application des revêtements se fait en usine ou sur chantier sur tube préchauffé ou non, et suivant des méthodes d'application dépendant du type de revêtement ou de son utilisation

### III.3 RACCORDS ISOLANTS

#### DEFINITION

C'est une jonction mécanique permettant d'isoler électriquement deux tronçons de conduite tout en assurant le passage normal des fluides transportés. Ils sont utilisés pour :

- l'isolement électrique des différentes parties du réseau pour éviter la création de couple galvanique.
- éliminer les mises à la terre du réseau dues à des branchement ou un raccordement.

Le sectionnement électrique du réseau pour faciliter :

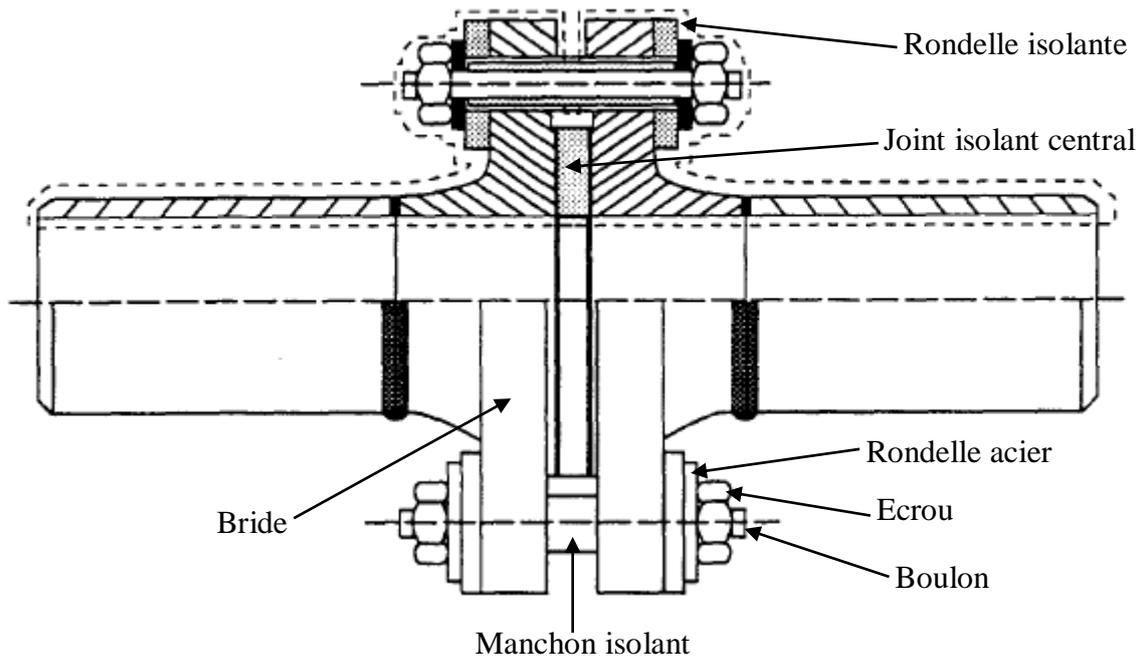
- la recherche des défauts.
- la mesure de la résistance d'isolement.
- l'isolement provisoire du réseau.

#### III.3.1 JOINTS ISOLANTS A BRIDES

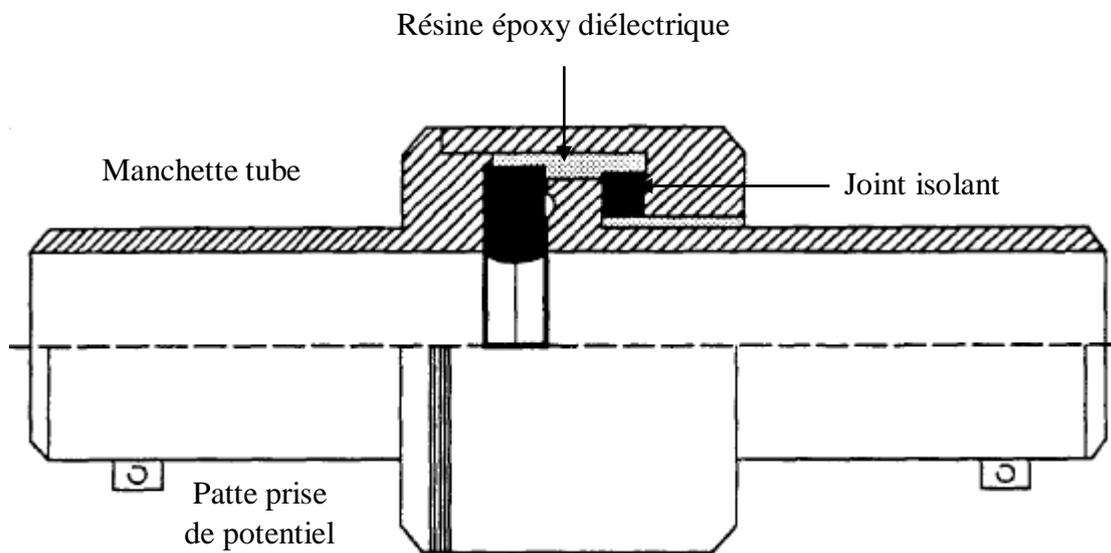
Ils sont constitués par un jeu de brides entre lesquelles sont interposées des joints d'étanchéité et des joints diélectriques (voir figure 8). Les tiges filetées étant placées dans les gaines isolantes (toile bakéalisée), de même les écrous sont isolés de la bride par des rondelles du même matériau (bakélite).

#### III.3.2 JOINTS ISOLANTS MONOBLOC

Ce type de raccord est constitué d'un monobloc isolant en acier sans boulonnerie (voir figure 9), non démontable et revêtu extérieurement de résine époxyde.



**Fig 8 : raccord isolant type a brides**



**Fig 9 : raccord isolant type mono bloc**

### III.4 PROTECTION ACTIVE:

La protection active a pour but de placer la canalisation acier en contact avec un électrolyte, sous une tension telle que le potentiel du métal, par rapport au milieu ambiant, prend une valeur suffisante pour que la corrosion devienne impossible.

Dans le cas d'une canalisation enterrée ou immergée pour laquelle la résistance à la corrosion est l'un des facteurs déterminants en ce qui concerne la durée de vie, la protection cathodique consiste à porter cette canalisation à un potentiel électrique tel qu'elle se comporte comme une cathode vis à vis milieu extérieur (terrain, masse d'eau...).

Une étude préalable effectuée sur terrain :

- Permettra de déterminer l'agressivité des terrains et des eaux traversées, les piles géologiques.
- Fera ressortir la proximité des installations susceptibles d'émettre des courants vagabonds.

Le moyen d'empêcher cette corrosion est de modifier artificiellement la pile de corrosion. Si l'on impose au système une tension mixte inférieure au potentiel de l'acier, la corrosion n'a pas lieu ou est réduite de façon significative.

C'est le principe de la protection cathodique. Deux solutions sont possibles :

- Soit l'on rajoute au système un métal moins noble que l'acier (voir figure 4). C'est celui-ci qui va se corroder à la place de l'acier. Il faut que la tension de l'anode sacrificielle soit faible afin de « tirer » le potentiel du système suffisamment bas pour placer l'acier à l'état de cathode.

- Soit l'on impose une tension entre l'acier et un autre métal (voir figure 3) qui va jouer le rôle d'anode. Dans ce cas la tension imposée doit être suffisante pour placer l'acier dans son domaine de protection.

- **Drainage de courant** : s'applique lorsque la corrosion risque de se produire en raison du voisinage d'installations susceptibles d'émettre des courant vagabonds (voir figure 5).

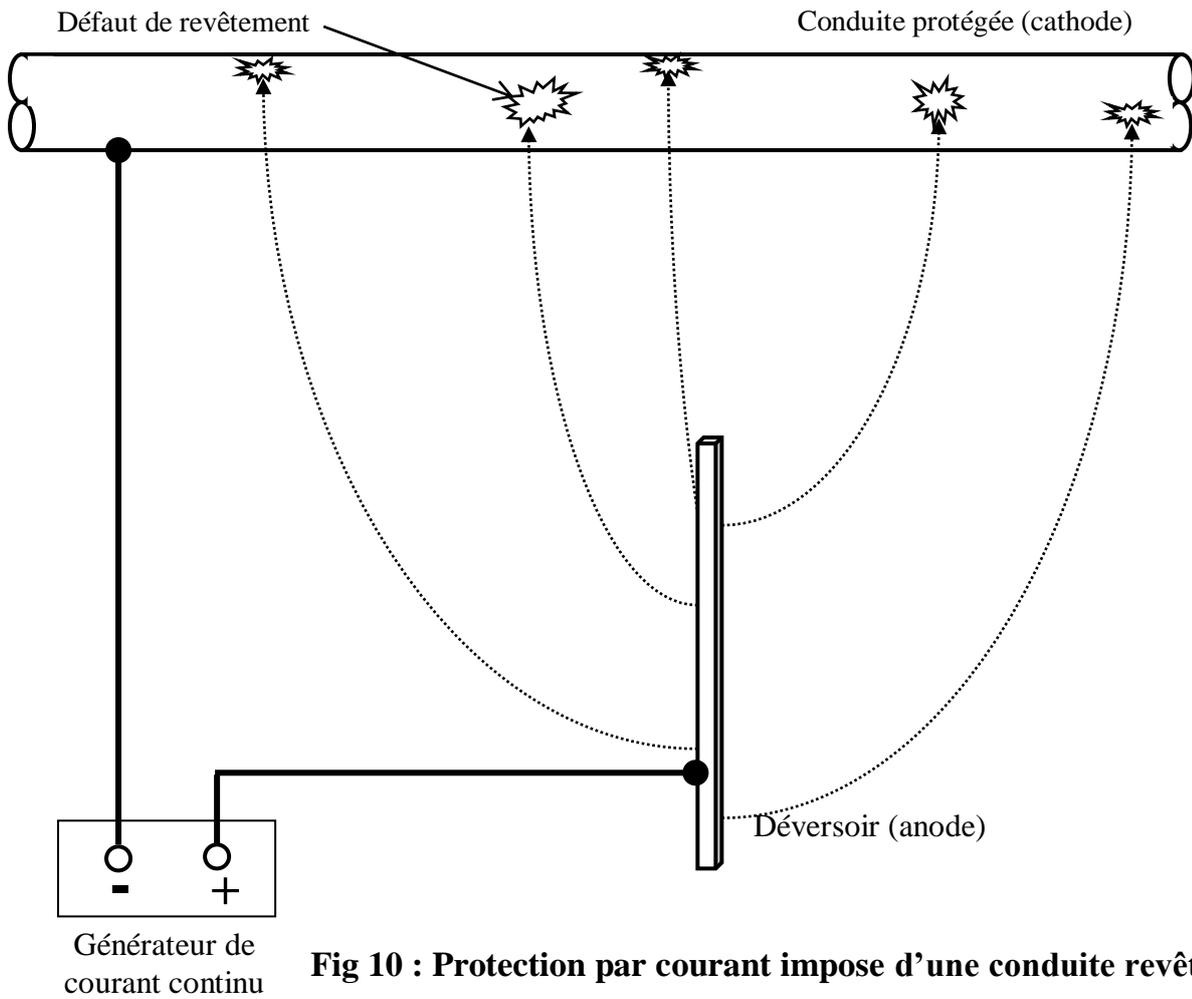


Fig 10 : Protection par courant impose d'une conduite revêtue

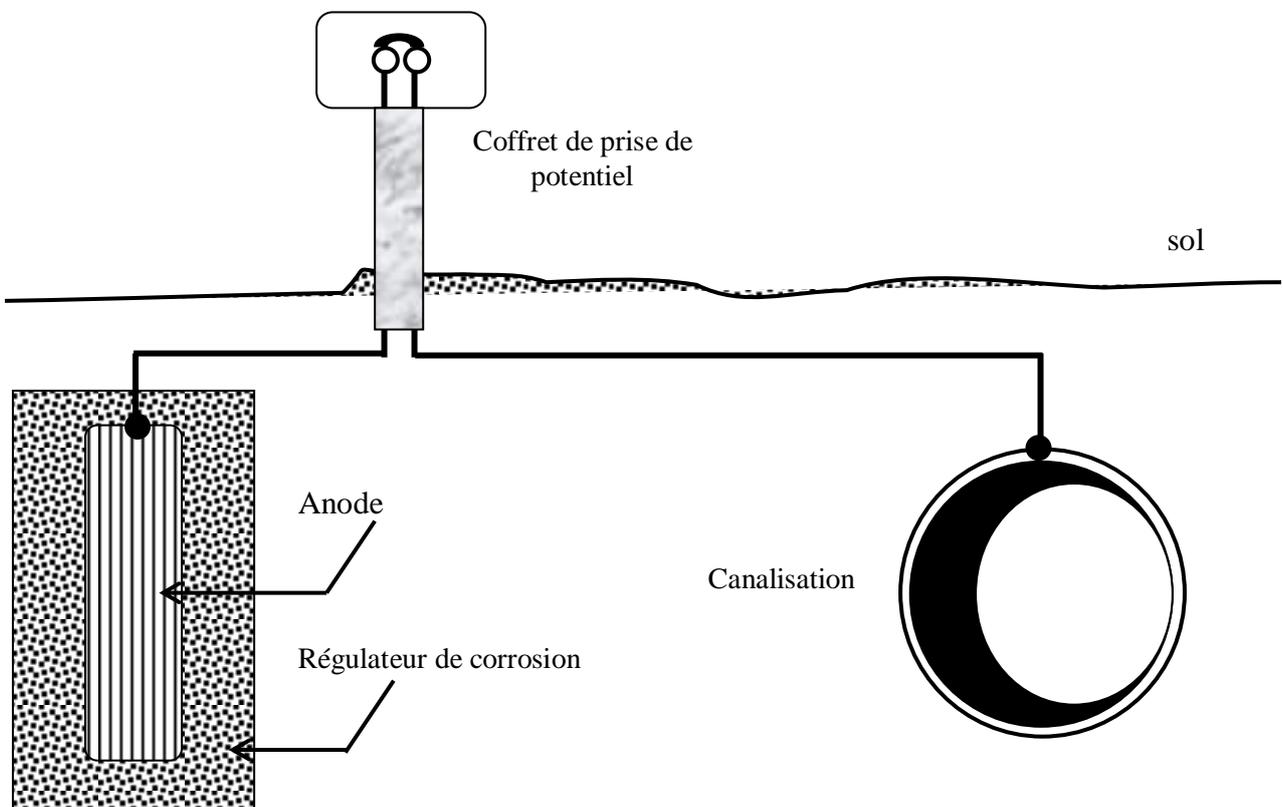


Fig 11. protection par anode sacrificielle d'une conduite revêtue

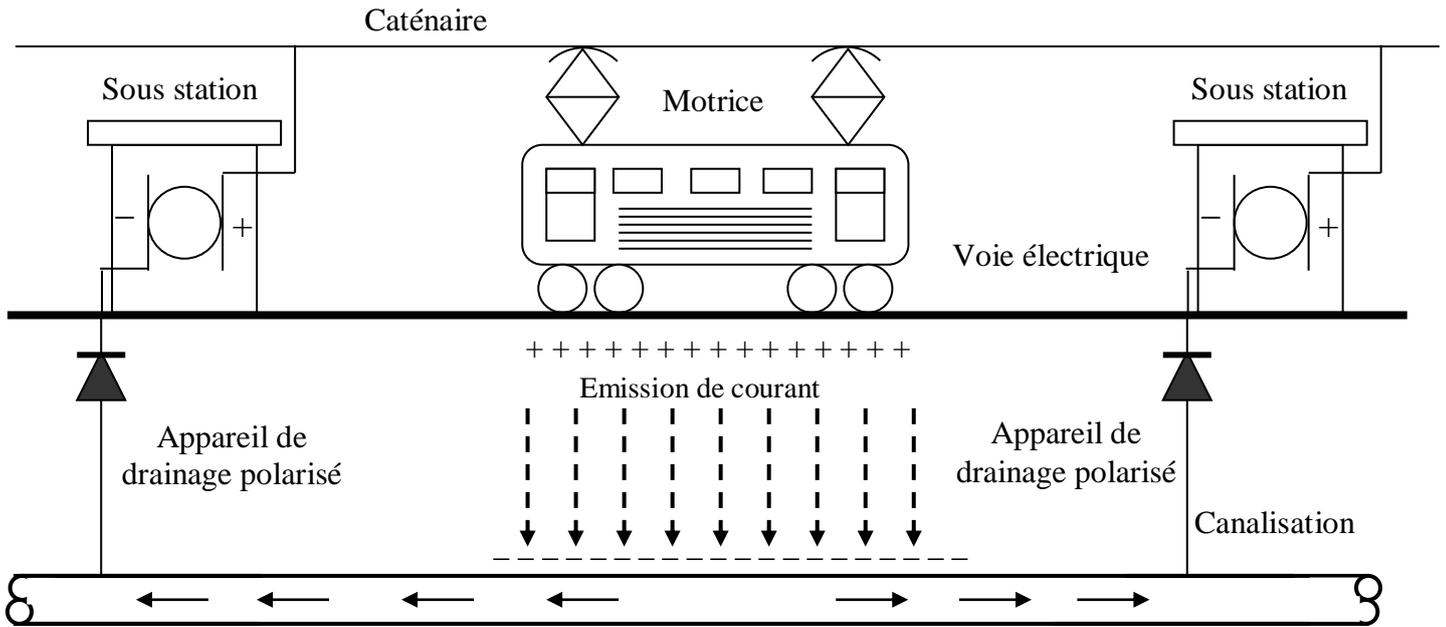


Fig 12. Protection contre la corrosion en présence de courant vagabonds

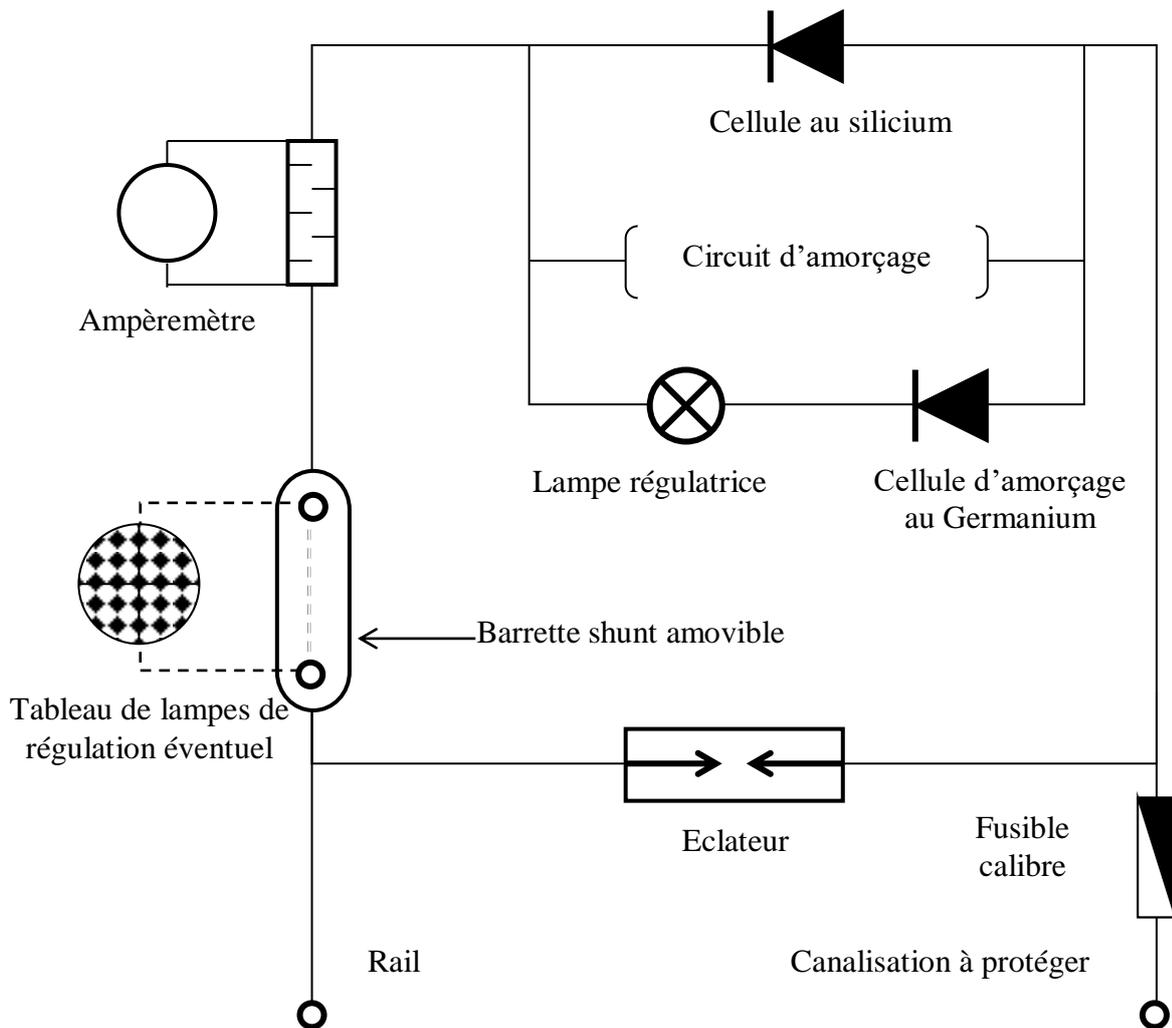


Fig 13. Schéma de principe d'un drainage

### III.4.1 PROTECTION CATHODIQUE

#### III.4.1.1 LA PROTECTION PAR ANODE SACRIFICIELLE

La protection par anode sacrificielle se fait lorsque des courants relativement petits sont nécessaires. En effet les potentiels des anodes sacrificielles se situent entre  $-1100$  et  $-1700$  mV /cuivre sulfate de cuivre, ce qui n'autorise qu'une faible différence de potentiel avec l'acier (et donc un faible courant de protection) [3].

Les anodes sacrificielles employées pour protéger les canalisations métalliques enterrées sont soit en zinc soit en magnésium. Elles sont emballées dans un sac ou un carton contenant du backfill (gypse, bentonite et sulfate de soude) afin d'empêcher la passivation du métal et de diminuer la résistivité de l'électrolyte en contact avec l'anode.

Néanmoins, le choix entre le zinc et le magnésium dépend de nombreux autres facteurs :

- la qualité du revêtement (en fonction de la résistivité on choisira l'un ou l'autre)
- la durée de vie souhaitée (10 ans pour le magnésium, 15 pour le zinc)
- le coût (magnésium plus cher que le zinc)
- le taux de régulation (le zinc régule mieux)
- problème d'encombrement (densité du zinc supérieure)

### III.4.1.2 LA PROTECTION PAR SOUTIRAGE DE COURANT

#### PRINCIPE :

Ce mot vient du système de protection qui consiste à soutirer de la structure à protéger, une quantité de courant nécessaire pour porter la masse métallique à un potentiel suffisamment négatif.

Ce soutirage se fait par l'intermédiaire d'une source électrique de courant continu dont on relie le pôle négatif à la canalisation et le pôle positif à une anode enterrée ou déversoir.

Le courant partant de l'anode traverse le sol est capté par la canalisation au travers du revêtement et retourne à la source de courant.

Il se crée entre le sol et la canalisation une chute de tension (l'abaissement du potentiel) qui rend la conduite négative par rapport au sol dans lequel elle est enterrée. La corrosion est reportée sur l'anode ou (déversoir). Lorsque le potentiel de la conduite est suffisamment négatif, la protection est assurée.

La protection cathodique par courant imposé permet d'atteindre les mêmes résultats en employant une source externe de courant.

L'avantage d'un système de protection cathodique par courant imposé c'est qu'il permet de suivre la demande de courant et d'apporter le courant suffisant et nécessaire à la structure pour la protéger.

Dans pratiquement toutes les conditions (revêtement, résistivité etc...) on peut dimensionner une installation par courant imposé qui satisfera au besoin.

### III.4.2 DRAINAGE DE COURANT

Les voies SNCF électrifiées en courant continu, les tramways, ou les métros peuvent engendrer dans le sol des circulations de courants vagabonds.

Il y a corrosion des ouvrages métalliques dans les zones où les courants vagabonds sortent des ouvrages pour retourner aux sous-stations émettrices.

Pour supprimer les corrosions, une liaison électrique polarisée est réalisée entre la canalisation et l'ouvrage perturbateur (voir figure N°12).

**III.5 CONSTITUTION D'UN POSTE SOUSTIRAGE :**

Un poste soutirage se compose des éléments principaux suivants :

- **un générateur de courant continu:**

Cette unité transforme le 220 Volts alternatif en courant continu de faible tension (<50 V) et l'envoie vers les anodes.

- **une anode déversoir**

Émettent du courant vers la structure à protéger. Elles sont calculées pour une durée de vie de 20 à 50 ans. Il existe des anodes composées de toutes sortes de matériaux, graphite, fer silice, fer, niobium/platine, polymère conducteur, etc...

- **les protections**

- **les câbles de liaison**

Générateur/canalisation et générateur/anode

### **III.5.1 LA GENERATION DE COURANT CONTINU :**

Elle se fait soit :

- Par un transfo-redresseur alimenté à partir du réseau MT/BT
- Par un thermogénérateur alimenté à partir du gaz
- Par un système photovoltaïque

### **III.5.2 L'ANODE DEVERSOIR**

Son rôle étant de se corroder à la place de la structure à protéger, elle doit avoir une résistance par rapport à la terre la plus faible possible ( $0.1 \Omega$ ) et posséder une masse telle qu'elle puisse assurer une protection optimale [4].

### **III.5.3 REGULATEUR DE CORROSION BACK-FILL**

Les régulateurs de corrosions sont utilisés pour :

- Abaisser le niveau de la résistance de l'anode dans le sol
- Augmenter sa durée de vie
- Diminuer la polarisation de l'anode et la maintenir homogène

L'homogénéisation de la corrosion est surtout réalisée par le plâtre ou le gypse.

La résistivité de régulateur est réduite en utilisant la mirabilité.

### III.6.COMPARAISON ENTRE LES DEUX SYSTEMES DE PROTECTION CATHODIQUE

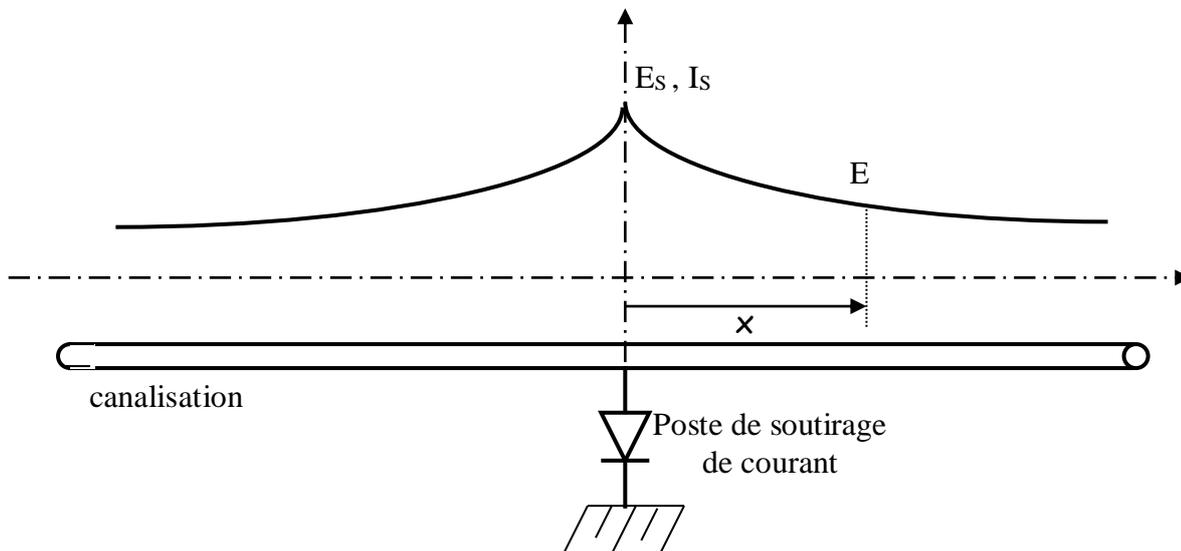
Tableau N°3

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

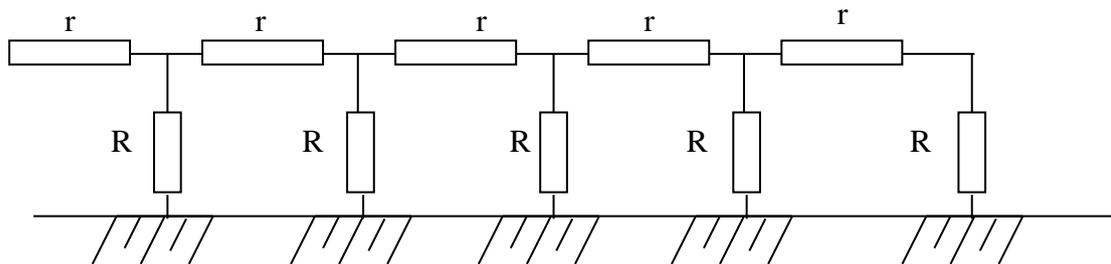
### IV.1 CALCUL DU COURANT PROTECTEUR

Pour le calcul du courant protecteur, nous supposons le schéma suivant

(Voir Figure N°14). :



**Fig 14. Diagramme de potentiel le long d'une conduite**



**Fig 15. Circuit électrique équivalent de la conduite**

Où :

$I_s$  : l'intensité du courant de soutirage,

$I$  : l'intensité du courant dans la conduite à une distance  $x$  du point de soutirage,

$E_s$  : le gain de potentiel de la canalisation par rapport au sol au droit du soutirage,

$E$  : le gain de potentiel de la canalisation par rapport au sol par suite du soutirage au point  $x$ ,

$r$  : la résistance longitudinale de la conduite en Ohms par mètre linéaire,

$R$  : la résistance d'isolement du revêtement (résistance transversale) en Ohms au mètre linéaire.

Dans un élément de canalisation  $dx$  situé à une distance  $x$  de l'origine :

- l'entrée de courant est :

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

- la chute de potentiel dans ce tronçon  $dx$  parcouru par le courant  $I$  est :

$$dE = rI dx \quad (2)$$

En dérivant l'équation (2) par rapport à  $x$ ,

$$\frac{d^2E}{dx^2} = r \frac{dI}{dx} \quad (3)$$

et nous remplaçons l'expression (2) dans l'équation (3), nous obtenons une équation différentielle de deuxième degré décrivant le gain de potentiel de la canalisation par rapport au sol en fonction de la position  $x$ ,

$$\frac{d^2E}{dx^2} + \frac{r}{R} E = 0. \quad (4)$$

La solution générale de l'équation (4) est donnée par :

$$E = A \exp\left(\sqrt{\frac{r}{R}} x\right) + B \exp\left(-\sqrt{\frac{r}{R}} x\right) \quad (5)$$

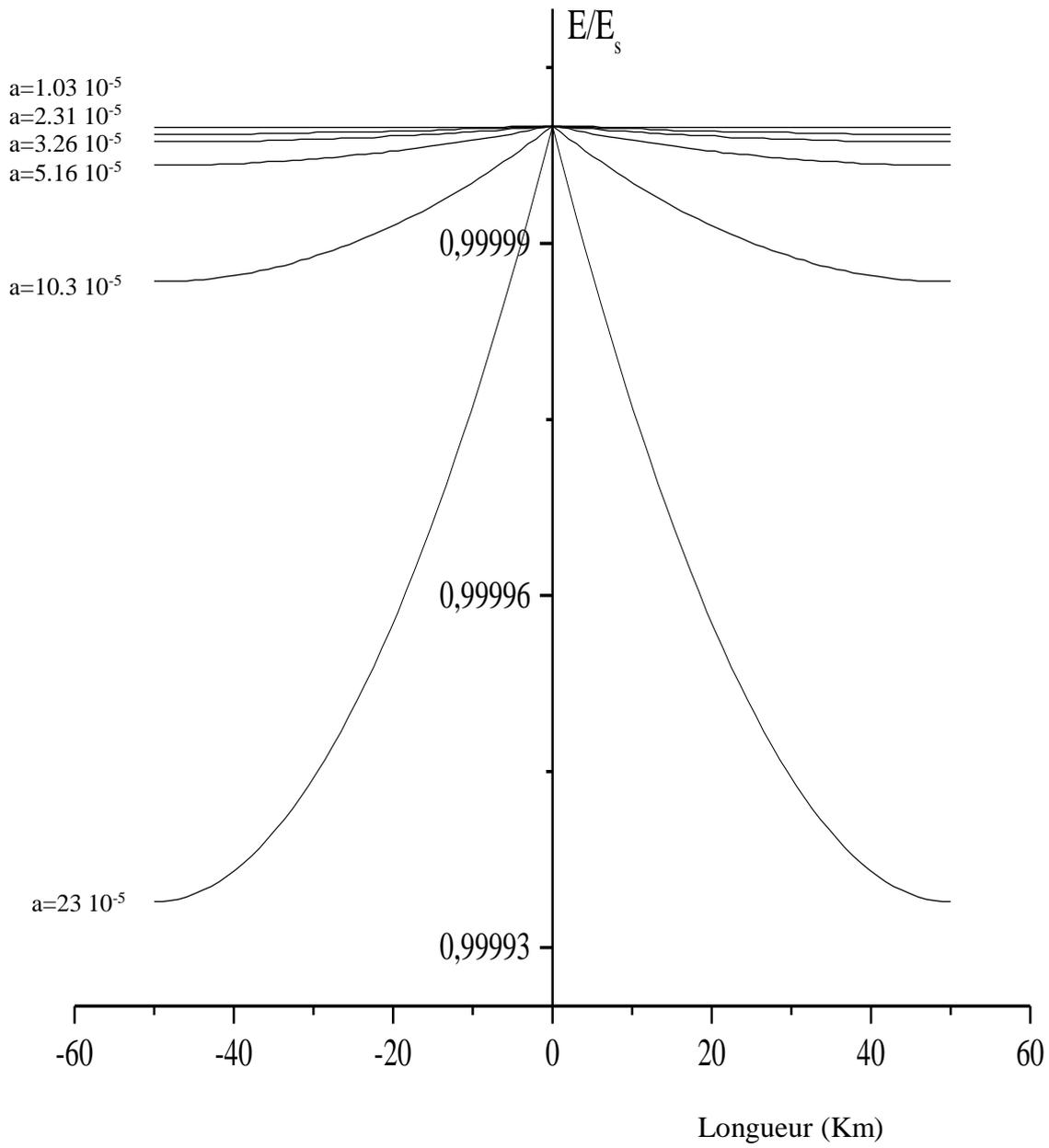
La dérivée de la solution (5) que nous remplaçons dans l'équation (2), donne l'expression de  $I$  en fonction de la position  $x$ .

$$I = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{r}{R}} \left( A \exp\left(\sqrt{\frac{r}{R}} x\right) - B \exp\left(-\sqrt{\frac{r}{R}} x\right) \right) \quad (6)$$

Nous pouvons calculer les constantes d'intégration  $A$  et  $B$  en utilisant les conditions aux limites  $x=0$  et  $x=L$  où  $L$  est la limite de l'ouvrage à protéger.

Finalement, nous obtenons l'expression de  $E$  suivante :

$$E = E_s \frac{\operatorname{ch}\left(\sqrt{\frac{r}{R}}(L-x)\right)}{\operatorname{ch}\left(\sqrt{\frac{r}{R}}L\right)}.$$



**Fig 16. Variation du potentiel le long d'une canalisation en fonction du facteur d'atténuation (a)**

## IV.2. ROLE ET IMPORTANCE DU REVETEMENT

Comme le montre la figure (16) le revêtement est un complément indispensable à la protection cathodique des canalisations métalliques enterrées.

Il permet :

- De réduire la surface du métal en contact avec le sol,
- De réduire les besoins en courants nécessaires à la polarisation de la conduite,
- D'assurer la distribution convenable des densités de courant.

## IV.3 IMPORTANCE DE LA VALEUR D'ISOLEMENT DU REVETEMENT

Les courants et les potentiels de la protection cathodique se repartissent le long de la canalisation suivant des formules exponentielles dans le cas des structures semi-infinie on a :

$$E_x = E_0 e^{-ax}$$

et

$$I_x = I_0 e^{-ax}$$

Ils s'atténuent donc au fur et à mesure que l'on s'éloigne du point d'application,

suisant un coefficient d'atténuation :  $a = \sqrt{\frac{r}{R}}$

Avec :

$r$  : Résistance longitudinale de la canalisation.

$R$  : Résistance transversale d'isolement.

$x$  : Distance au point d'origine.

Lorsqu' on a affaire à des conduites en acier ou les joints sont soudés, ( $r$ ) est pratiquement fixée par les caractéristiques géométriques des tubes et le coefficient d'atténuation ( $a$ ) ne dépend plus que de ( $R$ ).

D'ou l'intérêt d'avoir une valeur de la résistance transversale d'isolement la plus élevée possible.

D'une façon générale la valeur d'isolement électrique du revêtement appliqué sur les canalisations n'atteint ni les valeurs calculées théoriquement, ni les valeurs mesurées en laboratoire avec électrolyte.

Actuellement, les revêtements hydrocarbonés sont largement supplantés par le polyéthylène extrudé qui représente de meilleures performances suivant tous les critères : résistance électrique, résistance mécanique, courbe de vieillissement, rapport qualité/prix ; hygiène et sécurité, etc....

Il y a cependant lieu de faire les observations suivantes :

- Au delà du choix des produits, la qualité d'un revêtement dépend de qualité de sa mise en œuvre : préparation des tubes, contrôle d'application des produits et notamment contrôle d'adhérence et de continuité, soin à la mise en fouille.

- Avec les revêtements hydrocarbonés on peut obtenir  $10^4$  à  $5.10^4 \Omega m^2$
- Avec le polyéthylène extrudé, on peut obtenir  $10^5$  à  $5.10^5 \Omega m^2$

- La courbe des intensités de courant de protection cathodique nécessaires pour un ouvrage donné, en fonction de la résistance d'isolement du revêtement, montre que :

- En deçà d'une valeur d'isolement de  $10.000 \Omega m^2$ , les consommations de courant, et donc les coûts de protection cathodique, montent en flèche,

- A la limite, on voit que même s'il pouvait paraître possible, en théorie, de protéger une conduite nue dans le sol, moyennant des quantités de courant importantes, en pratique, cela s'avère techniquement difficile et économiquement inabordable.

- Au delà de  $100.000 \Omega m^2$  (niveau de résistance d'isolement des revêtements type polyéthylène extrudé) les consommations de courant sont très fortement réduites, et les économies d'énergie réalisables à travers la recherche de super-performances du revêtement seraient minimales (bien considérer le coût de la plus-value et les autres qualités offertes).

- En cas de mauvaise adhérence du revêtement sur une grande étendue de surface, une bonne valeur d'isolement du revêtement peut s'avérer tout à fait préjudiciable à la protection cathodique.

## V.1 ETUDE DE REDRESSEUR

### V.1.1 SCHEMA DE PRINCIPE

Le montage redresseur PD2 mixte de deux thyristors et deux diodes connectés comme il suit:

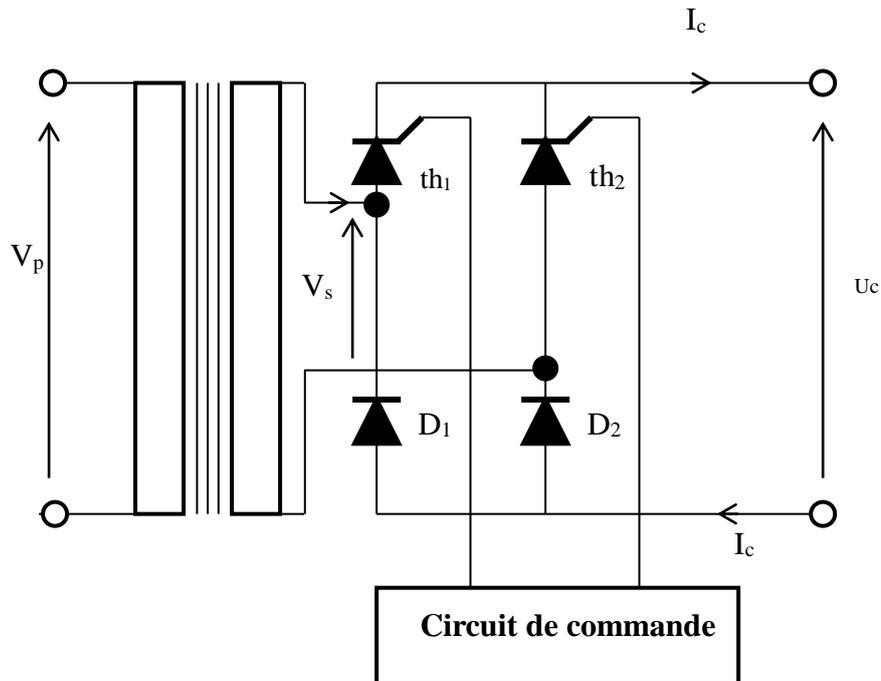


FIGURE N°

Le transformateur d'alimentation n'est pas nécessaire en principe au fonctionnement, mais il sera en général présent pour modifier la tension à l'entrée du montage.

### V.1.2 ETUDE DU FONCTIONNEMENT

Prenons comme expression de la tension au secondaire du transformateur

$V_s$ :

$$V_s(t) = V_m \sin \omega t$$

Les thyristors sont débloqués avec un retard en angle de  $\alpha$ , c'est à dire que des impulsions de déblocage sont envoyées sur les gachettes des thyristors respectivement aux angles

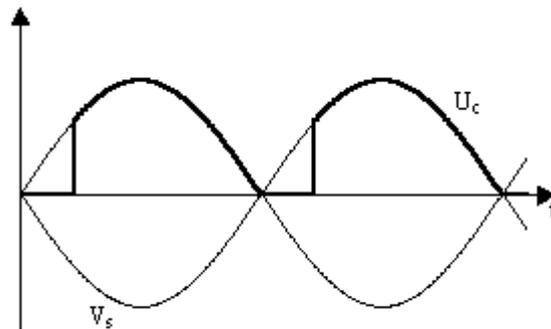
pour  $th_1$   $\omega t = \alpha + 2k\pi$

pour  $th_2$   $\omega t = (\alpha + \pi) + 2k\pi$

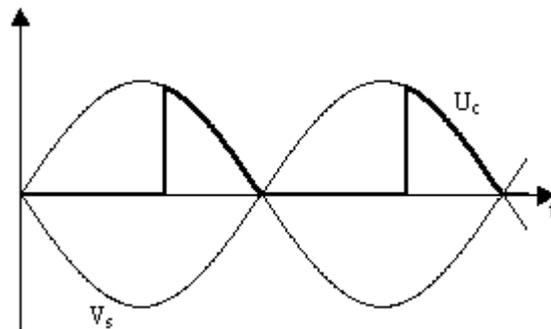
Les différentes phases de fonctionnement du montage sont alors décrites par le tableau suivant:

Intervalles	Eléments passants	Tensions aux bornes des Eléments bloqués	Tension redressée
$\alpha \leq \omega t < \pi$	$th_1, D_2$	$V_{th2} = -V_s + V_{th1}$ $\approx -V_s$ $V_{D1} = -V_s + V_{D2}$ $\approx -V_s$	$U_c = V_s - V_{th1} - V_{th2}$ $\approx V_s$
$\pi \leq \omega t < \pi + \alpha$	$th_1, D_1$	$V_{th2} = -V_s + V_{th1}$ $\approx -V_s$ $V_{D2} = V_s + V_{D1}$ $\approx V_s$	$U_c = -V_{th1} - V_{D1}$ $\approx 0$
$\pi + \alpha \leq \omega t < 2\pi$	$th_2, D_1$	$V_{th1} = V_s + V_{th2}$ $\approx V_s$ $V_{D2} = V_s + V_{D1}$ $\approx V_s$	$U_c = -V_s - V_{th2} - V_{D1}$ $\approx -V_s$
$2\pi \leq \omega t < 2\pi + \alpha$	$th_2, D_2$	$V_{th1} = V_s + V_{th2}$ $\approx V_s$ $V_{D1} = -V_s + V_{D2}$ $\approx -V_s$	$U_c = -V_{th2} - V_{D2}$ $\approx 0$

La forme d'onde de la tension redressée est donc:



Pour  $\alpha \leq \pi/2$



Pour  $\alpha > \pi/2$

### V.1.3 ETUDE DES TENSIONS

#### V.1.3.1 VALEUR MOYENNE DE LA TENSION REDRESSEE

La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par:

$$U_{cmoy} = \frac{1}{T} \int_T U_c(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin \omega t d\omega t = \frac{V_m}{\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\pi} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

La valeur moyenne de la tension redressée varie de 0 à  $2V_m/\pi$  lorsque  $\alpha$  varie de  $\pi$  à 0. On a un réglage possible de la valeur moyenne de la tension de sortie, mais, contrairement au cas du PD2 à thyristors, le fonctionnement en onduleur non-autonome n'est pas possible. Au delà de  $\alpha = \pi$ , l'ordre de déclenchement

parvient sur la gachette des thyristors alors que ceux ci sont polarisés négativement de telle sorte qu'ils restent bloqués.

### V.1.3.2 LE FACTEUR D'ONDULATION

Le facteur d'ondulation est défini par:

$$K_0 = \frac{U_{c \max} - U_{c \min}}{2U_{c \text{ moy}}}$$

Deux cas sont à considérer:

-  $\alpha \leq \pi/2$ , dans ce cas il est facile de constater sur le graphe de la tension redressée que:

$$U_{c \max} = V_m \text{ et } U_{c \min} = 0$$

$$K_0 = \frac{\pi}{2(1 + \cos \alpha)}$$

-  $\pi > \alpha > \pi/2$ , le déclenchement des thyristors a lieu après le passage par son maximum de la tension redressée, d'où

$$U_{c \max} = V_m \sin \alpha \text{ et } U_{c \min} = 0$$

$$K_0 = \frac{\pi}{2} \frac{\sin \alpha}{(1 + \cos \alpha)}$$

Remarque: De façon plus rigoureuse, la valeur maximale  $U_{c \max}$  de tension redressée peut être calculée en déterminant la valeur de  $\omega t$  qui annule la dérivée.

Dans l'intervalle  $\alpha \leq \omega t < \pi + \alpha$ , la tension redressée a pour expression

$$U_c \approx V_s = V_m \sin \omega t$$

La dérivée  $(dU_c / d\omega t) = V_m \cos \omega t = 0$  pour  $\omega t = \pi/2 + k\pi$  avec  $k$  entier. Dans le cas  $\alpha \leq \pi/2$ , seule la valeur  $\omega t = \pi/2$  appartient à l'intervalle considéré, la valeur maximale de tension étant alors de

$$U_{cmax} = U_c (\omega t = \pi/2) \approx V_1 (\omega t = \pi/2) = V_m$$

Pour  $\pi > \alpha > \pi/2$ , la valeur  $\omega t = \pi/2$  n'appartient pas à l'intervalle, on doit donc prendre celle correspondant à  $\omega t = \alpha$ , pour laquelle, comme le montre la courbe la tension redressée,  $U_c(t)$  est maximale.

La valeur minimale  $U_{cmin}$  est toujours, en ce qui concerne de montage, toujours nulle comme en témoigne les courbes de la tension redressée  $U_c(t)$ .

#### - Tensions maximales aux bornes des diodes et des thyristors bloqués

Si on considère l'intervalle  $[\alpha, \pi + \alpha[$ , la tension aux bornes de  $th_2$  est:

$$V_{th2} = -V_s + V_{th1} \approx -V_s$$

Les tensions maximales aux bornes des thyristors sont obtenues en déterminant les valeurs de  $\omega t$  qui annulent la dérivée de la tension à leurs bornes. Pour  $V_{th2}$ .

$$(dV_{th2} / d\omega t) = -V_m \cos \omega t = 0 \text{ pour } \omega t = \pi/2 + k\pi \text{ avec } k \text{ entier}$$

L'angle  $\alpha$  pouvant varié de 0 à  $\pi$ , les 2 premières racines, à savoir  $\pi/2$  et  $3\pi/2$ , peuvent être atteintes durant l'intervalle de blocage de  $th_2$ . Elles correspondent respectivement à des tensions aux bornes du thyristor de  $-V_m$  et  $V_m$ .

$$\alpha \leq \pi/2 \quad V_{thmax} = V_{th2} (\omega t = \pi/2) = -V_m$$

$$\alpha > \pi/2 \quad V_{thmax} = V_{th2} (\omega t = 3\pi/2) = +V_m$$

$$V_{thmax} = \pm V_m$$

La première valeur doit être respectée pour éviter le claquage du thyristor, la seconde pour éviter sa mise en conduction intempestive par dépassement de la tension de retournement.

Pour ce qui est des diodes, on peut par exemple considérer l'intervalle  $[0, \pi[$  durant lequel la diode  $D_2$  est bloquée, avec à ses bornes la tension

$$V_{D2} = -V_s + V_{D1} \approx -V_s$$

La tension maximale à supporter par les diodes en inverse est obtenue en déterminant les valeurs de  $\omega t$  qui annulent la dérivée de la tension à leurs bornes, soit.

$$(dV_{D2}/d\omega t) = -V_m \cos \omega t = 0 \text{ pour } \omega t = \pi/2 + k\pi \text{ avec } k \text{ entier}$$

Seule la première racine  $\pi/2$  appartient à l'intervalle dans lequel  $D_2$  est bloquée.

Elle correspond à une tension maximale de

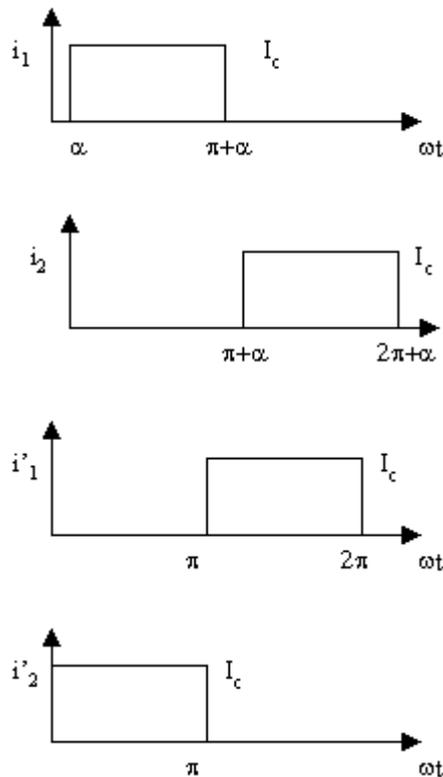
$$V_{Dmax} = V_{D2} (\omega t = \pi/2) = -V_m$$

On obtiendrait bien sûr, par un calcul similaire, les mêmes valeurs maximales de tension aux bornes des autres diodes et thyristors.

## V.1.4 ETUDE DES COURANTS

### V.1.4.1 COURANTS DANS LES DIODES ET LES THYRISTORS

Le courant de sortie étant considéré comme constant, les diodes et thyristors parfaits, on déduit de l'étude du fonctionnement les formes d'ondes des courants dans ceux ci:



$i_1, i_2, i'_1, i'_2$  sont respectivement les courants dans les thyristors  $th_1, th_2$ , et les diodes  $D_1, D_2$ .

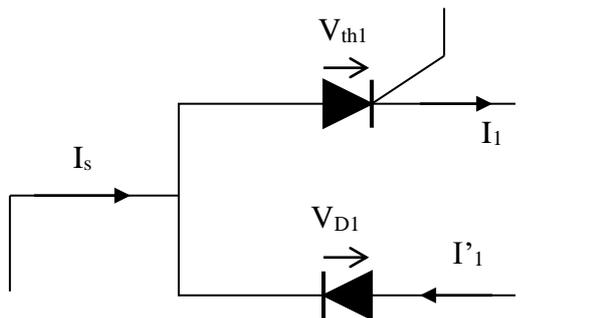
On en tire  $i_{\max}, i_{\text{moy}}$  et  $i_{\text{eff}}$ , les valeurs maximale, moyenne et efficace de ces courants:

$$i_{\max} = I_c$$

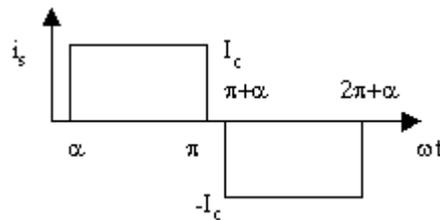
$$i_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int i_i(t) dt = \frac{I_c}{2}$$

$$i_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T i^2(t) dt} = \frac{I_c}{\sqrt{2}}$$

### V.1.4.2 COURANT ET FACTEUR DE PUISSANCE AU SECONDAIRE DU TRANSFORMATEUR



On en déduit la forme d'onde du courant dans le secondaire:



ainsi que les valeurs moyenne et efficace du courant au secondaire:

$$i_{smoy} = 0$$

$$i_{seff} = \frac{1}{T} \int_T i_s^2(t) dt = I_c \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi}}$$

Le facteur de puissance est par définition le rapport de la puissance active sur la puissance apparente. Les diodes et les thyristors étant supposés parfaits, ils ne

dissipent pas de puissance. Par conséquent la puissance fournie par le secondaire du transformateur est aussi la puissance reçue par la charge, soit

$$P = \frac{1}{T} \int U_c(t) I_c dt = \frac{I_c}{T} \int U_c(t) dt = U_{\text{cmoy}} I_c$$

La puissance apparente au secondaire est quant à elle

$$S_s = V_{\text{seff}} i_{\text{seff}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} I_c \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi}}$$

d'où

$$F_s = \frac{\sqrt{2} (1 + \cos \alpha)}{\pi \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi}}}$$

## **V.2 CIRCUIT DE COMMANDE**

### **INTRODUCTION**

L'objectif de notre travail est de réaliser un circuit de commande électronique qui permet l'obtention d'une tension de sortie réglable. Pour cela, nous avons fait notre réalisation en suivant le bloc diagramme de l'instrumentation électronique illustré dans la figure ci-dessous.

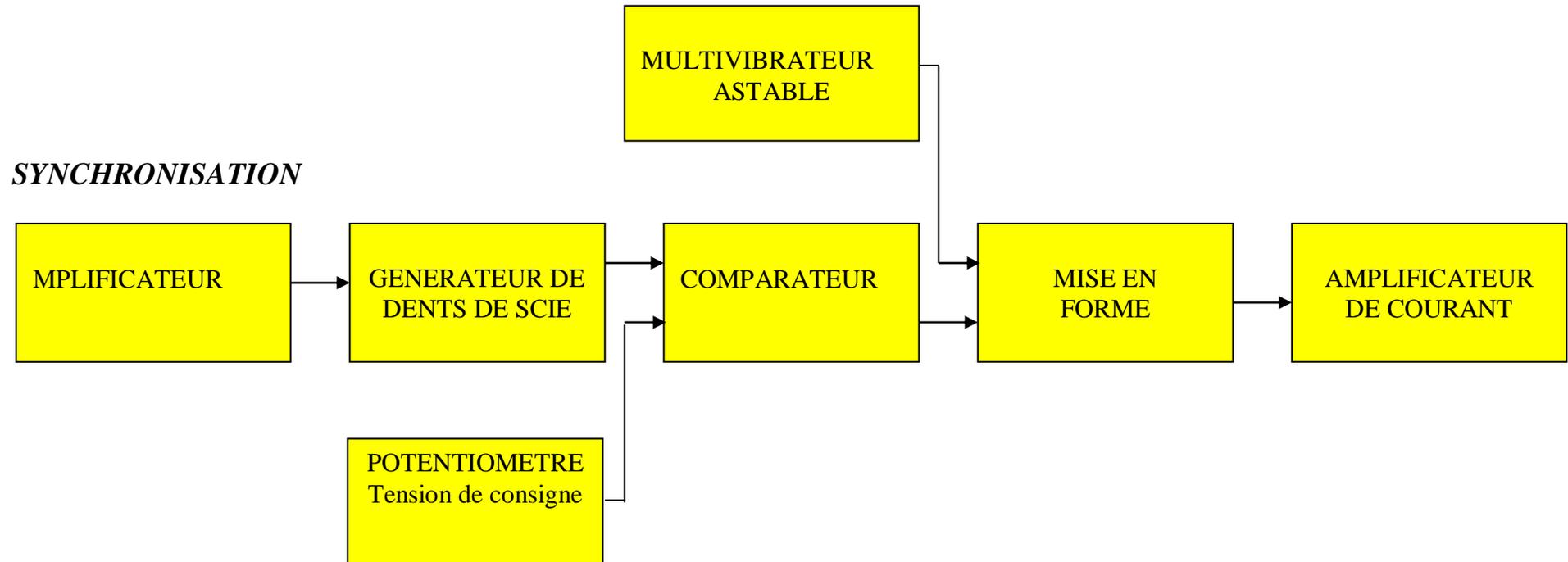


Fig.1 :Schémas synoptique de la commande

### V.2.1 GENERATEUR DE DENTS DE SCIE

Elle est réalisée par deux transistors  $T_1$  et  $T_2$  ( type 2N1711) et un amplificateur opérationnel ( $\mu A741$ )

Le signal de sortie du pont redresseur attaque le transistor  $T_1$  a la base, celui-ci sera saturé pour une tension supérieur à 0.7V.

Le collecteur de  $T_1$  attaque la base du deuxième transistor  $T_2$  de même type , les deux transistors travaillent en commutation , quand  $T_1$  est bloqué ,  $T_2$  sera saturé et vice - versa .Le signal obtenu à la sortie de  $T_2$  , sera donc rectangulaire.

A l'aide d'un amplificateur opérationnel, le signal continu d'entrée est intégré, on obtient un signal sous forme de dent de scie.

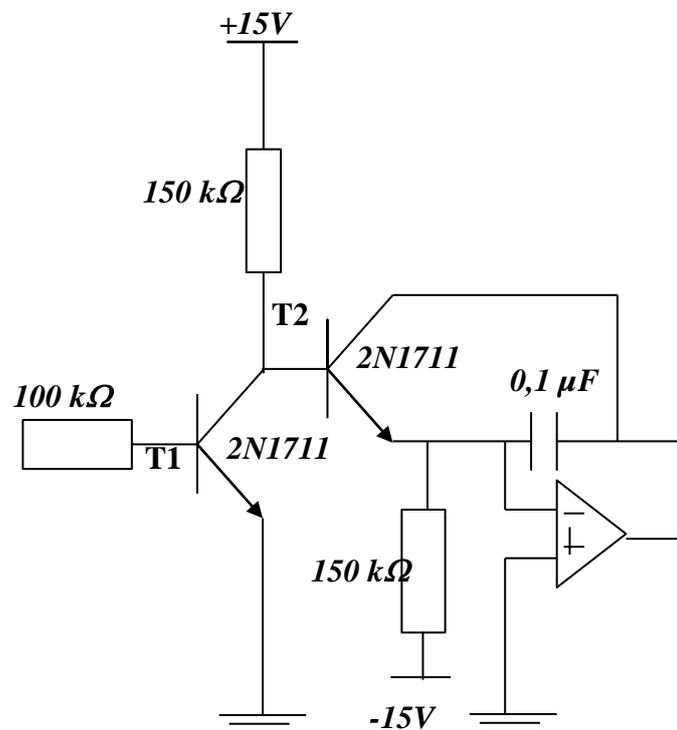
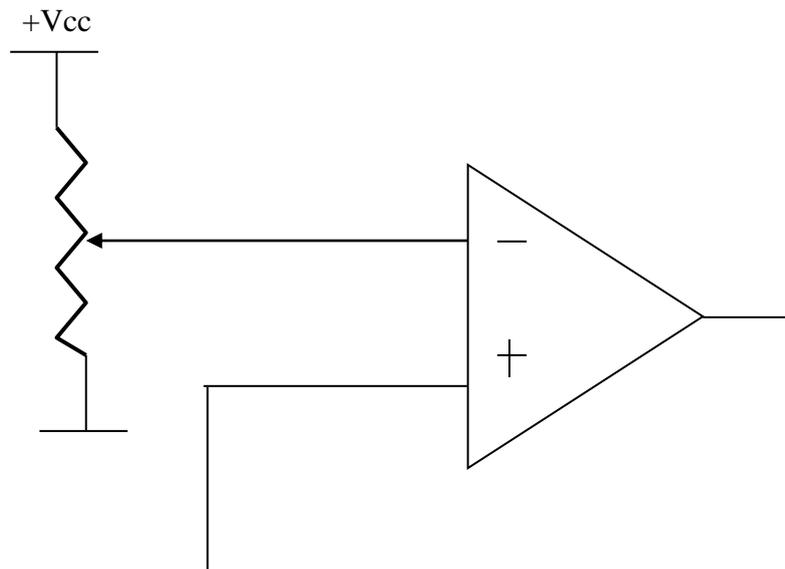


Fig.2: schéma de générateur de dent de scie

### V.2.2 LE COMPAREUR

Le dispositif est constitué d'un  $\mu A$  741 ,son entrée positive étant reliée à la sortie du générateur de dent de scie , dont l'amplitude est variable , et qui utilise une tension de référence fixe ;et son entrée négative est reliée à un potentiomètre .

Dés que la tension de comparaison dépasse la tension de référence , la sortie atteint la saturation dans le sens positive ,tandis - que si la tension de comparaison est inférieur à la tension de référence , la sortie atteint la saturation négative.



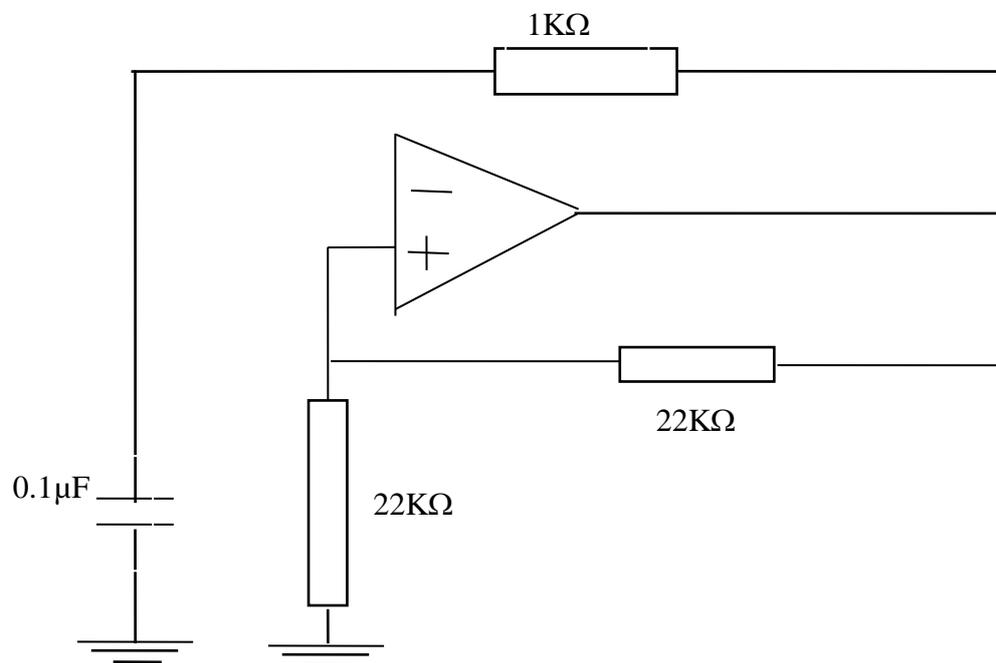
**Fig.3: Schéma du Comparateur**

#### **Remarque :**

La largeur des créneaux à la sortie du comparateur dépend de la valeur de la tension de comparaison.

### V.2.3 MULTIVIBRATEUR ASTABLE

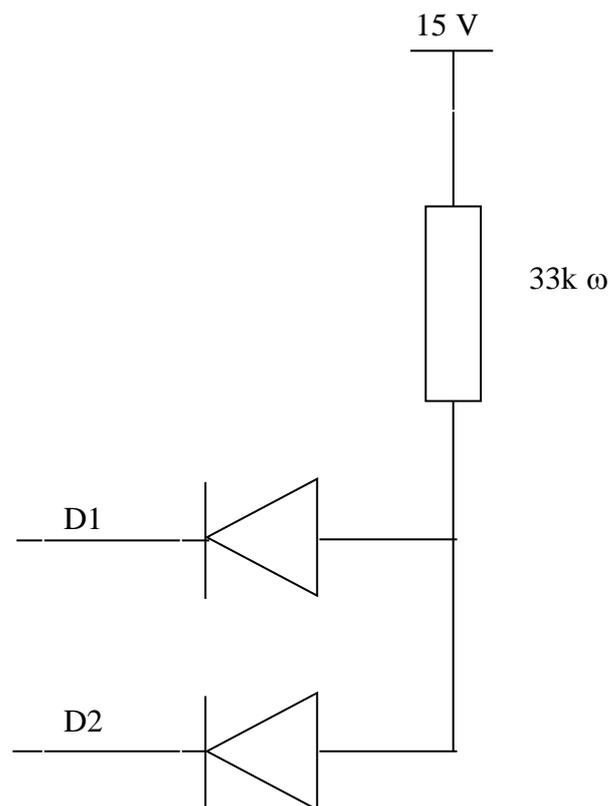
Un multivibrateur astable est un oscillateur de relaxation, produisant des signaux rectangulaires ; il peut passer spontanément d'un équilibre (quasistable) à un autre équilibre (quasistable) , et revient à son état initial.



**Fig.4: Schéma du Multivibrateur Astable.**

### V.2.4 LA MISE EN FORME

C'est le produit du créneau obtenu à la sortie du comparateur par le signal délivré par le multivibrateur l'aide d'une fonction AND .réalisée par des diodes montées en parallèle et une résistance ; la sortie étant à la masse .quand l'une des diodes conduit, elle est au potentiel +15V.quand les 2 diodes sont bloquées, par des signaux d'entrée d'amplitude +15V .on obtient à la sortie le signal de l'astable modulé par le créneau

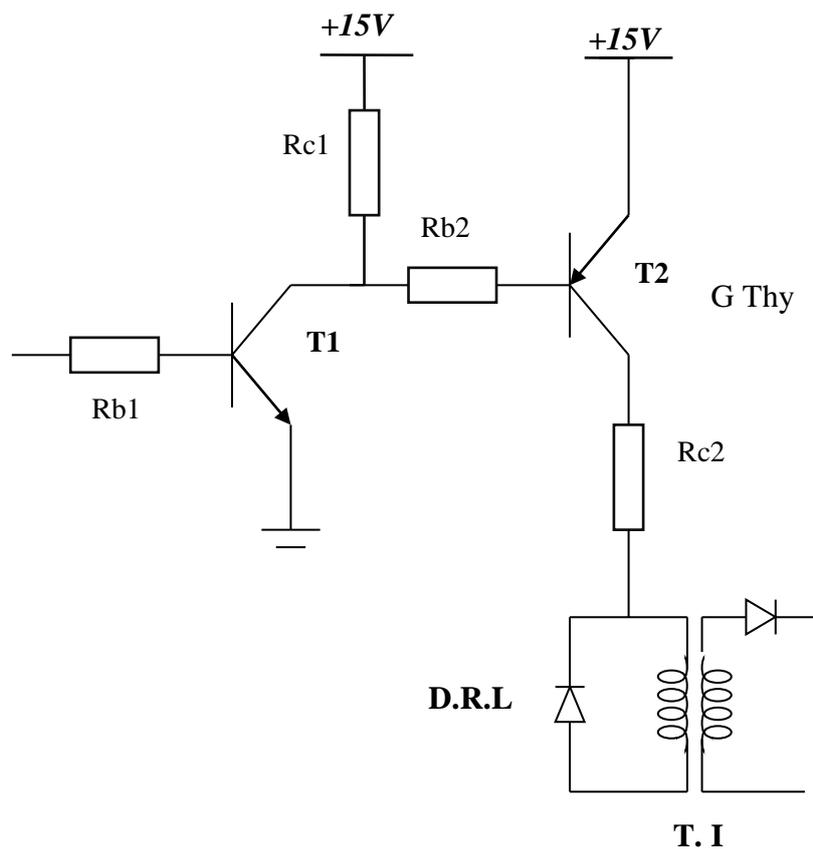


**Fig.5: Circuit de la mise en forme**

### V.2.5 AMPLIFICATEUR DE COURANT

L'impulsion délivrée par le comparateur a une amplitude en tension suffisante, mais sa puissance est faible, car l'amplificateur opérationnel ( $\mu A741$ ), ne peut délivrer un grand courant suffisant pour amorcer le thyristor, d'où la nécessité d'amplifier ce courant. Les éléments de base de notre étage amplificateur sont :

- deux transistors de type 2N 2219 de jonction ( NPN ).
- deux transistors de type 2N 2905 de jonction ( PNP ).



**Fig.6 : Schéma de l'amplificateur de courant.**

### V.2.6 TRANSFORMATEUR D'IMPULSION

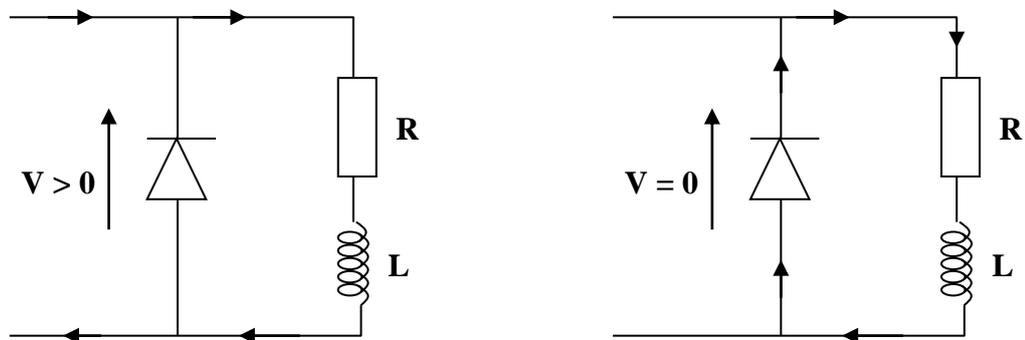
C'est un tore de ferrites, dont l'encombrement est de l'ordre de  $\text{cm}^3$ , et qui porte deux (02) enroulements de nombre de spires voisins.

Son utilisation dans les déclencheurs de thyristors est justifié par l'isolement galvanique qu'il procure en sortie du déclencheur et par sa capacité à transmettre des impulsions rectangulaires de hauteur et de durée suffisante pour produire un amorçage faible.

### DIODE DE ROUE LIBRE

Elle est installée en parallèle inverse sur la charge, de nature inductive, elle a le double rôle :

- d'imposer un signe constant à la tension, quand la diode  $D_0$  est bloquée,  $V(t) > 0$ , la charge est alimentée par la source et les redresseurs ;
- Quand  $D_0$  est passante,  $V(t) = 0$  ( on néglige sa tension de seuil ), le courant dans la charge se boucle par la diode. La charge est auto-alimentée au dépend de son énergie électromagnétique.



**Fig.7: La diode de roue libre.**

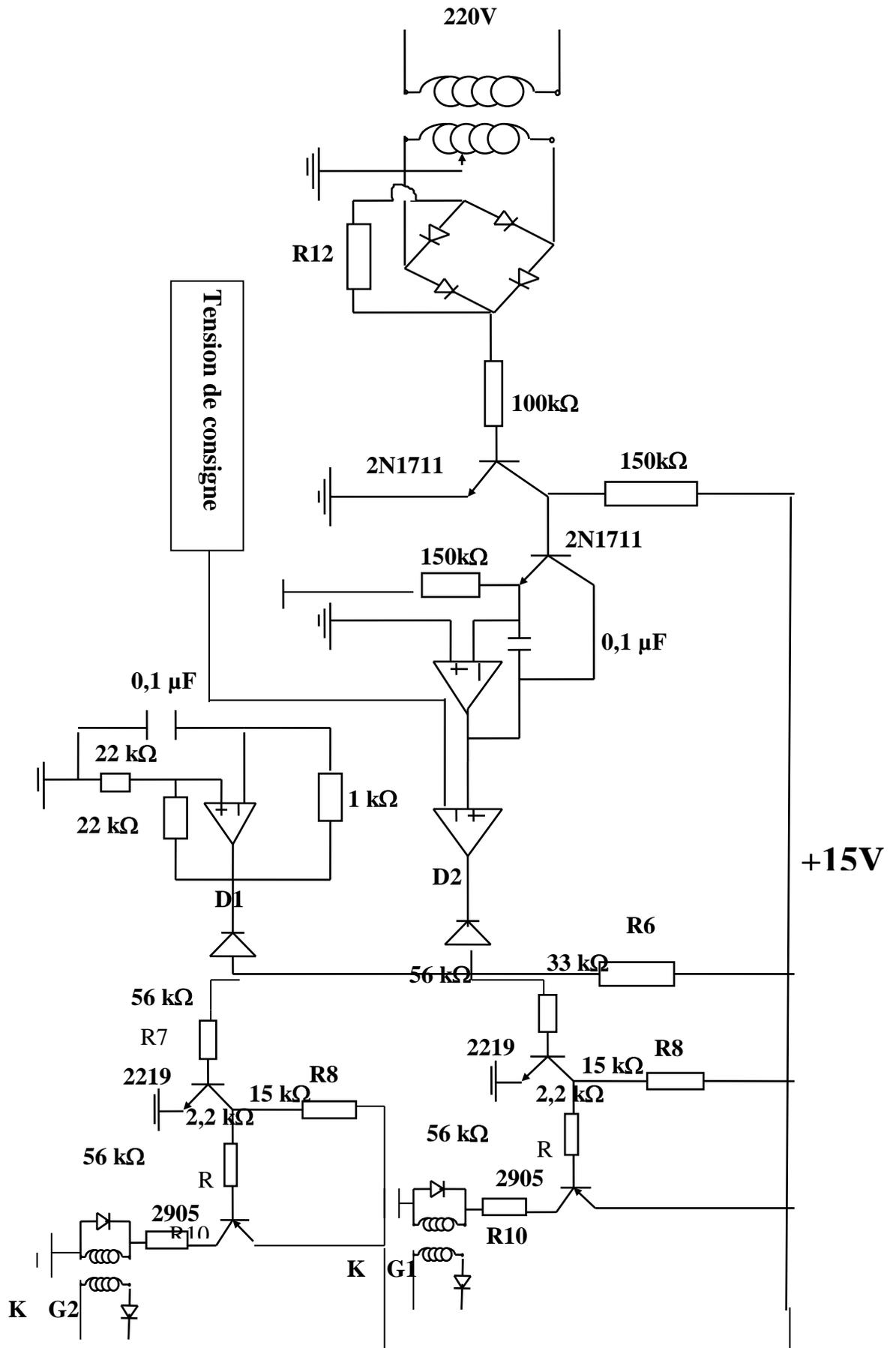
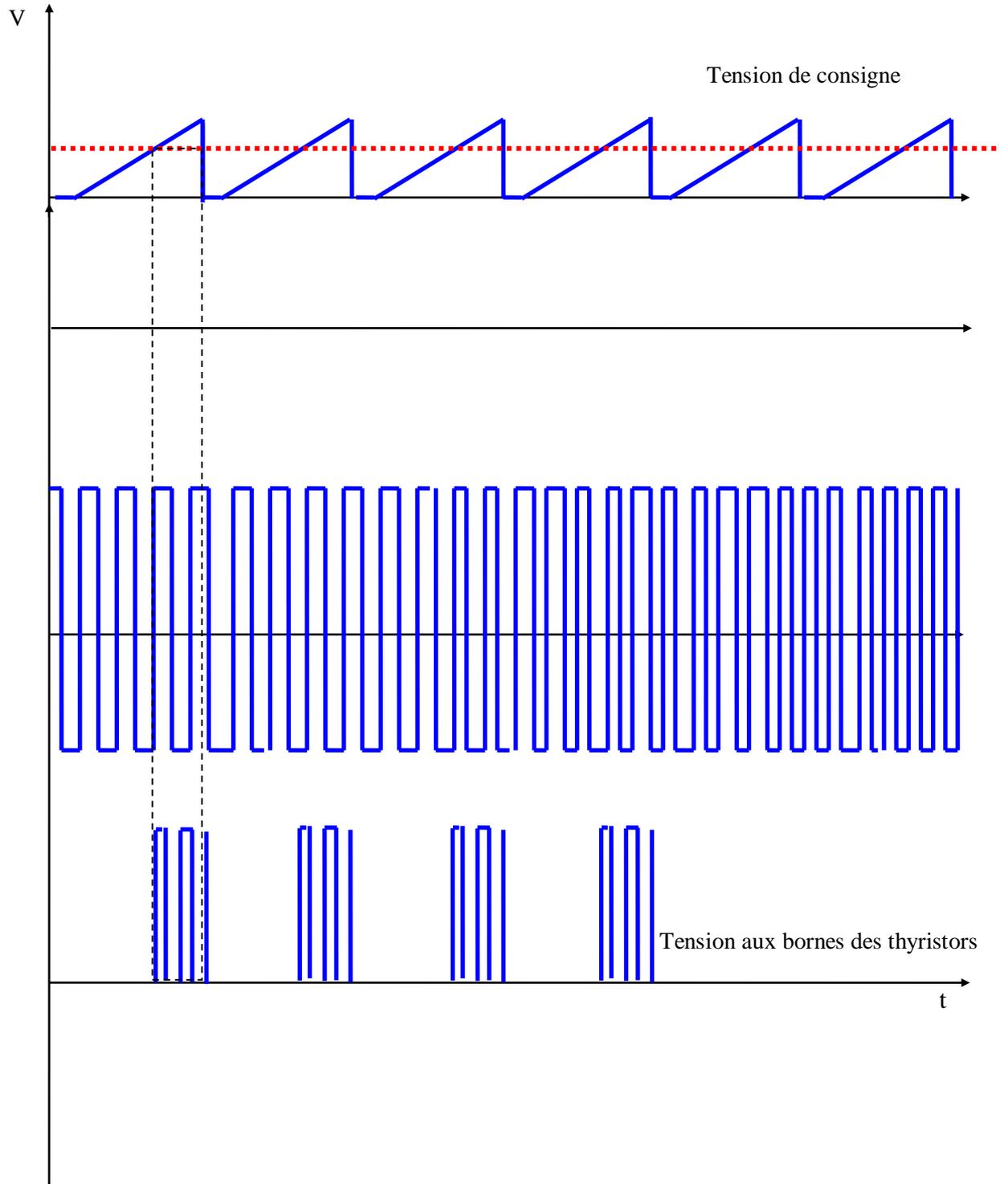


Fig.8: CIRCUIT DE COMMANDE



**VI.1 DESCRIPTION DE L'OUVRAGE :**

L'ouvrage à protéger et qui fait l'objet de cette étude est le gazoduc HAMMADI – HAMMA d'environ 23.360 km de longueur, reliant le poste gaz HAMMA II (centrale) à l'antenne principale Ø 28" BORDJ MENAIEL-EUCALYPTUS ,dont les caractéristiques techniques sont résumées dans le tableau ci dessous :

<b>LONGUEUR (km)</b>	<b>DIAMETRE (")</b>	<b>PMS (bars)</b>	<b>NUANCE D'ACIER</b>	<b>EPAISSEUR (mm)</b>	<b>REVETEMENT</b>
23,360	28	70,9	X 70	13 - 15,9	PE classe 3

Le tracé suivi par la canalisation ne rencontre pas d'obstacle notable.

**VI.2 RESISTIVITE DES SOLS :**

Le profil de résistivité, joint à ce dossier, fait apparaître une grande disparité dans la nature des sols traversés, dont certains sont assez agressifs.

L'application de la protection cathodique s'impose.

## **VI.3 CARACTERISTIQUE DE LA PROTECTION**

### **VI.3.1 PROTECTION PASSIVE**

#### **VI.3 1.a LE REVETEMENT**

La canalisation sera munie d'un revêtement de type PE classe : (3) ; La mise en œuvre du revêtement doit être conforme aux spécifications techniques en vigueur définies sur le fascicule (5) par la conférence équipement transport gaz de 1996.

#### **VI.3.1.b LES RACCORDS ISOLANTS**

S'intercalant entre les conduites en provoquant la discontinuité électrique, les raccords isolants seront de préférence de type monobloc avec une excellente résistance mécanique, ayant une tension de claquage égale à 5000V, et ayant été testés en usine à 12500V. Ils seront installés aux points indiqués ci dessous :

- Au piquage,
- A l'aval de la gare racleur départ,
- A l'amont du poste de la centrale,
- A l'aval du poste de centrale.

#### **VI.3.1.c COFFRETS DE SHUNTAGE**

Les raccords isolants seront shuntés par câbles isolés de 50mm<sup>2</sup> de section. Les câbles brasés à l'amont et à l'aval des raccords isolants seront ramenés sous gaine au coffret de shuntage.

Les coffrets de shuntage seront installés au niveau de chaque raccord isolant et devront comporter deux entrées et un éclateur antidéflagrant 230V. Les coffrets seront installés aux points indiqués sur un tableau en annexe.

## VI.4 PROTECTION ACTIVE

### CHOIX DU DISPOSITIF DE PROTECTION CATHODIQUE

Vu l'importance du réseau, la protection cathodique sera assurée par soutirage de courant.

La protection cathodique du gazoduc Ø 28" HAMMADI-HAMMA comprendra :

- Une protection provisoire .
- Une protection définitive.

#### VI.4.1 PROTECTION PROVISOIRE

Les tronçons de canalisation susceptibles de rester plus de trois mois dans le sol avant d'être raccordés aux systèmes de protection définitive doivent être protégés par un système de protection provisoire et qui pourra être constituée par des anodes réactives (anodes au magnésium) installées tous les 300 mètres dans les zones de basses résistivités, et tous les 600 mètres dans les zones non agressives. Ces anodes devront être enlevées avant la mise en service de la protection définitive.

#### VI.4.2 PROTECTION DEFINITIVE

La protection cathodique du gazoduc Ø28" HAMMADI-HAMMA sera assurée par deux (02) postes de soutirages.

L'ensemble de protection cathodique comprend les éléments suivants :

- Les prises de potentiel
- Les raccords isolants.
- Les coffrets de shuntage.
- Les ensembles de soutirage comprenant :
  - Les organes de coupure du courant d'alimentation et de protection des installations.
  - Le compteur
  - Les transformateurs redresseurs de courant

- Les prises de terre de l'ensemble du poste de soutirage
- Les câbles de liaison entre :
  - Le tableau de comptage et le transformateur redresseur
  - Le transformateur redresseur - canalisation
  - Le transformateur redresseur - prise de terre

#### **VI.4.2.a EMPLACEMENT DES POSTES DE SOUTIRAGE**

L'emplacement des postes de soutirage est prévu aux PK 1.650 et au PK 16.700. L'alimentation électrique des transformateurs redresseurs se fera à partir des lignes électriques basse tension existante à proximité. Un prolongement des lignes basse tension sont à prévoir.

#### **VI.4.2.b EMPLACEMENT DE LA PRISE DE TERRE (DEVERSOIR)**

Les emplacements de la prise de terre (voir plan en annexe) a été déterminé préalablement par une étude de terrain dont les valeurs de résistivité sont de :

- **poste de soutirage N°1 :**  $\rho_1 = 17 \Omega\text{m}$  ;  $\rho_2 = 17 \Omega\text{m}$  ;  $\rho_3 = 17 \Omega\text{m}$
- **poste de soutirage N°2 :**  $\rho_1 = 57 \Omega\text{m}$  ;  $\rho_2 = 55 \Omega\text{m}$  ;  $\rho_3 = 62 \Omega\text{m}$

La distance entre la prise de terre et la canalisation est de 300m.

#### **VI.4.2.c RAILS POUR PRISE DE TERRE**

La prise de terre sera constituée de rails lourds de type SNTF ou de barres métalliques équivalentes, soudées bout à bout et à cœur de façon que :

- La masse linéaire soit au moins égale à 40 kg/m,
- Le pouvoir de dissolution soit de 10kgLan.

Les rails seront d'une longueur aussi grande que possible.

**VI.4.2.d POUSSIER DE COKE**

Le poussier de coke (backfill) utilisé comme régulateur de corrosion et destiné au remplissage de tranchée aura une granulométrie inférieure à trois mm et un taux d'humidité inférieur à 10 %.

**VI.5 MISE À LA TERRE DES POSTES GAZ ET POSTES DE SOUTIRAGE**

Les mises à la terre des postes gaz et masses électriques des postes de soutirage doivent être réalisées par des tubes ou piquets en acier galvanisé. La résistance électrique de prise de terre doit être inférieure à un (1) ohm.

## VI.6 LISTE DU MATERIEL

N°	DESIGNATION	UNITE	QUANTITE	OBSERVATIONS
1	Transformateur-redresseur	U	2	
2	Câble de liaison : conduite – redresseur, redresseur - anode	m	640	de section : $1 \times 50\text{mm}^2$ double gaine
3	Câbles de liaison Anode déversoir	m	320	de section : $1 \times 25\text{mm}^2$ double gaine
4	Câbles de liaison Prise de potentiel	m	430	de section : $1 \times 10\text{mm}^2$ double gaine
5	Coffret de shuntage	U	10	
6	Câbles de shuntage	m	110	de section : $1 \times 50\text{mm}^2$ double gaine
7	Prise de potentiel			
8	Rail	m	200	Rebut SNTF 45kg/ml
9	Raccords isolants	U	4	
10	Prise de terre pour poste gaz et transfo-redresseur	U	4	Piquet en acier galvanisé de longueur 1,50 mètre
11	Repères pour prise de terre	U	4	
12	Résistances variables	U	45	$R(0-5)\Omega$
13	lampe	U	2	
14	Interrupteur de courant Simple allumage	U	2	
15	Prise de courant 220V	U	2	
16	Poussier de coke	kg	10.000	

### VI.7 RESULTATS DES CALCULS

Les résultats de calcul ont été effectués pour une valeur d'isolement moyenne de  $10000\Omega\text{m}^2$ . Les potentiels et intensités de soutirage ainsi que les potentiels des extrémités de conduite ont pour valeur :

<b>L(km)</b>	<b>E(mV)</b>	<b>I(mA)</b>
$L_1 = 1.650$	$E_1 = -1508$	$I_1 = 915$
$L_2 = L_3 = 7.525$	$E_2 = E_3 = -1000$	$I_2 = I_3 = 2126$
$L_4 = 6.660$	$E_4 = -1382$	$I_4 = 1806$

#### POSTE SOUTIRAGE N°1 :

- $E_{S1} = -1568\text{mV}$
- $I_{S1} = 3041\text{ mA}$

#### POSTE SOUTIRAGE N°2 :

- $E_{S2} = -1654\text{mV}$
- $I_{S2} = 3932\text{ mA}$

## **VI.8 MISE EN SERVICE**

Lorsque les installations auront été réalisées, la mise en service sera effectuée par un spécialiste en protection cathodique.

Un technicien se rendra sur place pour procéder à la mise en service du dispositif, qui comprendra :

- Un examen relatif à la conformité des ouvrage,
- Un relevé des potentiels spontanés de la conduite,
- Une vérification des isolements,
- Un réglage du dispositif de protection,
- Un relevé des potentiels de protection de la conduite.

Un rapport de fin d'affaire mentionnera les résultats de cette mission.

### VII.1 COUT DE LA PROTECTION CATHODIQUE

Les coûts d'investissement en matière de protection cathodique des ouvrages métalliques enterrés ne représentent approximativement que 1% du coût du premier établissement de la canalisation : généralement compris entre 0,3 et 0,8 % [5].

Cette estimation ne prend pas en compte le coût du revêtement ni le coût de raccordement des installations de protection cathodique avec le réseau électrique.

Par ailleurs le coût d'exploitation d'une installation de protection cathodique représente 0.1 à 0.2 % du coût de renouvellement des ouvrages correspondants.

La durée de vie des ouvrages sous PC, sans percement des canalisations, est multipliée par un facteur minimal de trois.

Le graphe suivant représente l'évolution du nombre de fuites en fonction du temps sur un réseau en acier de 100 Km non protégé cathodiquement [6].

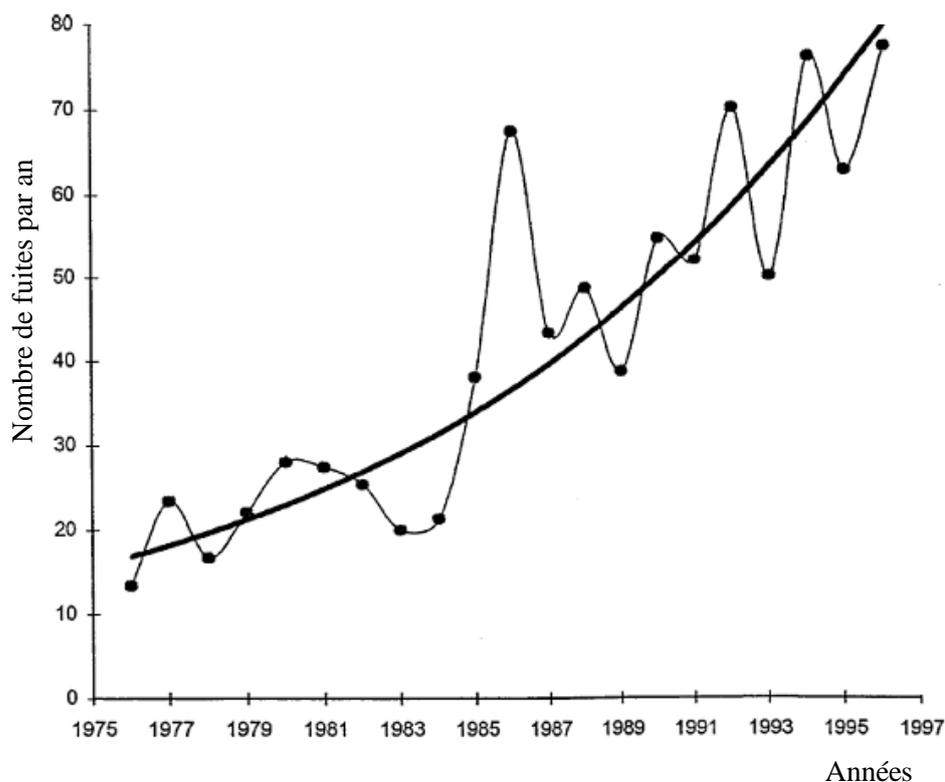
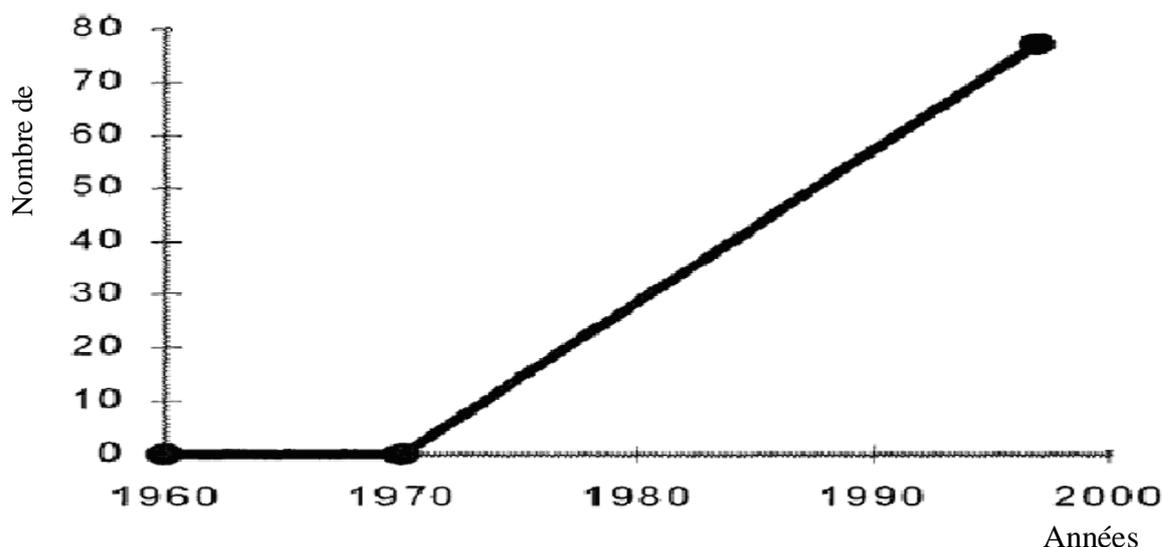


Fig.27 : Evolution du nombre de fuite en fonction du temps

Le graphe ci-dessous montre la tendance de l'évolution du nombre de fuites en fonction du temps sur un réseau non protégé cathodiquement.



**Fig.28 : La tendance de nombre de fuite en fonction du temps**

- Coût moyen de réparation d'une fuite : 5 K€
- Nombre de percements constaté en 1996 : 77

Ce qui donne un coût moyen de réparation des fuites : 385 K€ soit environ 2% du coût de renouvellement des ouvrages.

D'après une étude faite par Technip l'un des leader mondial dans les études d'ingénierie; La protection cathodique d'un pipeline de 34'' et de 770km de longueur représente environ 1,4 % des investissements (fournitures et pose de pipeline) et de 4% des investissements pour un pipeline de diamètre de 14'' et de 134 km de longueur.

En règle générale, on estime lors des projets, que les frais d'investissements en protection cathodique ne dépassent pas 5% des investissements totaux de la structure à protéger.

Il est difficile de donner des chiffres précis concernant le coût de la protection cathodique.

Il ressort néanmoins, des valeurs données ci-dessus, que la protection cathodique, bien réalisée et bien exploitée, est un moyen économique de protéger contre la corrosion des ouvrages à des prix de revient très élevés.

## VII.2 LE GAIN D'ENERGIE DANS LA LUTTE CONTRE LA CORROSION

### La lutte contre la corrosion génère t'elle combien de gain d'énergie ?

L'énergie électrique nécessaire pour assurer la protection cathodique de cet ouvrage pendant sa durée de vie (une période de 25 ans, durée d'amortissement sur l'investissement du projet) est de l'ordre 2468,52 kWh soit 0.21 tep[7], cette énergie est insignifiante devant l'énergie nécessaire pour la production du métal de cette ouvrage qui est de 41.89 GWh soit 3609.88 tep[8] sachant que la protection cathodique peut prolonger la durée de vie des ouvrages par trois et plus[9] sans tenir compte de l'aspect sécuritaire (percement des canalisations dues à la corrosion). La production d'une tonne d'acier nécessite une énergie électrique de 7300 kWh soit 0.629 tep; c'est l'énergie nécessaire pour assurer la protection cathodique du Gazoduc Hammadi-Hamma qui correspond à trois fois la durée de vie de l'ouvrage (Un Gazoduc de diamètre 28'' sur une longueur de 70km).

## **CONCLUSION**

Dans ce travail, nous avons fait une étude de synthèse de tous les phénomènes de corrosion. Les techniques de lutte contre ces phénomènes ont été rappelées dans ce mémoire. En particulier, nous nous sommes intéressés à l'étude la corrosion des canalisations métalliques enfouies par la technique de protection cathodique.

En effet, la lutte contre la corrosion est un gisement énorme d'économies d'énergie.

La corrosion provoque des dangers pour les personnes et leurs biens (pollution, incendie, etc....), la diminution du capital de l'entreprise, l'augmentation du coût d'entretien des installations et des coûts de production (pertes de produits), un manque à gagner dus aux arrêts d'exploitation.

La perte d'une tonne de tôle d'acier par corrosion est équivalente à une perte d'énergie de 7 300 kWh soit 0.629 tep; c'est l'énergie nécessaire pour assurer la protection cathodique d'une canalisation de 8'' de diamètre sur une longueur de 200Km.

En perspective, nous envisagerons l'étude de la faisabilité de l'application discontinue du courant d'injection qui permettrait un gain certain d'énergie. Ainsi on appliquerait le courant de protection pendant quelques secondes et on l'arrêterait le quart de ce temps. Une telle expérience est déjà utilisée dans le cadre d'expertises (ON/OFF) et pourrait sans doute être transposée avec succès dans l'exploitation.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Source Ruptures ou fuites apparentes (Source : EISENBEIS Patrick – 1995).
- [2] Ron Brush - The pods data model - Proceedings of IPC'02 - 27092 – 4th International Pipeline Conference September 29-October 3, 2002, Calgary, Alberta, Canada – 2002.
- [3] BADORIS - Document de synthèse relatif à une barrière technique de sécurité (BTS) Protection cathodique Version 1.1 – janvier 2008.
- [4] FLUXYS. Bérénice Crabs · Avenue des Arts 31 · B-1040 Bruxelles.
- [5] Protection cathodique des canalisations métallique, DEBADE Edition Gaz de France 2002
- [6] Rapport d'expertise Marketa PICHLOVA Gaz de France, Direction de la Recherche Août 2006.
- [7] Agence Internationale de l'Energie l'année 1999.
- [8] l'Agence locale de l'Energie de l'agglomération lyonnaise – février 2005.
- [9] MAREC Révision : 2 de 1996TRAN 96.2.

- 1- Y. ADDA, J.-M. DUPOUY, Y. QUR et J. PHILIBERT, Eléments de métallurgie physique, vol. VI, Document. franç. Paris, 1982.
- 2- J. BENARD, A. MICHEL, J. PHILIBERT et J. TALBOT, Métallurgie générale, Masson, Paris, 2<sup>e</sup> éd. 1991.
- 3- G. BERANGER, J.-C. COLSON et F. DABOSI, Corrosion des matériaux à haute température, éd. de Physique, Les Ulis, 1991.
- 4- Corrosion et protection des métaux, école d'été du C.N.R.S., éd. du C.N.R.S., Paris, 1982
- 5- D. DESJARDINS et R. OLTRA dir, Corrosion sous contrainte des matériaux métalliques, éd. de Physique, 1992.
- 6- C. FUVELLE, Introduction à la corrosion, Cetim, Senlis, 2<sup>e</sup> éd. 1988
- 7- P. J. GELLINS, Introduction to Corrosion Prevention and Control, Coronet Books, Philadelphie, 1985.
- 8- K. HAUFFE, Oxidation of Metals, Plenum Press, New York, 1965
- 9- O. KUBASCHEWSKI et B. E. HOPKINS, Oxidation of Metals and Alloys, Butterworth, Londres, 2<sup>e</sup> éd. 1962.
- 10- E. V. SCHMID, Durabilité extérieure et protection anticorrosion, Librairie des traitements de surface, Paris, 1985.

- 11- L. L. SHREIR dir., Corrosion, 2 vol., Butterworth, 1977
- 12- G. WRANGLER, An Introduction to Corrosion and Protection of Metals, Chapman et al, New York, 2<sup>e</sup> éd. 1985.
- 13- Machine Electriques, Electronique de puissance. Alain HERBERT Edition DUNO (1985)
- 14- Electrotechnique à l'usage des Ingénieurs. FOUILLE Edition DUNO (Paris 1969)
- 15- Electrotechnique et machines électriques. Edition EXROLLES (1977)
- 16- Electronique Industrielle. Edition du RENOUVEAU Pédagogique (1984)
- 17- Electricité industrielle Michelle GIRARD Edition SCIENCE INTERNATIONALE (1992)
- 18- KLACHINKOV Fermant BISMUTH 1977
- 19- Circuits électriques. Herbert W. JACKSON 1986

Année Universitaire 2007-2008  
**Formulation et évaluation d'agents fluxants  
utilisés pour le brasage tendre**

**Formulation and characterization of soldering fluxes**

**تركيب و تقدير عوامل السيولة المستعملة في التلحيم اللدن**

**ملخص:**

هذا العمل يقودنا إلى دراسة عوامل السيولة المستعملة في التلحيم و التلحيم اللدن و كذلك مبادئ تركيبها إن تكوين هذه العوامل و الخصائص الفيزيوكيميائية لها تتمثل في توضيح دور مختلف العناصر المركبة لها القسم الاورال يتضمن دراسة عوامل السيولة المركبة للموصلات المغلفة المستعملة في التلحيم المقوس أما القسم الثاني فيشمل عوامل السيولة في حالة التلحيم اللدن .  
القسم التجريبي يتضمن تركيب بعض عوامل السيولة ذات قاعدة الكلوفان الفعالة المركبات المحصل عليها ميزت حسب مدى تلحيمها و ذلك عن طريق تقني خبير في مجال التلحيم قمنا بإجراء أبحاث حول تأثير مختلف العناصر على مدى صلاحية المركبات المشكلة , النتائج أثبتت انه ليس من السهل توقع هذه الصلاحية و ذلك لأن تفاعلات العوامل التي تجري أثناء درجة حرارة التلحيم نوعا ما مجهولة .

مفاتيح : عوامل السيولة , التلحيم , التلحيم اللدن , تركيب

RESUME

Le présent travail porte sur l'étude des agents fluxants utilisés en soudage et brasage ainsi que les principes de leur formulation. La composition et les propriétés physicochimiques de ces produits sont présentées en mettant l'accent sur le rôle des différents ingrédients. Dans une première partie, les produits utilisés dans la formulation de électrodes enrobées pour soudage à l'arc sont décrits. Dans une deuxième partie, l'accent est mis sur les produits utilisés dans le cas du brasage tendre. La partie expérimentale a porté sur la formulation de quelques agents fluxants à base de colophane activée. Les produits ont été caractérisés sommairement du point de vue de la brasabilité en faisant appel à l'expérience d'un technicien qualifié dans le domaine. L'influence des différents ingrédients sur la performance des produits formulés a été recherchée. Les résultats montrent qu'il est difficile de prévoir cette performance d'autant plus que les réactions de fluxation qui ont lieu aux températures de brasage sont encore peu connues.

Mots-clés : Agents fluxants, soudage, brasage tendre, formulation.

ABSTRACT

The present work deals with the study and formulation of welding and brazing fluxes. Composition and physicochemical properties of these products are basically described and the role of each ingredient precised as clearly as possible. In the first part, the study focused on the description of the products used in flux coated electrodes, especially those used in shielded metal arc welding. The second part is devoted to the study of the fluxes used in soft soldering. The experimental work deals with the formulation and characterization of activated rosin based fluxes using various organic acids as activators. The products performance are based on solderability tests conducted by a highly qualified operator. Influence of the ingredients used in the formulation on the solderability was investigated. Results show a fairly complex predictability knowing that actual chemical reactions that occur during the fluxing process are not well understood.

Key-words: Fluxing agents, welding, soldering, formulation.