

9/83

3ea

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

المعهد الوطني للعلوم والتقنية  
**Projet de Fin D'études**

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHEQUE

Sujet :

CONCEPTION ET REALISATION D'UN  
CABLE DE 30 KV ISOLE A L'E.P.D.M

Proposé par :

A. BOUBAKEUR Dr es-sciences techniques

Etudié par :

M. CHEBREK

M. HAMIA



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

# Projet de Fin D'études

Sujet :

CONCEPTION ET REALISATION D'UN  
CABLE DE 30 KV ISOLE A L' E.P.D.M

Proposé par :

A. BOUBAKEUR Dr es-sciences techniques

Etudié par :

M. CHEBREK

M. HAMIA

--- 000 --- D E D I C A C E S --- 000 ---

-----

I :

Ma grand-mère

Mes parents

Toute ma famille

Tous mes amis (es)

Mustapha HAMIA .

I :

Mes parents

Mes frères

Ma grande famille

Tous mes amis

Mohamed CHEBREK .

II / OUS DEDIONS CE MEMOIRE .....



— oOo — R E M E R C I E M E N T S — oOo —

Vous remercions vivement monsieur BOUBAKEUR pour les précieux conseils ainsi que les fructueuses suggestions qu'il nous a fournis tout au long de cette étude .

Que l'ensemble du personnel de la SONELEC et en particulier les techniciens des différents laboratoires et le responsable de la documentation , ainsi que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce projet , notamment MM AIT-SIDHOUM et HARANI , de l'université d'ALGER et MM HANIFI , BENSENOUCI et AOUAUCHE de l'ERDP ; trouvent ici notre profonde reconnaissance et nos plus vifs remerciements .....

## I N T R O D U C T I O N

Les lignes aériennes , par leur caractère économique , occupent toujours une place importante dans le domaine du transport et de la distribution de l'énergie électrique . Le développement des zones urbanisées conduit à une introduction de plus en plus large des câbles dans le réseau .

Dans la plupart des pays , les cables à haute et moyenne tension sont encore isolés au papier . Cependant , cet isolant est progressivement remplacé par les isolants secs ( élastomères - thermoplastiques ) qui possèdent des propriétés très diverses leur ouvrant sans cesse , de nouveaux champs d'applications .

Les cables à isolation synthétique extrudée , présentent par rapport aux câbles classiques au papier imprégné , une grande facilité de mise en oeuvre et , grace à la suppression de la maintenance , une simplification de l'exploitation .

En Algérie , le réseau de distribution souterrain tend à être unifié à une tension de 30 KV .

L'objet de notre étude est de vérifier la possibilité d'utilisation de l'E.P.D.M dans l'isolation des câbles de 30KV .

A cette fin , nous procédons d'abord à l'identification de l'isolant par l'étude de ses propriétés électriques et mécaniques . Nous analyserons ensuite les différents constituants du câble et leur dimensionnement , Nous décrirons le processus de fabrication adopté pour la réalisation d'un câble unipolaire à champ radial ( 18/30 KV ) sur lequel porteront nos essais .



Generalites :

Afin de verifier si notre melange d'E.P.D.M satisfait aux exigences imposees aux isolants utilises en moyenne tension , nous etudions dans ce chapitre , les differentes caracteristiques electriques et mecaniques sur des eprouvettes , prelevees d'un melange prepare au laboratoire et d'un melange industriel .

La comparaison des mesures effectuees sur les eprouvettes des deux melanges nous permettra de prevoir le comportement de l'isolant sur cable .

Nos essais ont ete realises suivant les recommandations de la norme (1) ; Les resultats obtenus sont compares aux valeurs prescrites dans la norme en vigueur (2) .

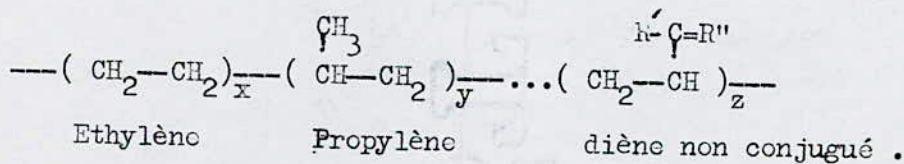
Nous etudions aussi , dans ce chapitre , l'influence de la temperature sur les differentes caracteristiques de l'isolant , ainsi que son vieillissement thermique .

1-1- Presentation de l'E.P.D.M.

Parmi les caoutchoucs d'ethylene-propylene ( E.P.R ), les meilleurs sont a base de copolymeres d'ethylene propylene ( E.P.M.) ou de terpolymeres d'ethylene propylene et de diene monomere ( E.P.D.M ). Ces derniers sont utilises prefferentiellement parcequ'ils ont des vitesses de vulcanisation plus rapides .

1-1-1- Structure de l'E.P.D.M.

Notre isolant est constitue d'un terpolymere deethylene-propylene-diene non conjugue en faible quantite dont la structure developpee est :



La caractéristique significative de cette structure est l'absence totale d'insaturation dans la chaîne principale du polymère .

De ce fait, L'EPDM aura une bonne résistance à l'attaque de l'oxygène , de l'ozone et de beaucoup d'autres produits chimiques tels que les alcools , acides ....

#### 1-1-2- Formulation et Mise en oeuvre du Mélange :

Le mélange " pure gomme " du terpolymère de base , n'a que de médiocres propriétés physiques . Afin d'améliorer ses qualités , nous lui ajoutons des charges renforçantes , des plastifiants et des agents de vulcanisation .

Les différents ingrédients rentrant dans la formulation du mélange sont :

- Le silicate d'alumine anhydre et le carbonate de calcium , utilisés comme charges , afin d'améliorer les propriétés électriques et mécaniques .
- L'huile de pétrole et une huile minérale paraffinique , comme plastifiants afin d'améliorer la résistance mécanique aux basses températures et la stabilité aux températures élevées .
- Le peroxyde 1 - 3 bis ( tertio-butyl-isopropyl-benzène ) et le triallyl-cyanurate ( TAC ) comme agents de réticulations .
- Le vinyl - tri 2 ( bêta méthoxy ) silane , comme agent hydrophobe de pontage entre charges et élastomère .
- L'oxyde de zinc , comme activateur de vulcanisation
- La paraffine , comme lubrifiant .
- Le triméthyl dihydroquinoléine polymérisé , comme anti-oxydant .
- Le bioxyde de plomb , comme charge renforçante , notamment contre l'humidité

#### 1-1-3- Propriétés Physicochimiques .

Les principales caractéristiques du mélange ainsi obtenu se résument à :

- Une bonne tenue au vieillissement à la chaleur .
- Une résistance à l'ozone et aux intempéries .
- Une résistance à l'action de la vapeur .
- Une souplesse à basse température .
- Une bonne résistance aux radiations et au cheminement .
- De bonnes propriétés électriques .
- Une facilité de mise en oeuvre .



- Comportement au feu :

L'E.P.D.M, comme tous les elastomères, a le même comportement dans un incendie; il brûle facilement et propage la flamme, mais ne produit pas de gouttes enflammées; il ne dégage pas de gazs corrosifs ou toxiques, à l'exception de CO et CO<sub>2</sub> et parfois d'une faible quantité de SO<sub>2</sub> provenant de certains agents de vulcanisation.

Cependant, grace à l'adjonction d'une charge minérale, l'E.P.D.M a l'avantage de devenir auto-extinguible (3) .

Le melange ainsi obtenu, qui ne contient pas d'halogène, donc pas de de chlore, atteint un degré d'auto-extinguibilité supérieur à celui d'un melange type NEOPRENE ( polychloroprène c.r )

#### 1-2- Preparation des Eprovettes

La mise en oeuvre d'une plaque d'EPDM se divise en trois operations principales : Le melangeage , la mise en forme , et la vulcanisation .  
Le melangeage des matières premières ( elastomère - charges - huiles lubrifiantes agents protecteurs - agents de cuisson: - et agents de vulcanisation ) , est effectué à l'aide d'un malaxeur à cylindres chauffés à 80° c par circulation d'eau interne .

Le melange sorti du malaxeur sous forme de lambeaux d'une epaisseur supérieure à celle désirée sur plaques , nous l'introduisons entre deux plateaux d'une presse chauffante , où s'effectuent simultanément en 10 minutes la mise en forme et la vulcanisation , sous une température de 180° c et une pression de 50 bars .

La vulcanisation permet la formation de certaines liaisons doubles entre atomes de carbone de l'E.P.D.M. Ceci dans le but de conferer au matériau de meilleures propriétés dielectriques et surtout mécaniques .

### 1-3- Caracteristiques electriques.

Sous un champ alternatif, tout isolant est traversé par des courants de conduction et d'absorption qui donnent lieu à des pertes diélectriques. Ces pertes engendrent un degagement de chaleur et, si leur niveau est trop élevé, elles peuvent conduire soit à un claquage thermique soit à une degradation d'ordre chimique plus ou moins rapide.

Les proprietés electriques d'un isolant doivent etre adaptées à des utilisations speciales, cela signifie en général, que la constante dielectrique et le facteur de dissipation doivent etre faibles, et que la resistance d'isolement et la rigidité diélectrique doivent etre élevées.

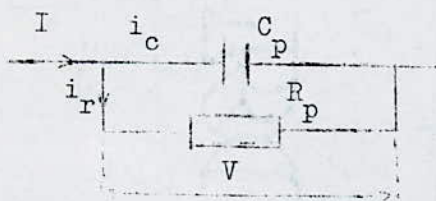
La connaissance des caractéristiques electriques est primordiale pour accepter l'utilisation d'un materiau dans une utilisation. Elle permet de faciliter aussi le choix entre plusieurs materiaux susceptibles de remplir les exigences imposées à une isolation donnée.

Les caracteristiques principales que nous etudions sont les suivantes : le facteur de dissipation, la resistivite, la permittivite et la rigidite dielectrique. Elles nous permettront d'identifier notre isolant et de verifier s'il repondra aux exigences de sa mise en service en moyenne tension.

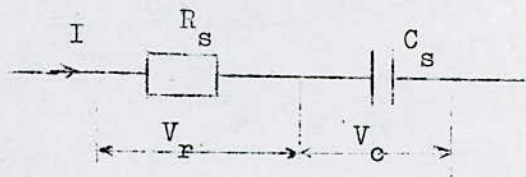
#### 1-3-1- Pertes diélectriques.

Les pertes diélectriques dans un isolant sont souvent caracterisées par le facteur de dissipation ( $\text{tg } \delta$ ) de cet isolant, quotient du courant actif de pertes par le courant capacitif.

En effet, du point de vue de son comportement electrique, tout isolant placé entre deux pièces conductrices sous tension alternative est equivalent à un condensateur parfait (sans pertes), en parallele ou en serie avec une resistance.



$$\text{tg } \delta = \frac{1}{R_p \cdot C_p}$$



$$\text{tg } \delta = \omega R_s \cdot C_s$$

La puissance dissipée ou pertes dielectriques :  $P = V^2 \cdot C \cdot \omega \cdot \text{tg } \delta$ .

$P$  (w/cm) ;  $\omega = 2\pi f$  ;  $C$  (F/cm) ;  $V$  (volts)



### 1-3-1-1- Dispositif de mesure.

Pour la détermination du facteur de dissipation, on utilise un pont de Schering type TETTEX AG (figure 1). La cellule d'essai utilisée pour la détermination des caractéristiques électriques est un condensateur à anneau de garde TETTEX type 2904 dont le schéma de principe est représenté sur la figure 2. Les électrodes ont une surface de  $20 \text{ cm}^2$  et furent soumises à une pression de  $250 \text{ g/cm}^2$ . Cette pression obtenue par un jeu de poids, permet d'éviter la présence d'air entre l'isolant et les électrodes.

Afin d'effectuer les mesures à différentes températures, la cellule de mesure est équipée de deux plaques chauffantes permettant d'élever la température des électrodes jusqu'à  $135^\circ\text{C}$ .

### 1-3-1-2- Résultats obtenus:

Les essais sont effectués sur des éprouvettes circulaires de  $20 \text{ cm}^2$ , et de 2 mm d'épaisseur. Sous une tension de 2Kv, nous obtenons les résultats suivants:

- Mélange laboratoire:  $\text{tg } \delta = 5,5 \cdot 10^{-3}$  à  $20^\circ\text{C}$   
 $\text{tg } \delta = 7,7 \cdot 10^{-3}$  à  $90^\circ\text{C}$ .
- Mélange industriel:  $\text{tg } \delta = 11,9 \cdot 10^{-3}$  à  $20^\circ\text{C}$   
 $\text{tg } \delta = 09,2 \cdot 10^{-3}$  à  $90^\circ\text{C}$ .

Notre isolant présente un faible facteur de dissipation car les valeurs obtenues sur les deux mélanges sont nettement inférieures aux valeurs maximales admises sur câble (2), qui sont:

- $\text{tg } \delta = 20 \cdot 10^{-3}$  à  $20^\circ\text{C}$
- $\text{tg } \delta = 40 \cdot 10^{-3}$  à  $90^\circ\text{C}$ .

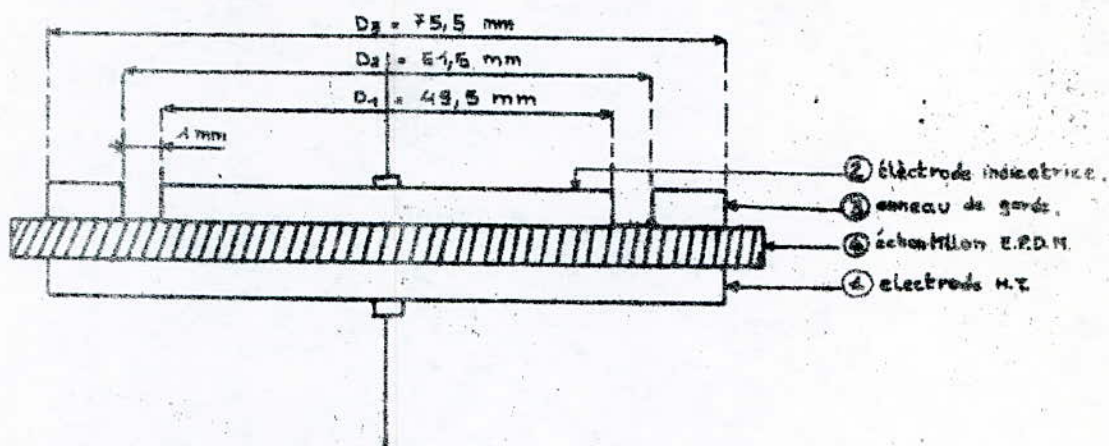


Fig-2: Schéma de principe du condensateur à anneau de garde.

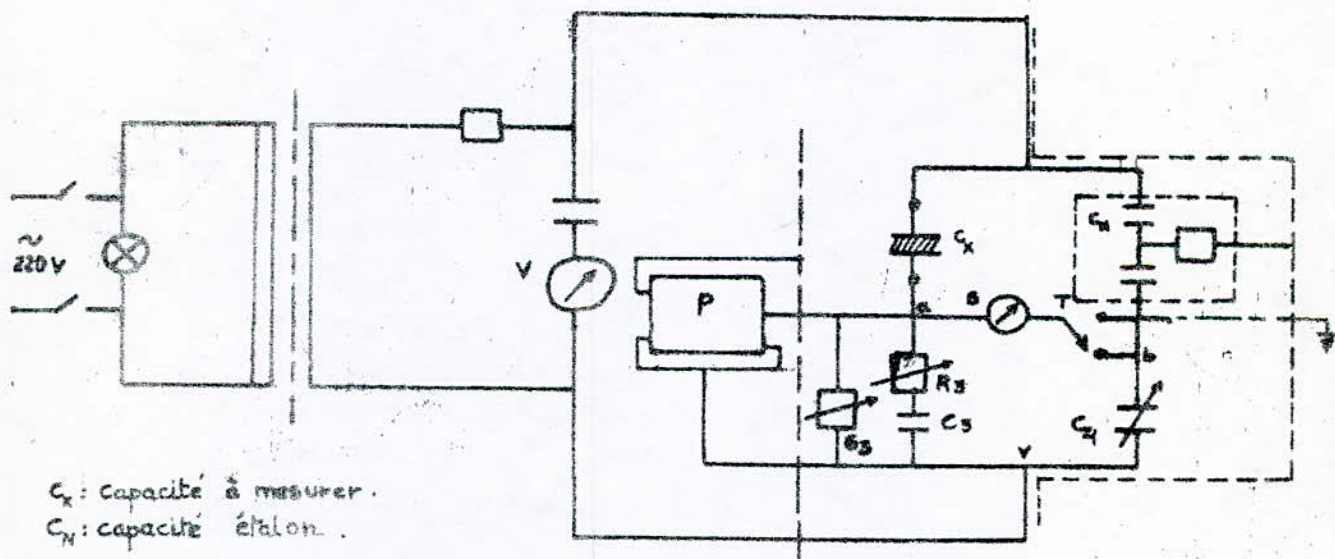


Fig-1: Pont de SHERING type TETEX.AG



### 1-3-2- Permittivité :

La permittivité ( ou pouvoir inducteur spécifique ), caractérise la propriété qu'a un isolant d'emmagasiner l'énergie électrostatique lorsqu'il est soumis à un champ électrique .

Habituellement on utilise la permittivité relative  $\epsilon_r$  .

$\epsilon_r$  est le rapport de la capacité  $C$  d'un condensateur construit avec l'isolant en question comme diélectrique , à celle  $C_0$  qu'aurait ce même condensateur si le diélectrique était remplacé par le vide :

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0}$$

$$C = \frac{\epsilon s}{e} \Rightarrow \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{s}{e}$$

$s$  : surface du condensateur .

$e$  : épaisseur du diélectrique .

$\epsilon$  : permittivité absolue du diélectrique .

$\epsilon_0$  : permittivité absolue du vide .

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36} \cdot 10^{-9} \text{ F / m } .$$

La permittivité relative de la plupart des matériaux isolants se situe entre 2 et 10 .

La détermination de  $\epsilon_r$  est connue par la mesure de la capacité de l'échantillon à l'aide du même pont **TEPTEX** ( figure 1 ) .

pour notre isolant , la permittivité relative des deux mélanges à température ambiante ( 20°C ) est de l'ordre de 3 .

### 1-3-3- Résistivité :

La mesure de la résistivité transversale est souvent effectuée pour contrôler l'homogénéité d'un matériau isolant , et cela soit pour déterminer l'uniformité de sa fabrication , soit pour déceler les impuretés susceptibles d'affecter la qualité du matériau .

La connaissance de la résistivité superficielle est importante lorsque la convenance d'un matériau pour une application donnée dépend surtout de ses propriétés de surface et notamment de sa résistance à l'humidité .

Les essais ont été réalisés conformément à la norme ( 1 ) .

### 1-3-3-1- Résistivité Transversale .

La résistivité transversale d'un matériau est le quotient du gradient de potentiel par la densité du courant qui s'établit dans le volume compris entre deux électrodes reposant sur chacune des deux faces de l'isolant .

Elle est calculée par la formule :  $\rho_t = \frac{R_t \cdot s}{e}$  .  
Dans laquelle  $s$  représente la surface efficace de l'éprouvette (  $20 \text{ cm}^2$  ),  
 $e$  et  $R_t$  étant respectivement l'épaisseur et la résistance transversale de l'échantillon .

La résistance  $R_t$  est mesurée à l'aide d'un multi - megohmmètre Wiss-Techn-Werkstaten , type MOM 11 relié à la cellule d'essais ( figure 2 ) .

Pour nos mesures , la tension appliquée était fixée à 500 V .  
La résistivité transversale de nos deux mélanges a été déterminée à la température ambiante  $20^\circ\text{c}$  et à la température maximale de service (  $90^\circ\text{c}$  ) .

\* A  $t = 20^\circ\text{c}$  on trouve :

$$- \rho_{t20} = 2,0 \cdot 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}^2 / \text{cm} \text{ pour le mélange laboratoire.}$$

$$- \rho_{t20} = 0,9 \cdot 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}^2 / \text{cm} \text{ pour le mélange industriel .}$$

\* A  $t = 90^\circ\text{c}$  on trouve :

$$- \rho_{t90} = 1,3 \cdot 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}^2 / \text{cm} \text{ pour le mélange laboratoire.}$$

$$- \rho_{t90} = 2,5 \cdot 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}^2 / \text{cm} \text{ pour le mélange industriel.}$$

Les valeurs obtenues sont conformes aux ordres de grandeurs normalisées ( 2 ) . Qui sont (  $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}^2 / \text{cm}$  à  $20^\circ\text{c}$  et  $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}^2 / \text{cm}$  à  $90^\circ\text{c}$  )



### 3.3.2. Résistivité superficielle :

La résistivité superficielle d'un matériau isolant est le quotient du gradient de potentiel parallèlement au courant, par le courant qui traverse l'unité de longueur de la surface comprise entre deux électrodes placées à la surface de l'isolant.

Elle est calculée par la formule :

$$C_s = \frac{R_s \cdot P}{g} \quad \text{ou} \quad \begin{array}{l} P, \text{ représente le périmètre moyen des électrodes} \\ g, \text{ la distance efficace entre les électrodes} \\ R_s, \text{ résistance superficielle.} \end{array}$$

La cellule d'essai utilisée pour la détermination de la résistance superficielle est représentée sur la figure 3.

Les mesures ont été effectuées dans les mêmes conditions que pour la résistivité transversale.

La résistivité superficielle mesurée à 20°C, est égale à 0,354  $\Omega \cdot \text{cm}$ .

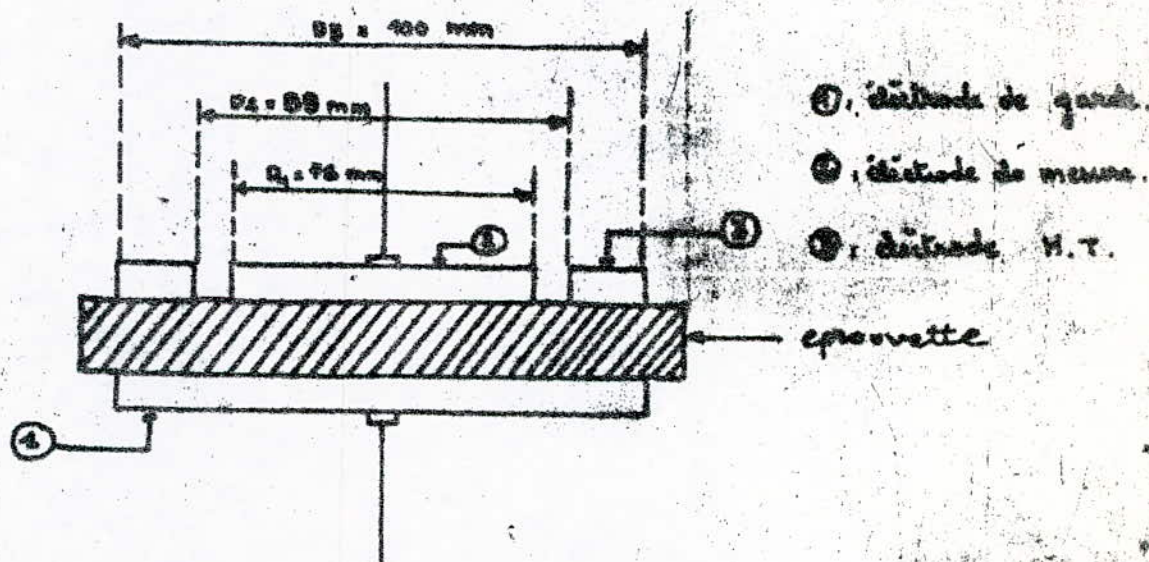


FIG 3 : Cellule d'essai pour la mesure de la résistivité superficielle.

#### 1-3-4- Rigidité diélectrique.

Il est d'importance primordiale que tout matériau destiné à être employé dans l'isolation moyenne et haute tension présente une rigidité diélectrique élevée.

Une rigidité diélectrique élevée et stable est nécessaire pour obtenir des câbles de dimensions et poids raisonnables, et pour assurer de bonnes conditions de service. Il est nécessaire que l'isolant résiste aux tensions de manœuvres et supporte les conditions de service de service sous une grande tension pendant de nombreuses années.

Pour la détermination de la rigidité diélectrique de notre isolant nous avons utilisé un spintermètre automatique BAUR OLPRUFGERAT type: PGO 90 A, équipé d'électrodes type ROGOWSKI. Avant d'atteindre la perforation de l'isolant, la tension s'élève automatiquement de 2 Kv par seconde. L'épaisseur "e" de l'éprouvette est déterminée à la fin de l'essai à l'aide d'un palmer.

La rigidité diélectrique est déterminée par le rapport  $U/e$ , U étant la tension de perforation de l'isolant.

Des différentes mesures effectuées, conformément à la norme (5), nous obtenons une rigidité diélectrique de 27 Kv/mm pour le mélange laboratoire, et 26 Kv/mm pour le mélange industriel.

Cet écart est certainement dû à la présence de corps étrangers qui se sont introduits dans le mélange industriel au cours de sa préparation.



#### 1-4- Influence de la température sur les caractéristiques électriques.

L'une des contraintes les plus importantes auxquelles est soumis l'isolant est, après la contrainte électrique, celle qui résulte des échauffements, à savoir l'élévation de la température.

De ce fait, nous étudions dans ce paragraphe, le comportement instantané de l'isolant sous l'influence de la température.

Le dispositif de mesures étant le même que précédemment (paragraphe 1-3), nous relierons seulement les plaques chauffantes du condensateur à anneau de garde à un régulateur de température TETTEX type 2965 qui nous permet de maintenir la température de mesure constante à  $(\pm 0,5)^\circ\text{C}$ .

Nous relevons la température à l'aide d'un pont à résistances de WHESTONE, TETTEX type 2105 C dont les deux électrodes de platine sont incorporées dans la cellule d'essais de part et d'autre de l'isolant.

Les résultats de mesures des différentes caractéristiques électriques sont présentés dans le tableau 1, page 18.

##### 1-4-1- Influence de la température sur le facteur de dissipation ( $\text{tg } \delta$ ).

Le facteur de dissipation de l'EPDM diminue lorsque sa température varie de la température ambiante jusqu'à  $50^\circ\text{C}$ , et augmente au delà de cette température. (figure 4).

En effet pour le mélange laboratoire, le facteur de dissipation mesuré à  $20^\circ$  (température ambiante) diminue de 25% lorsqu'il est mesuré à  $40^\circ\text{C}$  et reprend sa valeur initiale aux environs de  $70^\circ\text{C}$ .

Par contre pour le mélange industriel, la diminution du facteur de pertes est plus accentuée et son augmentation est moins rapide.

Lorsque la température passe de  $20^\circ$  à  $50^\circ\text{C}$  le facteur de perte diminue de 50% ; puis reprend sa valeur mesurée à  $20^\circ\text{C}$ , à une température voisine de  $100^\circ\text{C}$ .

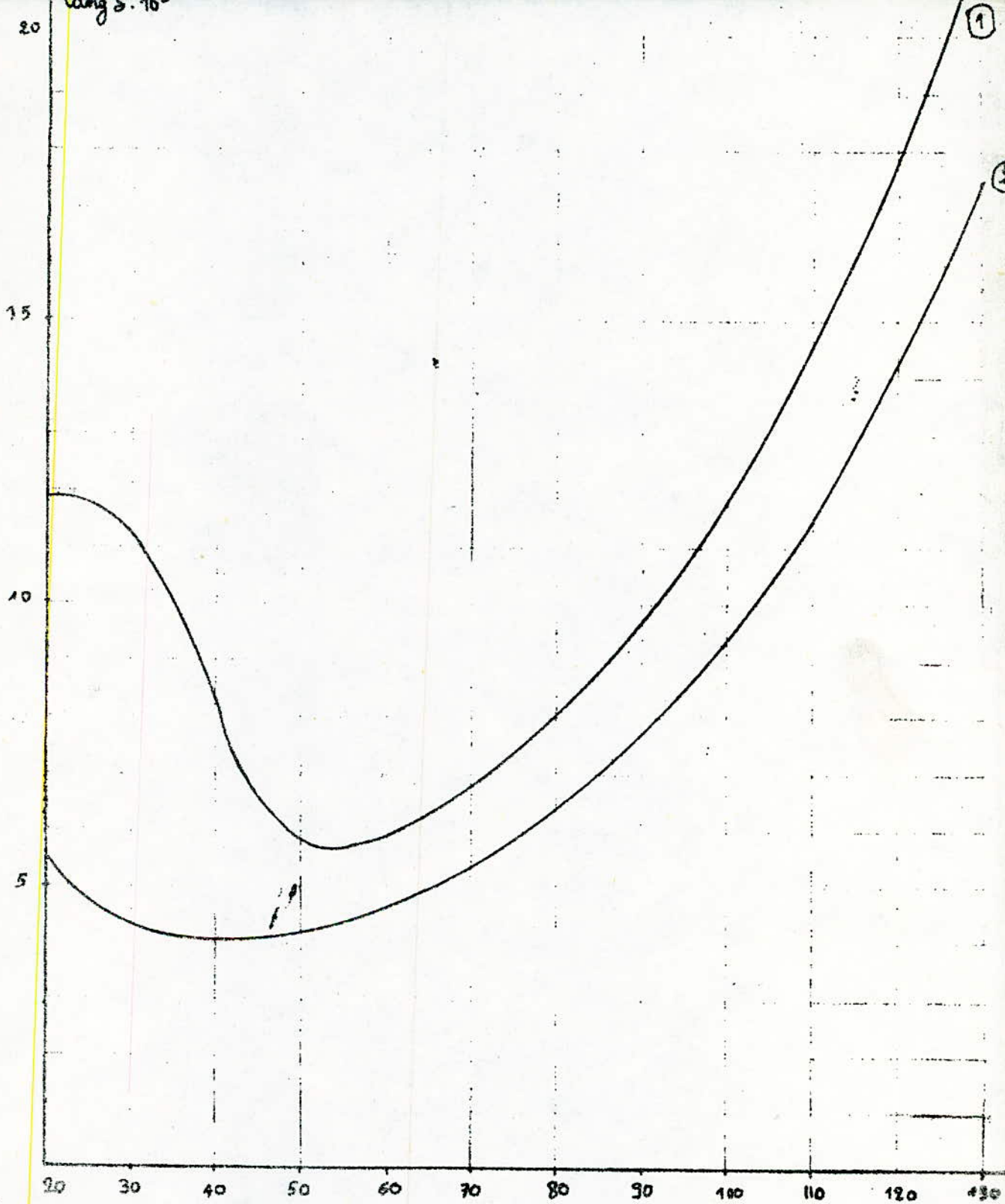


Fig-4: Variation du facteur de dissipation en fonction de la temperature.

(1) Melange industriel ,      (2): Melange laboratoire



La difference existant entre l'influence de la temperature sur les deux melanges peut s'expliquer par le phenomène de " post vulcanisation " qui s'opère sur le melange industriel , car il n'est pas préparé dans les mêmes conditions et avec les mêmes précautions que celles prises lors de la préparation du melange laboratoire .

Cependant quelque soit le melange le facteur de puissance , reste acceptable à la temperature maximale de service ( 90°C ) .

Si d'autres facteurs influençant les pertes dielectriques , tels que l'inclusion d'impuretés , vacuoles , ... N'interviendront pas lors de l'extrusion de l'EPDM sur cable , nous pouvons prévoir , pour des temperatures de fonctionnement comprises entre 20 et 100°C , que les pertes seraient minimales .

#### 1-4-2- Influence de la temperature sur la permittivité de l'EPDM .

La permittivité de l'EPDM diminue d'environ 10% sous l'influence d'une temperature variant de la temperature ambiante ( 20°C ) jusqu'à une temperature voisine de 100°C . ( figure 5 ) .

La constante dielectrique diminue sensiblement au debut du chauffage pour des temperatures augmentant jusqu'à 40°C pour le melange laboratoire , et jusqu'à 50°C pour le melange industriel . Cette diminution devient moins accentuée à partir de 100°C pour les deux melanges .

Au delà de 100°C , le chauffage n'influe plus sur la permittivité ; celle ci restant constante et egale à :

$$\epsilon_r = 2,74 \quad \text{pour le melange industriel .}$$

$$\epsilon_r = 2,64 \quad \text{pour le melange laboratoire .}$$

Initialement , à temperature ambiante ,  $\epsilon_r$  était de l'ordre de 3 .  
En conclusion , nous pouvons affirmer que le chauffage améliore le pouvoir inducteur de l'EPDM .

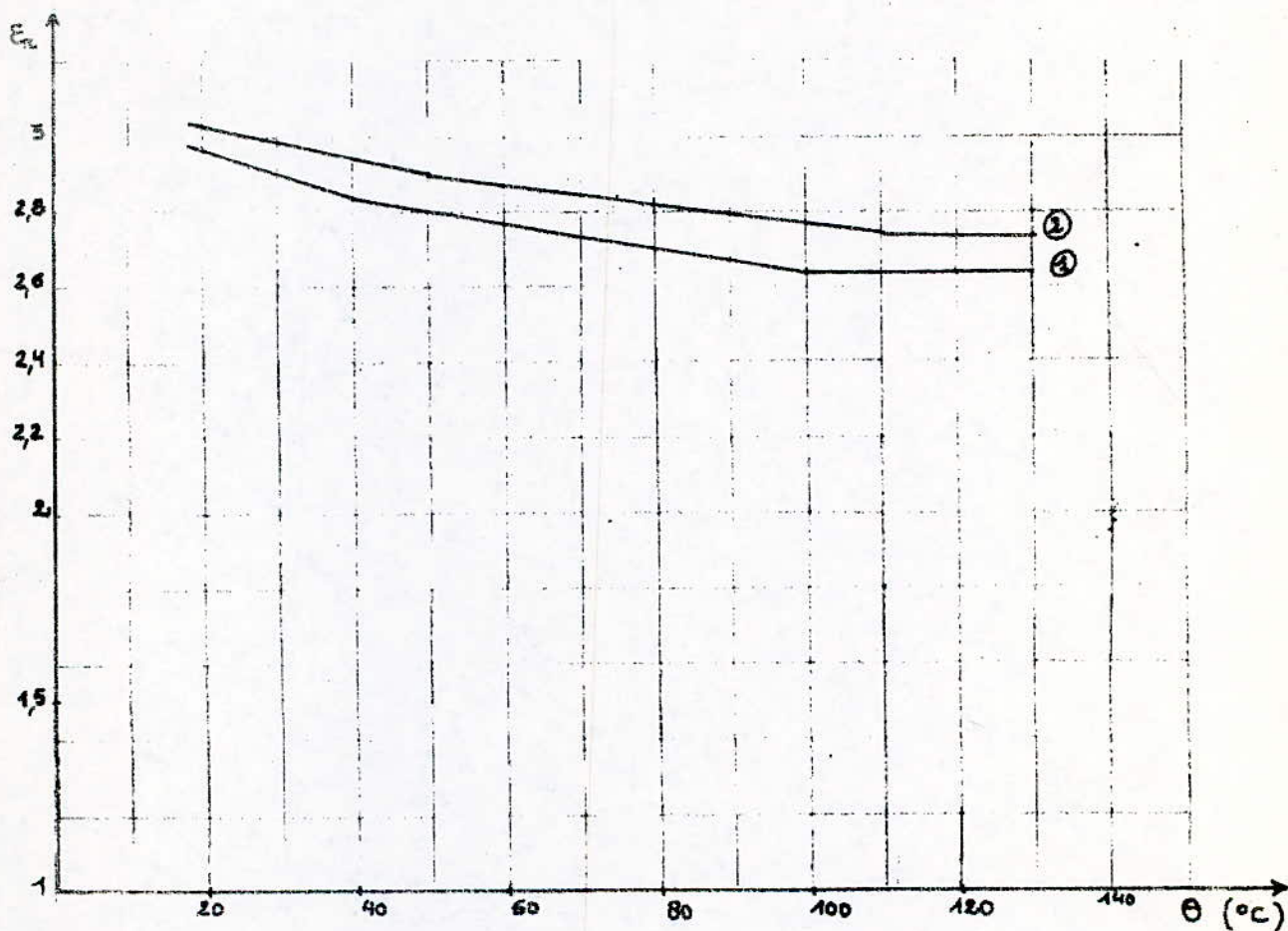


Fig-5: Variation de la permittivite de l'isolant en fonction de la temperature.

(1) : Melange laboratoire ;

(2) : Melange industriel .



1-4-3- Influence de la température sur la résistivité transversale de l'isolant.

La cellule de mesures utilisée est la même que celle décrite au paragraphe 1-3. Les résultats obtenus (figure 6), nous montrent que la résistivité transversale de l'E.P.D.M diminue quand la température augmente.

En effet, de  $2 \cdot 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}^2 / \text{cm}$  à  $20^\circ\text{C}$ , la résistivité devient égale à  $1,3 \cdot 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}^2 / \text{cm}$  à  $90^\circ\text{C}$  pour le mélange laboratoire; et de  $0,9 \cdot 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}^2 / \text{cm}$  à  $20^\circ\text{C}$ , elle devient égale à  $2,5 \cdot 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}^2 / \text{cm}$  à  $90^\circ\text{C}$  pour le mélange industriel. Cette variation reste néanmoins admissible conformément aux recommandations de la norme (2), qui donne les limites suivantes:

- $\rho = 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}^2 / \text{cm}$  à  $20^\circ\text{C}$
- $\rho = 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}^2 / \text{cm}$  à  $90^\circ\text{C}$ .

La tension restant constante, 500 V, lors de ces essais; d'après une étude similaire réalisée sur le polyéthylène (6), si aucun facteur n'intervient dans l'expression de la résistivité, nous pouvons conclure que la variation de la résistivité transversale de l'E.P.D.M en fonction de la température suit la loi :

$$\rho_t = \rho_{20} e^{-\alpha \theta}$$

- Avec :
- $\rho_t$  : résistivité de l'EPDM à une température  $\theta = t$  [ $\Omega \cdot \text{cm}^2 / \text{cm}$ ]
  - $\rho$  : " " " " à  $20^\circ\text{C}$ .
  - $\theta$  : variation de la température =  $t - 20$ .
  - $\alpha$  : coefficient de variation de la résistivité en fonction de la température.

$\alpha = 0,04$  pour le mélange laboratoire, et,  $0,05$  pour le mélange industriel.

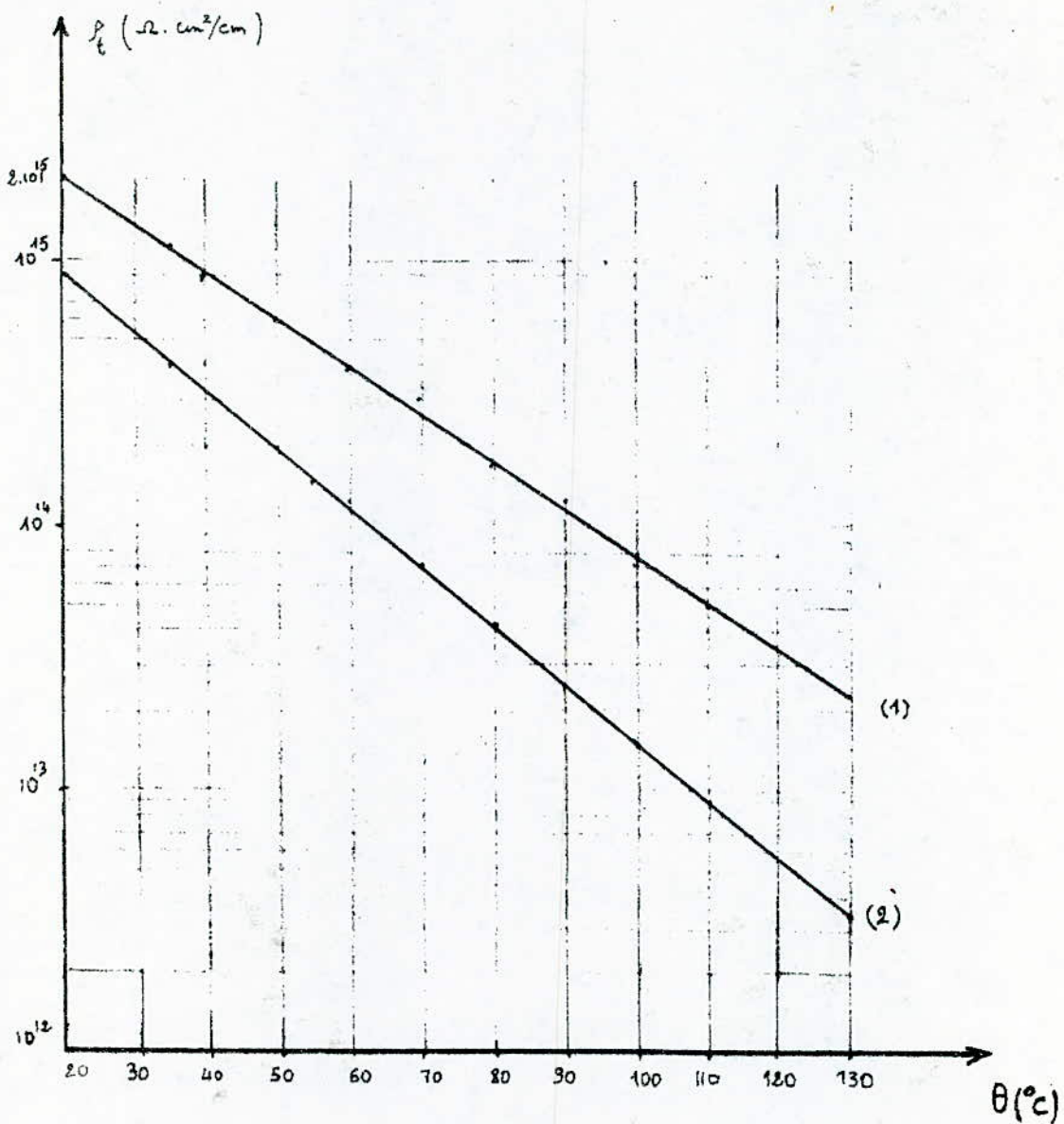


Fig-6: Variation de la resistivite en fonction de la temperature.

- (1): Melange laboratoire
- (2): Melange industriel.



| $\theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) | $\text{Tg } \delta \cdot 10^{-3}$ |      | $\epsilon_r$ |      | $C$ (pF) |       | $\rho$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2/\text{cm}$ ) |       |
|---------------------------------|-----------------------------------|------|--------------|------|----------|-------|-------------------------------------------------|-------|
|                                 | (1)                               | (2)  | (1)          | (2)  | (1)      | (2)   | (1)                                             | (2)   |
| 20                              | 5,5                               | 11,9 | 2,96         | 3,04 | 24,04    | 23,40 | 2                                               | 0,95  |
| 30                              | 4,3                               | 11,2 | 2,90         | 2,98 | 23,55    | 22,94 | 1,4                                             | 0,50  |
| 40                              | 4,0                               | 8,3  | 2,84         | 2,94 | 23,07    | 22,65 | 0,9                                             | 0,32  |
| 50                              | 4,1                               | 5,8  | 2,80         | 2,90 | 22,74    | 22,34 | 0,6                                             | 0,21  |
| 55                              | 4,3                               | 5,7  | 2,78         | 2,88 | 22,60    | 22,18 | 0,50                                            | 0,15  |
| 60                              | 4,5                               | 5,9  | 2,76         | 2,86 | 22,42    | 22,03 | 0,40                                            | 0,12  |
| 70                              | 5,4                               | 6,8  | 2,74         | 2,84 | 22,26    | 21,88 | 0,3                                             | 0,07  |
| 80                              | 6,4                               | 8,0  | 2,70         | 2,82 | 21,93    | 21,72 | 0,18                                            | 0,04  |
| 85                              | 7,0                               | 8,8  | 2,68         | 2,81 | 21,77    | 21,64 | 0,15                                            | 0,03  |
| 90                              | 7,7                               | 9,6  | 2,66         | 2,80 | 21,60    | 21,57 | 0,13                                            | 0,025 |
| 95                              | 8,5                               | 10,6 | 2,65         | 2,78 | 21,52    | 21,42 | 0,09                                            | 0,018 |
| 100                             | 9,3                               | 11,8 | 2,64         | 2,76 | 21,45    | 21,26 | 0,07                                            | 0,015 |
| 110                             | 11,4                              | 14,5 | 2,64         | 2,74 | 21,45    | 21,11 | 0,05                                            | 0,009 |
| 120                             | 14,1                              | 17,7 | 2,64         | 2,74 | 21,455   | 21,11 | 0,03                                            | 0,006 |
| 130                             | 17,5                              | 21,0 | 2,64         | 2,74 | 21,45    | 21,11 | 0,02                                            | 0,004 |

Tableau 1 : Resultats de mesures des differentes caracteristiques électriques à différentes températures.

(1) : Melange laboratoire

(2) : Melange industriel

Taille de l'échantillon pour chaque mesure : " 5 "

Tension de mesure :

- 2 KV (  $E_{\text{moyen}} = 1 \text{ KV/mm}$  ) pour :  $\text{tg } \delta$  ,  $C$  ,  $r$  .

- 500 V (DC) . pour les mesures de  $\rho$  .

## 1-5- Propriétés mécaniques.

Dans de nombreux cas , les defaillances élèctriques sont initiées par des defaillances d'ordre mécanique.

Les caracteristiques mecaniques de l'isolant doivent etre suffisantes afin qu'il supporte sans defaillance les diverses contraintes mecaniques rencontrées en service ( pliage , dilatation , choc thermique ...).

Nous procedons à cette verification par des essais qui consistent à rompre par traction , à l'aide d'un dynamometre , plusieurs éprouvettes de notre iso-  
-lant conformement à la norme (1).

Les caracteristiques mecaniques que nous determinons sont :

- La resistance à la traction obtenue par le rapport de la charge de rupture à la section de l'éprouvette, exprimée en  $N/cm^2$ .
- L'allongement à la rupture mesuré entre deux points distants ini-  
-tialement d'une longueur donnée, exprimée en % de cette distance.

Les essais sont effectués avant et apres vieillissement des eprouvettes. Les resultats obtenus ( tableau 2 ) , nous montrent que notre isolant a de bonnes caracteristiques mecaniques .

Les valeurs minimales recommandées dans la norme (2), avant vieillissement  $4,2 N/m^2$  pour la resistance à la traction et 200 % pour l'allongement à la rup-  
-ture ), sont largement depassées et atteignent le double sur l'echantillon  
laboratoire.

L'influence de vieillissement sur les caracteristiques mecaniques de l'isolant n'est pas importante car la plus grande variation obtenue est de 17 %, bien qu'une variation de 30 % soit admise par la norme .



|                                                     | nature du mélange |            |
|-----------------------------------------------------|-------------------|------------|
|                                                     | laboratoire       | industriel |
| <u>1- Sans vieillissement:</u>                      |                   |            |
| - Résistance à la traction $N/m^2$                  | 8,1               | 11,5       |
| - Allongement à la rupture (%)                      | 480               | 292        |
| <u>2- Après vieillissement en étuve à air :</u>     |                   |            |
| Après un traitement de 7 jours à 135°C              |                   |            |
| - Résistance à la traction                          | 8                 | 11,4       |
| - Allongement à la rupture                          | 408               | 283        |
| <u>3- Après vieillissement dans la bombe à air:</u> |                   |            |
| Après un traitement de 40 heures à 127°C            |                   |            |
| - Résistance à la traction                          | 7                 | 11,9       |
| - Allongement à la rupture                          | 400               | 242        |

Tableau 2: Caractéristiques mécaniques de l'EPDM avant et après vieillissement

1-6- Vieillissement thermique.

L'exposition à la chaleur provoque des modifications diverses des propriétés électriques et mécaniques de l'isolant. Une dégradation progressive au cours du temps, des propriétés de notre isolant peut affecter à long terme son comportement.

Afin de déterminer l'endurance thermique de l'EPDM, nous avons exposé plusieurs échantillons dans des étuves à circulation d'air chaud à différentes températures (90°C, 120°C, et 135°C), conformément aux recommandations de la norme (7).

#### 1-6-1- Influence du vieillissement sur le facteur de dissipation.

En fonction des différents temps d'exposition à la chaleur (tableau 3), les résultats de mesures nous montrent, que contrairement à ce que l'on pourrait prévoir; le vieillissement thermique engendre une diminution du facteur de dissipation de l'E.P.D.M, donc amélioration de sa qualité.

En effet, sa permittivité restant constante, de l'ordre de 2,7, nous pouvons conclure que les pertes diélectriques ne font que diminuer et ce jusqu'à un vieillissement de 1500 heures, au-delà duquel elles restent constante jusqu'à 2000 heures (figure 7).

Lors du vieillissement à 135°C,  $\text{tg } \delta$  passe de  $16,8 \cdot 10^{-3}$  après 50 heures de vieillissement, à  $12,5 \cdot 10^{-3}$  à 1500 heures de vieillissement soit une diminution de 25%.

Pour les échantillons exposés à 120°C, le facteur de dissipation passe de  $11,7 \cdot 10^{-3}$  à  $9,2 \cdot 10^{-3}$  mesuré respectivement après 50 et 1500 heures de vieillissement; soit une diminution de 21%.

Lors du vieillissement à 90°C, température maximale de service d'un câble isolé à l'E.P.D.M et, fonctionnant à 100% de sa charge;  $\text{tg } \delta$  passe de  $6,9 \cdot 10^{-3}$  à  $5,6 \cdot 10^{-3}$  mesuré respectivement après 50 et 1500 heures de vieillissement, soit une diminution de 18%.

#### 1-6-2- Variation du facteur de dissipation en fonction de la température, après vieillissement.

Pour différents échantillons exposés à la chaleur pendant des temps variant de 50 à 2000 heures d'exposition à la chaleur (90°C, 120°C et 135°C), nous avons effectué le même type d'essai que celui décrit au paragraphe 1-4-1.

Les résultats obtenus (figure 8), nous montrent que l'influence de la température sur le facteur de dissipation reste la même qu'avant vieillissement; nous obtenons la même allure, cependant avec une diminution de 25% en moyenne de  $\text{tg } \delta$ . Donc amélioration de la qualité de l'isolant.



Eg 5  
(10<sup>3</sup>)

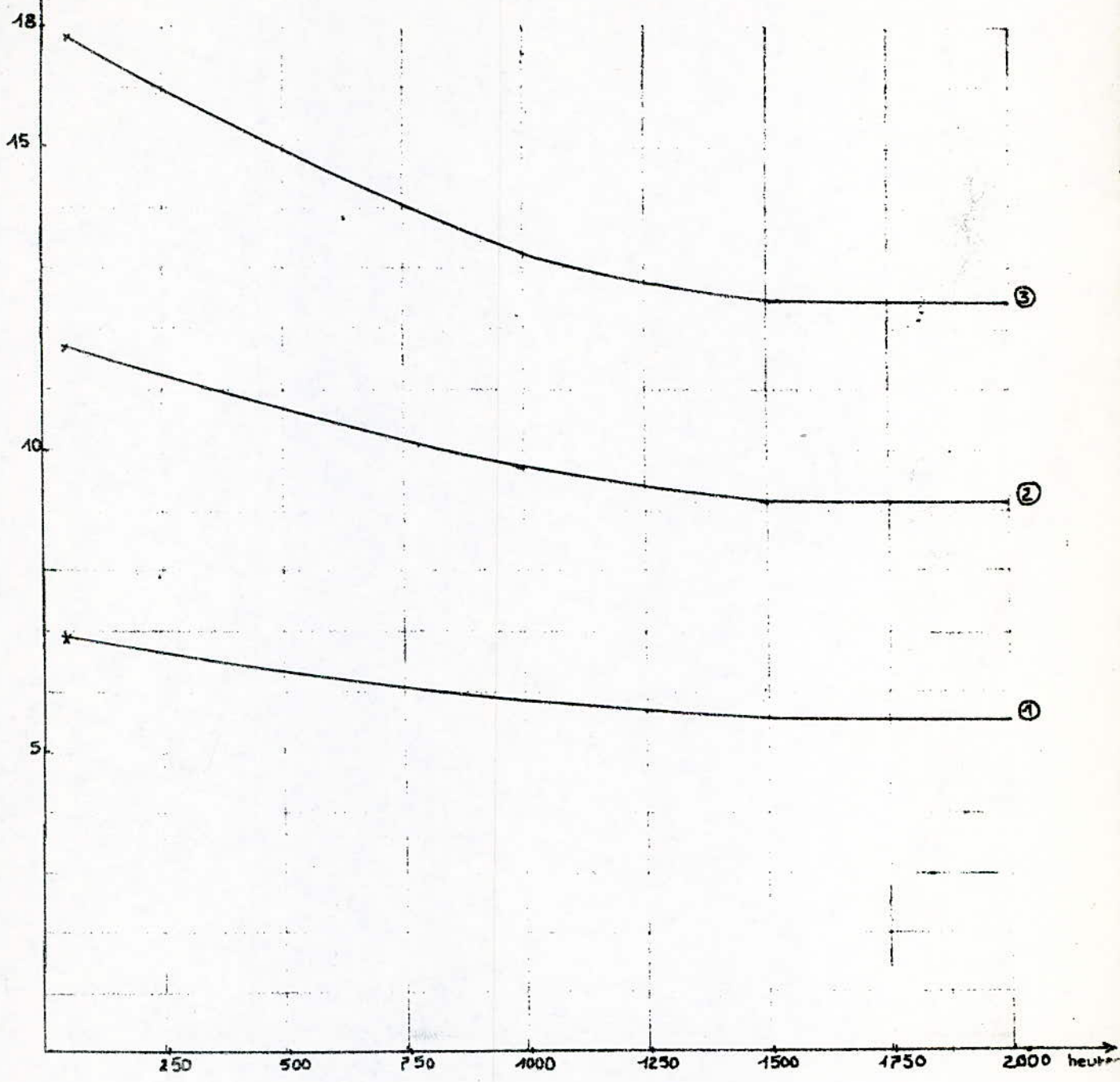


Fig-7: Variation du facteur de dissipation en fonction du temps de vieillissement

- (1) A temperature constante ( 90 )°C
- (2) " " " " " ( 120 )°C
- (3) " " " " " ( 135 )°C .

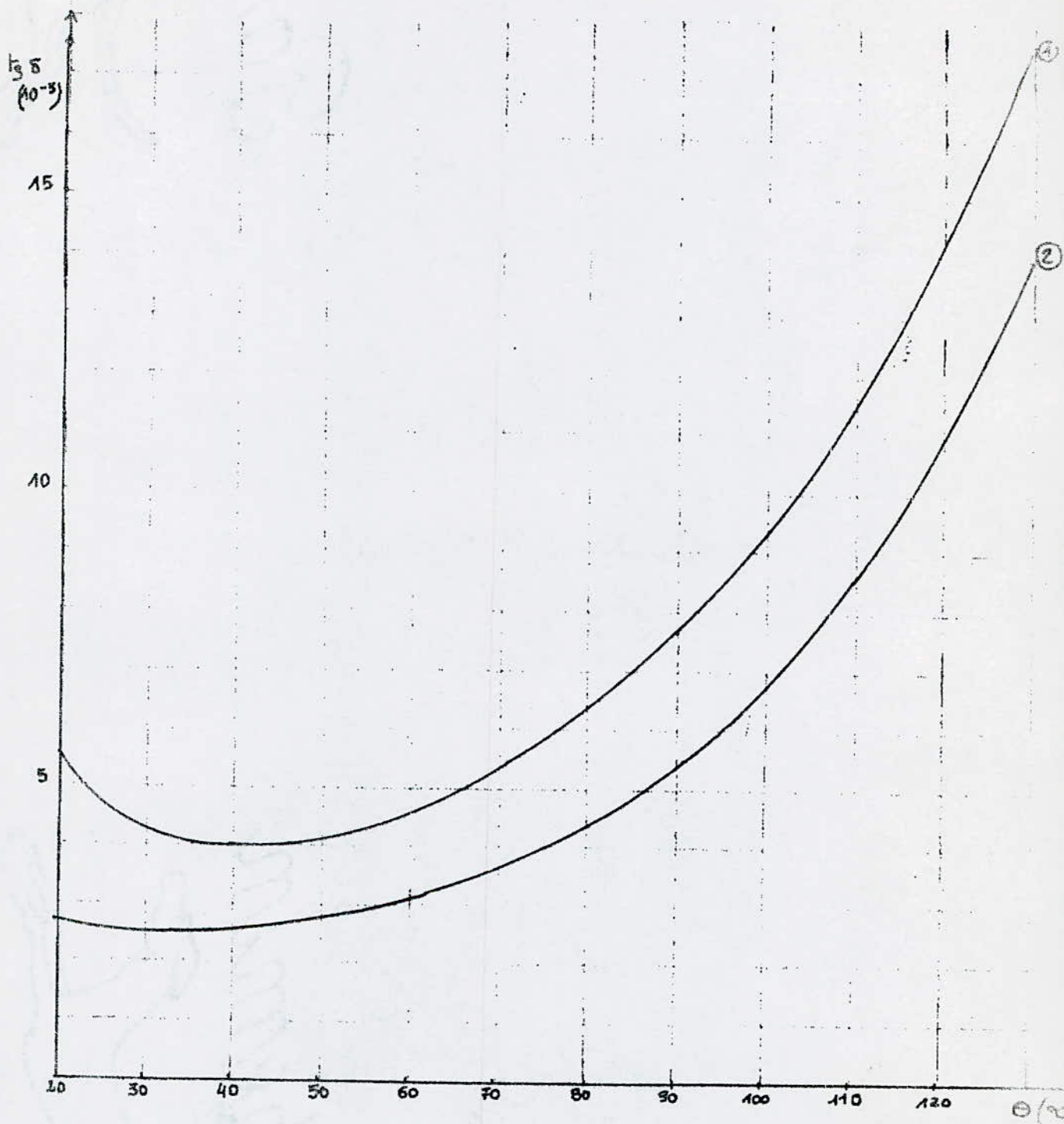


Fig-8: Variation du facteur de dissipation en fonction de la temperature, apres vieillissement de 1000 heures; à (90)°c, (120)°c, ou (135)°c

- (1) Avant vieillissement,
- (2) Apres vieillissement.



En effet , mesure à temperature ambiante ,  $\text{tg } \delta$  passe de  $5,5 \cdot 10^{-3}$  à avant vieillissement , à  $2,7 \cdot 10^{-3}$  apres vieillissement. A temperature maximale de service du cable,  $90^\circ\text{c}$ ,  $\text{tg } \delta$  passe de  $7,7 \cdot 10^{-3}$  avant vieillissement, à  $5,4 \cdot 10^{-3}$  apres vieillissement .

### 1-6-3- Influence du vieillissement sur la resistivité de l'isolant.

Jusqu' à 2000 heures d'exposition à la chaleur, le vieillissement thermique engendre une diminution de 80% en moyenne de la resistivité de l'EPDM ( tableau 3 ), pour les trois temperatures choisies.

Cette variation reste acceptable , car à temperature maximale de service de l'isolant ( $90^\circ\text{c}$ ), la resistivité est de  $14 \cdot 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}^2 / \text{cm}$ ; la valeur minimale admise (2) etant de l'ordre de  $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}^2 / \text{cm}$  .

DE la figure 9, nous deduisons la loi de variation de la resistivité en fonction du temps d'exposition à la chaleur :

$$\rho_t = \rho_{50} \cdot e^{-\lambda (t - 50)}$$

$\rho_t$  : Resistivité transversale de l'EPDM apres exposition à  $90^\circ\text{c}$  pendant un temps  $t$  compris entre 50 et 2000 heures .

$\lambda$  : Coefficient de variation de la resistivite en fonction du temps de vieillissement, (à  $90^\circ\text{c}$ ),  $\lambda = 9,5 \cdot 10^{-4} (\text{heures})^{-1}$ .

$\rho_{50}$  : Resistivité transversale mesurée apres 50 heures de vieillissement à  $90^\circ\text{c}$ .  $\rho_{50} = 9 \cdot 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}^2 / \text{cm}$  ;

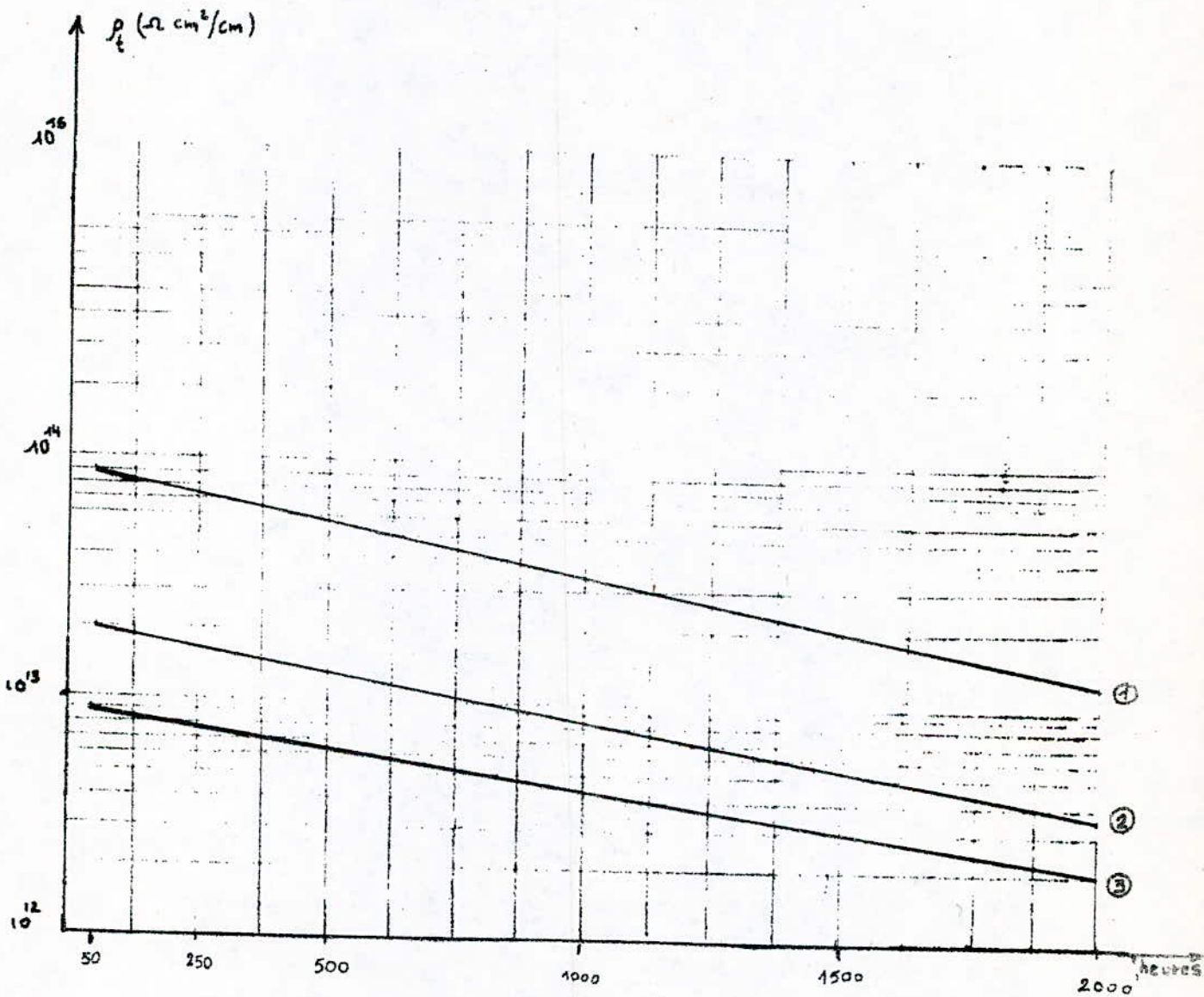


Fig-9; Influence du vieillissement thermique sur la resistivite de l'EPDM .

- (1): Vieillissement à 90°C
- (2): " " à 120°C
- (3): " " à 135°C,



| Durée<br>(heures) | Vieillessement à 90°C |              |                                     |                          | Vieillessement à 120°C |              |                                     |                          | Vieillessement à 135°C |              |                                     |                          |
|-------------------|-----------------------|--------------|-------------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------|-------------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------|-------------------------------------|--------------------------|
|                   | C (pF)                | $\epsilon_r$ | $\rho(10^{13} \frac{1}{\text{cm}})$ | $\text{tg} \delta(10^3)$ | C (pF)                 | $\epsilon_r$ | $\rho(10^{13} \frac{1}{\text{cm}})$ | $\text{tg} \delta(10^3)$ | C (pF)                 | $\epsilon_r$ | $\rho(10^{13} \frac{1}{\text{cm}})$ | $\text{tg} \delta(10^3)$ |
| 50                | 22,47                 | 2,74         | 9,0                                 | 6,9                      | 23,16                  | 2,72         | 2,0                                 | 11,7                     | 22,8                   | 2,7          | 0,9                                 | 16,8                     |
| 150               | 22,17                 | 2,71         | 8,0                                 | 6,7                      | 23,08                  | 2,71         | 1,9                                 | 11,5                     | 22,95                  | 2,72         | 0,82                                | 16,4                     |
| 250               | 22,31                 | 2,72         | 7,1                                 | 6,6                      | 23,0                   | 2,70         | 1,6                                 | 11,2                     | 22,86                  | 2,71         | 0,75                                | 15,9                     |
| 500               | 22,15                 | 2,70         | 5,6                                 | 6,3                      | 23,08                  | 2,71         | 1,4                                 | 10,6                     | 22,86                  | 2,71         | 0,63                                | 14,9                     |
| 750               | 22,06                 | 2,69         | 4,2                                 | 6,0                      | 23,0                   | 2,70         | 1,1                                 | 10,2                     | 22,70                  | 2,69         | 0,52                                | 14,0                     |
| 900               | 22,15                 | 2,70         | 3,8                                 | 5,9                      | 23,25                  | 2,73         | 0,9                                 | 9,9                      | 22,86                  | 2,71         | 0,47                                | 13,5                     |
| 1000              | 22,15                 | 2,70         | 3,2                                 | 5,8                      | 23,0                   | 2,70         | 0,82                                | 9,8                      | 22,80                  | 2,70         | 0,43                                | 13,2                     |
| 1250              | 22,15                 | 2,70         | 2,7                                 | 5,7                      | 23,08                  | 2,71         | 0,7                                 | 9,4                      | 22,95                  | 2,72         | 0,36                                | 12,8                     |
| 1500              | 22,17                 | 2,71         | 2,0                                 | 5,6                      | 23,08                  | 2,71         | 0,53                                | 9,2                      | 22,80                  | 2,70         | 0,30                                | 12,5                     |
| 2000              | 22,15                 | 2,70         | 1,4                                 | 5,6                      | 23,0                   | 2,70         | 0,36                                | 9,2                      | 22,86                  | 2,71         | 0,21                                | 12,5                     |

Tableau 3 : Influence du vieillissement thermique sur les caractéristiques électriques .

#### 1-6-4- Influence du vieillissement thermique sur les caractéristiques mécaniques.

Le but de cet essai est de vérifier l'influence du vieillissement thermique sur les propriétés mécaniques de notre isolant. Notamment sa résistance à la traction et son allongement à la rupture.

L'essai consiste à placer des échantillons dans une étuve à 100°C, pour différents temps de vieillissement, on procède à la rupture des différentes éprouvettes après 16 heures de refroidissement, (tel que décrit au paragraphe 1-5)

Après 2000 heures d'exposition à la chaleur, nous avons constaté que le vieillissement thermique, à 100°C, n'influe pas sur les propriétés mécaniques de l'E.P.D.M. En effet, la plus grande variation obtenue est celle de l'allongement à la rupture qui est de 0,5% ; il passe de 4,17% avant vieillissement, à 367% après vieillissement. La résistance à la traction reste constante et égale à 7,5 N/cm<sup>2</sup>.

#### 1-7- Remarques .

De l'étude réalisée sur les deux types de mélange, il ressort clairement que le mélange laboratoire est beaucoup plus performant que le mélange industriel. Cet écart est dû à la présence de corps étrangers qui sont introduits dans l'E.P.D.M au cours des diverses manipulations de convoyage, stockage, extrusion ...

Les différents essais nécessitant un grand nombre d'échantillons; nous avons constaté pour un des mélanges, l'apparition de petits "points noirs" lors du vieillissement thermique. Ces impuretés migrent du mélange à partir de 800 heures.

Un long vieillissement naturel, à l'air libre, des éprouvettes provenant de ce mélange, nous a permis de constater le même phénomène; ce qui nous permet d'affirmer que la chaleur ne fait qu'accélérer ce processus.

La mesure de la résistance superficielle et notamment transversale, nous a permis de constater que ces particules ne sont pas métalliques. Ceux sont probablement des résidus d'autres mélanges, qui sont préchauffés dans le même malaxeur à rouleaux; d'où la nécessité de nettoyage correct de ce dernier avant toute manipulation.



Generalites :

Les qualités mécaniques , électriques et surtout diélectriques du câble sont essentiellement liées . au bon choix des différents matériaux utilisés dans sa fabrication .

Une bonne partie des défaillances qui surviennent durant l'exploitation , résulte de la mauvaise qualité d'un ou plusieurs constituants du câble .

Nous présentons dans ce chapitre les principales propriétés et caractéristiques des constituants du câble ainsi que leur dimensionnement .

2-1- Choix de la tension .

La tension spécifiée d'un câble est donnée sous la forme  $U_0/U$  ; où  $U_0$  désigne la tension entre l'ame conductrice et un potentiel de référence ( écran ou terre ) ; et  $U$  désigne la tension entre ames de deux conducteurs de phases .

Pour notre câble  $U_0 = 18 \text{ KV}$  ,  $U = 30 \text{ KV}$

Le choix de la tension spécifiée d'un câble est fonction des différentes considérations suivantes :

- Le type de câble retenu : câble à champ radial , ou non .
- La tension nominale de l'installation : la valeur de  $U$  doit être en principe supérieure ou égale à la tension nominale de l'installation à laquelle le câble est destinée .
- Les surtensions : Le choix de la tension spécifiée doit tenir compte des surtensions susceptibles d'affecter l'installation étudiée et dont l'origine peut être due à :
  - Un phénomène atmosphérique ( transmis par l'intermédiaire des lignes aériennes )

- Un défaut d'isolement avec des installations de tension nominale supérieure.

- Des manoeuvres d'appareillage.

- Des phénomènes de résonance.

## 2-2- L'âme conductrice .

Elle se caractérise par la nature du métal conducteur, sa section nominale et sa constitution. De ces caractéristiques dépendra la souplesse et la résistance ohmique du conducteur; d'où la capacité de transport du câble .

### 2-2-1- Nature du métal conducteur .

Le cuivre et l'aluminium sont les principaux métaux utilisés dans l'industrie des câbles électriques.

Les meilleures propriétés physiques du cuivre, sa conductivité plus élevée, et sa plus grande disponibilité par rapport à l'aluminium; ont conduit dans le passé, les producteurs de câbles, à une plus grande utilisation du cuivre .

Actuellement, pour des raisons économiques, les producteurs internationaux utilisent beaucoup plus l'aluminium ; ( annexe 1 ) .

Comme le choix de la nature du métal conducteur dépend beaucoup plus de l'utilisateur que du producteur, la SONELEC continue à utiliser le cuivre en moyenne tension .

Le cuivre recuit qui constitue l'âme conductrice du câble possède les caractéristiques suivantes :

|                                                                        |                                         |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| - Degré de pureté .....                                                | 99,8 (%)                                |
| - Résistivité à 20°C .....                                             | 17,241 ( mm <sup>2</sup> /mm )          |
| - Coefficient de variation de la résistivité avec la température ..... | 3,93.10 <sup>-3</sup>                   |
| - Coefficient de dilatation linéaire à 20°C ....                       | 17.10 <sup>-6</sup> (°C <sup>-1</sup> ) |
| - Densité à 20°C .....                                                 | 8,99                                    |
| - Charge de rupture .....                                              | 22 à 25 (Kg/mm <sup>2</sup> )           |
| - Allongement à la rupture .....                                       | 20 à 40 (%)                             |



## 2-2-2- Choix de la section .

Le choix de la section de l'âme est un des problèmes essentiels que pose la détermination de toute liaison électrique. Il s'agit en effet d'établir le meilleur compromis possible entre de nombreuses considérations dont les principales sont :

- D'ordre technique: Impératifs de fonctionnement de la liaison, sur le plan électrique, technique et parfois mécanique .
- D'ordre économique: Minimisation du coût global de l'installation.
- Relatives aux conditions d'installation .

Notre étude étant essentiellement basée sur la possibilité d'utilisation de l'E.P.D.M en moyenne tension, et non le dimensionnement d'une installation électrique; nous avons donc choisi une section normalisée de  $50 \text{ mm}^2$ . Cependant nous présentons la marche à suivre pour le choix de la section du pont de vue électrique et thermique qui consiste à :

- \* Déterminer l'intensité à transporter en fonction des caractéristiques des récepteurs à alimenter.
- \* Déterminer les sections minimales permettant de respecter les conditions d'échauffement de l'âme en tenant compte de l'échauffement permis par l'isolant dans les cas suivants :
  - Régime normal.
  - " variable .
  - " de court-circuit.

On retiendra la plus forte des sections ainsi déterminées .

### 2-2-3- Constitution de l'âme .

L'âme conductrice est constituée à partir d'un fil central, autour duquel sont enroulés des fils de même diamètre en couches successives, alternativement dans un sens et dans l'autre, suivant des hélices à pas long.

Les sections nominales des âmes conductrices sont définies et réparties en six classes dans l'ordre de souplesse croissante .

Les sections ainsi définies ne constituent pas des valeurs géométriques strictes. C'est, en effet, la valeur de la résistance linéique de l'âme en courant continu, à 20°C, qui est imposée en fonction de la section nominale, de la classe de souplesse envisagée, et du nombre de brins.

L'âme conductrice de notre câble, sera constituée de 19 brins, de classe 2, répartis comme suit :

- Un brin central .
- Une première couche de six brins .
- Une deuxième couche de douze brins .

Le diamètre totale de l'âme ainsi réalisée sera :  $D = 5 d$   
avec :  $d = 1,7 \text{ mm}$  ( diamètre d'un brin )

D'où  $D = 8,5 \text{ mm}$  .

### 2-3- Les écrans semi-conducteurs .

L'isolant des câbles secs moyenne tension à champ radial, est soumis à des contraintes électriques élevées que l'air ne pourrait supporter sans être ionisé. Il est donc nécessaire qu'aucune bulle d'air ne se trouve dans le champ électrique, soit au sein de l'isolant, soit en surface (entre l'isolant et le conducteur; ou l'isolant et l'écran métallique).



Pour les éviter on rend conductrices les surfaces internes et externes du diélectrique à l'aide de matériaux semis-conducteurs qui adhèrent à la surface isolante, et se déforment avec elle, au cours des enroulages et déroulages des cables .

Choix du semi-conducteur : :

Le rôle principal du semi conducteur est de maintenir la surface de l'isolant au même potentiel que le conducteur , et d'éviter en cas de mauvais contact ou de décollement , des décharges partielles qui provoqueraient à plus ou moins longue échéance la dégradation et le claquage de l'isolant .

Le choix d'un semi conducteur , sa résistance , son épaisseur et surtout son mode de pose (rubané ou extudé ) revêt donc une grande importance .

Les principales propriétés , que doit posséder l'écran semi conducteur sont :

- Une bonne adhérence à l'isolant .
- Souplesse
- Conductivité élevée .
- Homogénéité .
- Un bon comportement au vieillissement thermique .

Ces conditions seront mieux remplies avec l'utilisation d'un semi-conducteur extudé simultanément avec l'isolant .

Un mélange semi conducteur à base de matériau appartenant à la même famille que l'E.P.D.M et extudé simultanément avec lui ( donc très adhérent ) constituera le meilleur choix . D'autant plus que notre isolant possède les caractéristiques électriques qui répondent aux conditions imposées au semi conducteur ; A savoir bon vieillissement thermique et diminution de la résistivité en fonction du chauffage ( chapitre 1 ) .

Dés lors si un décollement se produit , il se fait entre le conducteur et l'induction semi conductrice , mais comme l'induction étant au même potentiel que le conducteur , le champ dans l'interstice ainsi formé sera nul

C'est du moins ce qui se passerait si l'enduction était parfaitement conductrice: d'où la nécessité d'avoir un semi-conducteur de faible résistivité .

Généralement le mélange d'un semi-conducteur extrudé est composé de 30 à 35% de noir de carbone et 70 à 75% du polymère de base constituant l'isolant .

La plage critique au-delà de laquelle un revêtement anti de charge risque de perdre son efficacité se situe entre  $10^6$  et  $10^8 \Omega/m$  ( 8 )

Ces valeurs correspondent à la résistance de l'enduction par mètre de câble .

Il s'agit donc de la résistance électrique longitudinale d'un tube cylindrique .

Par conséquent , la résistance du matériau employé n'intervient pas directement :

On pourra compenser une résistivité un peu trop forte par une épaisseur d'enduction plus grande , ou au contraire , en cas d'utilisation d'un matériau de faible résistivité , on pourra se contenter d'une enduction de très faible épaisseur .

#### 2-4- L'isolant :

La partie la plus déterminante et la plus délicate dans la construction d'un câble est l'isolation . Du choix de l'isolant et des soins apportés dans cette opération, dépendront les caractéristiques diélectriques du câble .

#### 2-4-1: Détermination de l'épaisseur de l'isolant :

La tension de service du câble ou d.d.p entre l'âme et l'écran métallique est limitée par la valeur maximum admissible de la contrainte du diélectrique , c'est à dire du champ électrique , ou point où cette valeur est la plus élevée .

Soit le conducteur suivant :

Où r:  $r_1$  désigne le rayon de l'âme  
 $r_2$  " " " de l'isolant





Appliquons une tension  $V$  entre l'âme et l'écran métallique .

Le gradient de potentiel en un point  $M$  de l'isolant supposé homogène est donné par l'expression :

$$E = \frac{V}{r \ln(r_2/r_1)} \quad \text{où } r \text{ est le rayon au point } M \text{ considéré .}$$

$$r_1 < r < r_2$$

Ce gradient est représenté par une fonction hyperbolique dont la valeur maximale a lieu pour  $r = r_1$  :

$$E_{\max} = \frac{V}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} .$$

La partie intérieure de l'isolant doit donc résister à ce gradient maximal pour assurer la bonne tenue en service du câble .

L'épaisseur nominale de l'enveloppe isolante est définie par la norme ( 2 ) , sa valeur est de 3 mm . Le câble aura ainsi les dimensions suivantes :

$$r_1 = 4,45 \text{ mm .}$$

$$r_2 = 12,5 \text{ mm .}$$

$$\text{d'où : } E_{\max} = \frac{18}{4,45 \cdot \ln \frac{12,5}{4,45}} = 3,92 \text{ KV / mm .}$$

Ce champ maximal représenté environ le sixième de la rigidité diélectrique de l'E.P.D.M , déterminée sur éprouvette ( chapitre 1 ) . Cette marge est suffisante pour permettre le fonctionnement du câble à ce gradient maximum . Néanmoins , comme d'après une étude réalisée sur un mélange E.P.D.M ( 9 ) le phénomène d'arborescence électrique prend naissance à partir d'un champ supérieur à 4 KV/mm ; il serait préférable d'utiliser notre isolant pour des sections plus grandes .

En effet, pour une section de  $70 \text{ mm}^2$  , le champ maximal sera :

$$E_{\max} = 3,6 \text{ KV. / mm .}$$

## 2-4.2- Influence du rayon de l'âme sur l'épaisseur de l'isolant :

Nous pouvons choisir un rayon  $r_1$  pour que le rayon  $r_2$  soit minimal pour la même valeur du champ admissible .

$$E_{\max} = \frac{V}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad r_2 = r_1 \cdot e^{V/r_1 E_{\max}} .$$

Le rayon  $r_2$  est minimal pour :  $r_2 = r_1 \cdot e$  d'où  $E_{\max} = \frac{V}{r_1}$  .

L'épaisseur de l'isolant correspondante est  $r_2 - r_1 = 1,718 r_1$  .  
on a ainsi le câble le plus économique .

$r_2$  étant fixe , si  $r_1$  augmente on tend vers un système plan - plan .

exemple : pour  $V = 18$  KV en prenant  $E_{\max} = 4$  KV /mm :

$$r_1 = \frac{18}{4} = 4,5 \text{ mm} .$$

$$\text{d'où } S_1 = 63,6 \text{ mm}^2 .$$

$$r_2 - r_1 = 7,73 \text{ mm} .$$

## 2-5- L'Ecran métallique :

La résistance longitudinale de l'écran semi-conducteur est très élevée et ne lui permet pas de véhiculer le courant capacitif . On le recouvre donc normalement par un feuillard de cuivre enroulé à recouvrement .

Cet écran est indispensable au moins à partir de 10 KV afin de supprimer une **ionisation** possible en surface de l'isolant . pour cela , l'écran doit être en très bon contact avec l'isolant .

En cas de défaut monophasé , l'écran doit permettre l'écoulement d'une partie ou la totalité du courant de court - circuit de l'installation .



Dans les réseaux de moyenne ou haute tension dont le neutre est relié à la terre directement ou par une faible impédance , le courant de défaut , peut prendre une valeur élevée dépendant de la puissance de la source , des caractéristiques de l'installation , du point de défaut et du réglage des dispositifs de protection . Il faut alors s'assurer que , sous l'effet de cette intensité , les températures maximales admises par les différents constituants du câble ne soient pas dépassées et , en particulier , la température maximale de l'isolant .

En effet , par suite de l'importance de la surface de contact de l'écran avec les milieux adjacents , la chaleur ne reste pas concentrée dans l'écran , mais se dissipe en grande partie vers l'extérieur. De ce fait , l'hypothèse d'un échauffement adiabatique conduirait à un échauffement supérieur à la réalité , ce qui reviendrait à un surdimensionner inutilement les écrans .

Pour notre câble , nous déterminons l'intensité du courant admissible en régime de court-circuit en fonction des dimensions de l'écran utilisé .

- Calcul de l'intensité du courant admissible en surcharge de très courte durée dans l'écran métallique .

Les dimensions de l'écran utilisé sont les suivantes:

- épaisseur .....  $e = 0,10$  mm
- largeur .....  $L = 30$  mm
- facteur de recouvrement .....  $\lambda = 25$  %
- rayon de courbure (sur câble) ...  $r = 10,8$  mm .

Nous déterminons l'intensité du courant admissible par la méthode de calcul proposée par la norme (9) .

L'hypothèse émise pour la détermination de ce courant est la suivante :

" L'écran **initialement** chauffé à  $70^{\circ}\text{C}$  est soumis à un court-circuit durant une seconde , d'intensité telle que l'échauffement en fin de surcharge ne dépasse pas la valeur prescrite qui est de  $120^{\circ}\text{C}$  . "

En dépit de cette hypothèse , on trouve une densité de courant  $\delta = 258 \text{ A/m}^2$  , soit un courant  $I = 1750 \text{ A}$  .

## 2-6- Gaine de protection .

Cette gaine a pour rôle de protéger le câble des différents phénomènes pouvant provoquer sa détérioration.

Une gaine de protection doit présenter une bonne tenue mécanique ainsi qu'une bonne résistance au vieillissement et aux intempéries. La qualité du matériau doit convenir à l'utilisation du câble et supporter sa température de service.

Notre échantillon de câble n'est pas muni d'une gaine de protection, mais généralement, la SONELEC emploie une gaine de protection en P.V.C (polychlorure de vinyle).

La gaine de protection peut être formée d'un mélange thermoplastique (P.V.C ; polyéthylène chlorosulfonné, ou matériaux analogues) ;

Les épaisseurs des gaines de protection sont données par la norme (10) en fonction du diamètre du câble avant gainage. D'après cette norme l'épaisseur de la gaine de notre câble doit être de 2,2 mm.

Si le câble doit fonctionner dans des conditions particulières, le choix de la gaine doit se faire en fonction de ces conditions. Ainsi nous présentons les caractéristiques essentielles des gaines de protection suivant les principaux matériaux utilisés.



\* Caractéristiques des gaines de protection suivant le matériau utilisé .

Polychlorure de vinyle ( P.V.C. )

- non propagation de la flamme .
- résistance élevée au vieillissement et à la chaleur .
- résistance exceptionnelle à l'ozone .
- résistance moyenne aux hydrocarbures , aux acides et aux bases.
- bonne résistance au déchirement .
- faible coefficient de frottement .
- rigidité mécanique fortement influencée par la température .
- fragilité aux basses températures .

Polyéthylène :

- légèreté
- très faible coefficient de frottement qui facilite le tirage des cables .
- absence de fragilité aux basses températures .
- bonne résistance au soleil et aux intempéries quand il est chargé de noir de carbone .

Polychloroprène :

Le polychloroprène convenablement traité et chargé de noir de carbone possède les qualités suivantes :

- Une bonne résistance
- à la lumière solaire et aux intempéries
  - à l'ozoné
  - à la chaleur et au froid
  - à la non propagation de la flamme .

Et une résistance moyenne

- aux huiles minérales
- aux solvants
- aux acides et aux hydrocarbures .

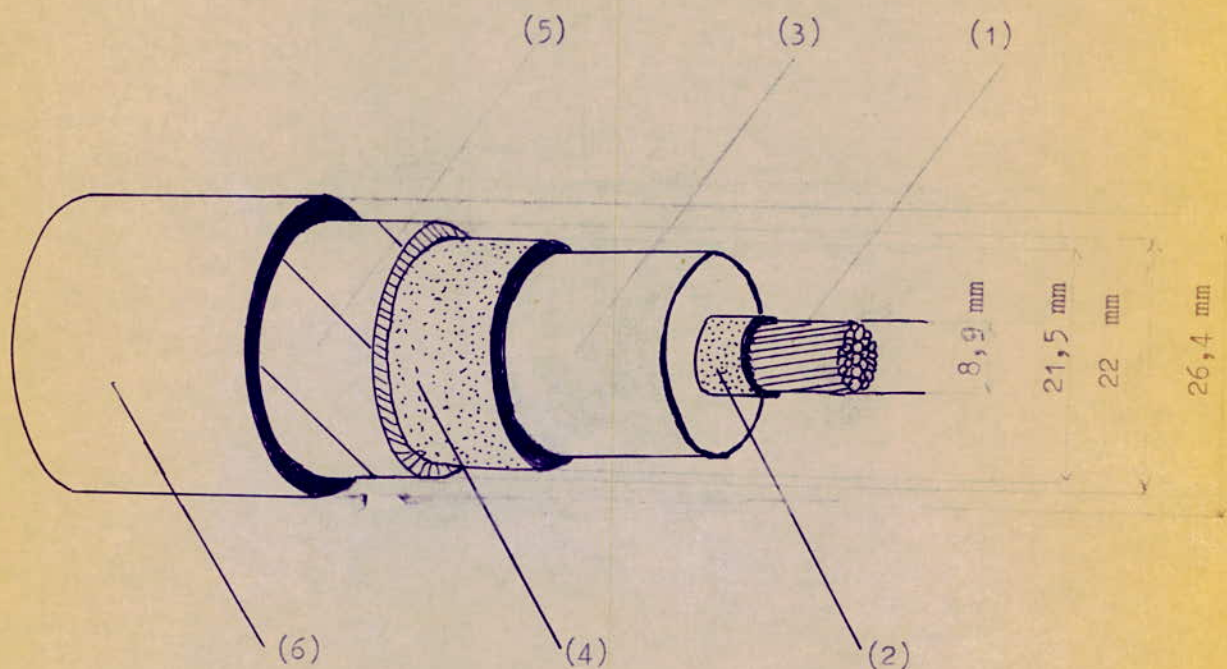


figure 10 Constituants du câble.

- (1) : Ame conductrice
- (2) : Ecran semi-conducteur sur ame.
- (3) : Isolant.
- (4) : Ecran semi-conducteur sur isolant.
- (5) : Ecran de cuivre.
- (6) : Gaine protectrice : P.C.V.



## Chapitre 3: //PROCESSUS DE FABRICATION DU CABLE//

### Généralités:

La fabrication d'un câble se compose de deux parties:

- la réalisation de l'âme conductrice
- l'isolation.

La réalisation de l'âme conductrice, consiste à obtenir un conducteur de dimensions et caractéristiques fixées, à partir d'un métal (le cuivre dans notre cas) auquel nous faisons subir plusieurs traitements et transformations.

L'isolation consistera à recouvrir l'âme conductrice d'une couche semi-conductrice sur laquelle nous extrudons l'isolant qui sera recouvert lui aussi d'un écran semi-conducteur.

Le câble unipolaire que nous fabriquons étant à champ radial, nous le rubanons d'un écran métallique en cuivre avant l'extrusion de la gaine de protection.

### 3.1 Réalisation de l'âme:

La réalisation de l'âme conductrice du câble comporte quatre opérations:

A la matière première, le cuivre, on fait subir un traitement thermique: le laminage, puis un traitement chimique: le decapage. Ces deux opérations terminées on procède au trefilage, puis au cablage du conducteur.

#### 3.1.1. le laminage:

C'est le traitement des linguots de cuivre pour les transformer en fil machine de 8mm de diamètre.

Le cuivre électrolytique à l'état pur est chauffé dans un four à 800°C jusqu'à l'état de déformation plastique.

IL passe ensuite à travers dix cages d'un degrossisseur puis dans un train de laminoir à cannelures. Après avoir traversé les 8 cages du train laminoir, le cuivre sort en fil de 8mm de diamètre pour être enroulé sous forme de bottes.

### 3.1.2. le decapage:

C'est le nettoyage, à grande eau et certains produits chimiques, des bottes de cuivres laminé.

Après le laminage à chaud et à l'air ambiant, le cuivre se recouvre d'une couche d'oxyde que l'on doit supprimer durant cette operation par les reactions chimiques suivantes:

- Bain d'acide sulfurique dilué
- lavage sous jet d'eau
- plongée dans une solution d'eau et de crème de tartre
- Bain de borax et d'eau: cette dernière operation, confere une protection à la surface du cuivre.

On obtient ainsi un fil prés à être trefilé.

Pour eviter des enfilages frequents sur les trefileuses, on soude bout à bout avec une soudeuse electrique les bottes de fil que l'on enroule ensuite sur bobine.

### 3.1.3. le trefilage:

Cette operation consiste à reduire le fil machine obtenu ( $\emptyset$  8mm) en fil de plus en plus fin.

Ceci est possible grâce à un effort de traction continu exercé sur le cuivre . Le metal s'ecoule à travers une orifice circulaire, appelée filiere, qui lui impose sa forme et sa dimension. Le fil machine sera ainsi transformé en fil de cablage après son passage sur une serie de filieres de diametres de plus en plus petits.



Nous transformons ainsi le fil machine en fil de câblage après avoir choisi les filières et la vitesse de trefilage suivant le diamètre que nous désirons obtenir.

La vitesse de trefilage est d'autant plus grande que le diamètre du fil à obtenir est faible. Pour le type de trefileuse employée à la cablerie la vitesse varie de 30m/S, pour un diamètre de 1,35mm, à 7m/S pour un diamètre de 3,22mm.

Afin de limiter au maximum l'usure des filières et préserver le cuivre de l'oxydation, on utilise un lubrifiant de bonne qualité au niveau de chaque filière. Car les opérations de traction, mises en jeu lors du trefilage, à des vitesses importantes, engendrent des pressions énormes.

Le fil trefilé subit un traitement thermique (recuit) qui abaisse sa dureté et lui confère une aptitude élevée au pliage et à la torsion. Cette opération est effectuée en traitement continu (ou au passage): le fil sort de la dernière filière et passe dans une enceinte à atmosphère contrôlée, où il est chauffé, puis refroidi à l'air comprimé avant de sortir de la trefileuse pour être bobiné et prêt à être câblé.

Nous obtenons ainsi un fil de 1,6mm de diamètre auquel l'opération de recuit a redonné sa malléabilité perdue durant le trefilage.

#### 3.1.4. le câblage:

Afin de conférer au conducteur la souplesse requise pour sa manipulation et son bon comportement en service, l'âme conductrice est réalisée par plusieurs brins toronnés formant ainsi un conducteur câblé.

Les brins sont cablés en couches régulières comprenant au total 1,7,19,37,61,127,...brins suivant la section à obtenir et le degré de souplesse exigé. Les diamètres des conducteurs correspondants sont  $d$ ,  $3d$ ,  $5d$ ,  $7d$ ,...  $d$  étant le diamètre d'un brin.

Pour réaliser le toron il est nécessaire de choisir un pas et un sens de câblage. Le choix du pas de câblage est motivé par le fait que:

- s'il est trop grand : il ya risque de separation des brins entre eux lors de l'enroulement ou déroulement du câble.
- s'il est trop petit la résistance du conducteur devient plus grande: la longueur réelle des brins devient alors supérieure à celle du câble.

On adopte en général un pas d'environ 12 à 18 fois le diamètre du conducteur. Afin de réduire la tendance au decâblage, il est nécessaire de donner aux différents couches un sens de câblage différent.

### 3.2. Rubanage des écrans semi-conducteurs.

Cette opération est réalisée sur une machine dite rubaneuse. Le semi-conducteur utilisé est un ruban de textile chargé de noir de carbone dont la résistivité est de  $100 \Omega \cdot \text{cm}$ . Le rubanage des semi-conducteurs doit être réalisé avec soin car un semi-conducteur peut adhérer à l'isolant ou peu souple se décollera au cours de sa mise sur touret de transport, ou au cours de son installation. Les vides qui prendront naissance seront le siège d'ionisation, et par conséquent, de claquages.



### 3.2.1. Rubanage de l'écran semi-conducteur sur l'âme conductrice:

L'âme conductrice étant réalisée, nous la recouvrons d'un ruban semi-conducteur de 0,1mm d'épaisseur et de 30mm de largeur, en hélice avec un facteur de recouvrement de 25%. Le rôle principal de cet écran est de corriger les distorsions du champ près des fils du conducteur là où le gradient est maximal.

Après cette opération, le câble est transporté vers un autre atelier où se fera l'extrusion et la vulcanisation de l'isolant.

### 3.2.2. Rubanage de l'écran semi-conducteur sur l'isolant/

Un deuxième écran semi-conducteur de mêmes caractéristiques est rubané sur l'isolant après l'opération de vulcanisation. Cette couche semi-conductrice a pour rôle, en plus d'homogénéiser le champ électrique au voisinage de l'écran métallique doit-il sera recouvert, de protéger l'isolant de toute pollution ultérieure.

### 3.3. Extrusion et vulcanisation de l'isolant:

Cette opération est essentielle dans la fabrication du câble dont les propriétés dépendront des soins apportés à son exécution.

#### 3.3.1: l'extrusion.

Dans une première phase, les divers constituants du mélange E.P.D.M. sont introduits dans un mélangeur interne sous une température de 120°C. L'amalgame obtenu est ensuite vidé dans un malaxeur où il obtient une certaine malléabilité. On obtient ainsi un mélange sous forme de bandes que l'on saupoudre de talc en attendant son extrusion.

Ces bandes, préalablement préchauffées à 80°C dans un malaxeur à rouleaux, sont introduites dans une boudineuse où s'effectuera l'extrusion de l'isolant.

La boudineuse comporte 3 zones:

- La zone d'alimentation, qui assure le transport de l'E.P.D.M. vers la zone de compression.
- La zone de compression et de fusion formée par la vis d'extrusion qui a pour rôle d'une part de comprimer l'isolant de façon qu'il soit exempt d'inclusions d'air et d'autre part d'effectuer la fusion des résines le constituant.
- La zone de pompage qui permet une bonne homogénéisation thermique et mécanique (malaxage, dispersion) du polymère fondu.

Le mélange, préparé sous une température de 90°C, sort de la boudineuse par une filière et s'écoule sur le conducteur qui est entraîné dans le tube de vulcanisation/

### 3.3.2. La vulcanisation de l'isolant:

Pour la plupart des cas, les caoutchoucs ont besoin d'être vulcanisés, c'est à dire qu'il convient par une réaction chimique appropriée, de faire passer les objets à fabriquer de l'état plastique à l'état élastique.

L'installation qui existe à la cablerie est constituée d'une ligne de vulcanisation inclinée d'une longueur de 90 mètres. Après l'extrusion de l'isolant, le câble entre dans le tube chauffé à haute température (200-250°C) par de la vapeur saturée. A la sortie du tube, le câble passe par un bac de refroidissement et une machine à sec (pour la détection des défauts) avant de le réceptionner sur un touret.



La vulcanisation s'effectue pendant le temps que met le câble à parcourir le tube (pour notre câble sa vitesse de déroulement est de 6m/mn.)

On procéda à la vérification de l'état de vulcanisation de l'isolant par la détermination de ses propriétés mécaniques notamment sa résistance à la traction et son allongement à la rupture.

Les paramètres qui influent sur l'état de vulcanisation, suivant la nature de l'isolant et la diamètre du conducteur, sont les suivants: la pression dans le tube, la température et la vitesse de déroulement du câble.

#### 3.4. Rubanage de l'écran métallique:

Sur la couche semi-conductrice recouvrant l'isolant, nous rubanons un écran en cuivre de 30mm de largeur et de 0,1mm d'épaisseur avec un facteur de recouvrement de 25%.

Cet écran permet de créer une surface équipotentielle autour de l'isolant. On obtient ainsi un câble à champ radial (les équipotentielles sont des cercles concentriques au conducteur et les lignes de champ sont orthogonales aux équipotentielles.)

#### 3.5: extrusion de la gaine de protection:

Après le rubanage de l'écran métallique, le câble est transporté dans un autre atelier où se fera l'extrusion de la gaine de protection en P.V.C.

Le P.V.C a une élasticité relativement faible, mais se ramollissant à des températures élevées, et peut être directement extrudé sur le conducteur.

L'extrusion de la gaine est réalisée à l'aide d'une boudineuse dans laquelle le P.V.C est introduit sous forme de granulés qui seront fondus et malaxés sous une température de 160°C.

Après l'extrusion de la gaine le câble passe par un bac de refroidissement pour être enroulé sur un touret .

Par cette opération s'achève l'isolement du câble qui est envoyé au laboratoire pour subir les essais recommandés par les normes.

Remarques:

Nous constatons dans ce chapitre que l'isolation du câble est réalisée par étapes dans différents ateliers, notamment le rubanage des écrans semi-conducteurs et l'extrusion de l'isolant. L'exposition à l'air libre dans une atmosphère poluée favorise le dépôt d'impuretés et de poussières sur le semi-conducteur. Ces aspérités par suite d'une hétérogénéité à l'interface semi-conducteur/isolant peuvent induire au claquage lors de la mise en service du câble.

De ce fait, on doit veiller sur la propreté des ateliers et les doter d'aspirateurs.

Le personnel des ateliers de préparation du mélange isolant et de la réalisation du câble doit être sensibilisé sur l'importance de l'isolation en moyenne tension.



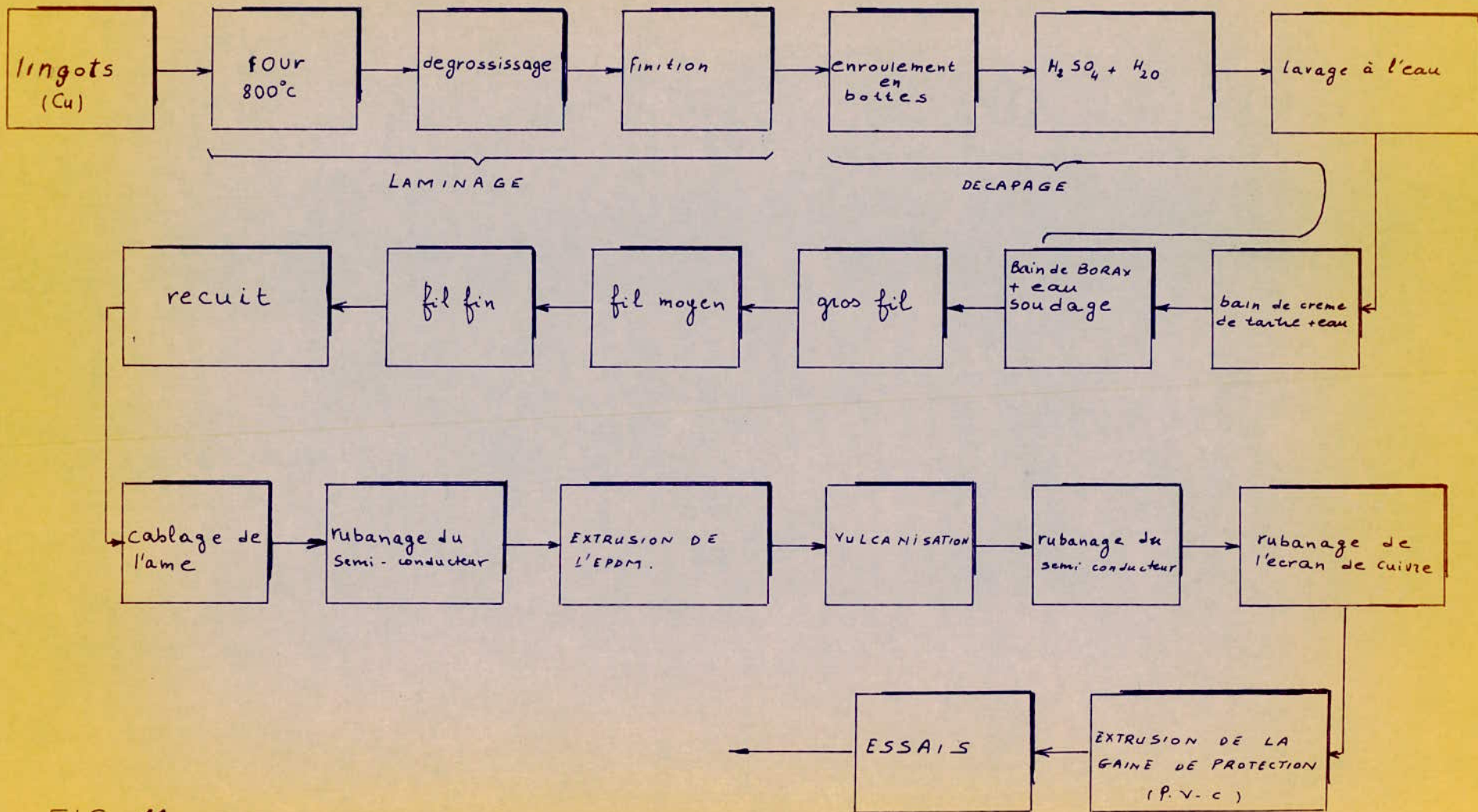


FIG - 11

# ORGANIGRAMME DU PROCESSUS DE FABRICATION DU CABLE

Généralités :

Nous présentons dans ce chapitre, les essais diélectriques effectués sur le câble que nous avons réalisé à la câblerie.

Les essais réalisés sont de 2 types: - essais de série  
- essais de type

Nous déterminerons aussi, dans ce chapitre, l'intensité du courant admissible en régime permanent et en régime de court-circuit du câble suivant son mode d'utilisation.

4.1. Caractéristiques et dimensions du câble:

Les caractéristiques de notre câble sont les suivantes:

- câble à champ radial isolé à l'E.P.D.M.
- Tension nominale:  $U = 30 \text{ Kv}$
- Tension spécifiée:  $U = 18 \text{ Kv}$
- Ame rigide, circulaire, non rétreinte, en cuivre.
- Température maximale sur l'âme: -  $90^\circ\text{c}$  en régime permanent  
-  $250^\circ\text{c}$  en régime de court-circuit.

Nombre de brins: 19

- Diamètre d'un brin: 1,78 mm
- Diamètre de l'âme: 8,9 mm
- Section nominale de l'âme:  $50 \text{ mm}^2$
- épaisseur de l'isolant: 6,5 mm
- Champ maximal ( à la surface de l'âme ):

$$E = \frac{U_0}{r_1 \log_n \frac{r_2}{r_1}} = 4,6 \text{ Kv/mm.}$$

La figure ( 12 ) nous donne toutes les dimensions du câble.



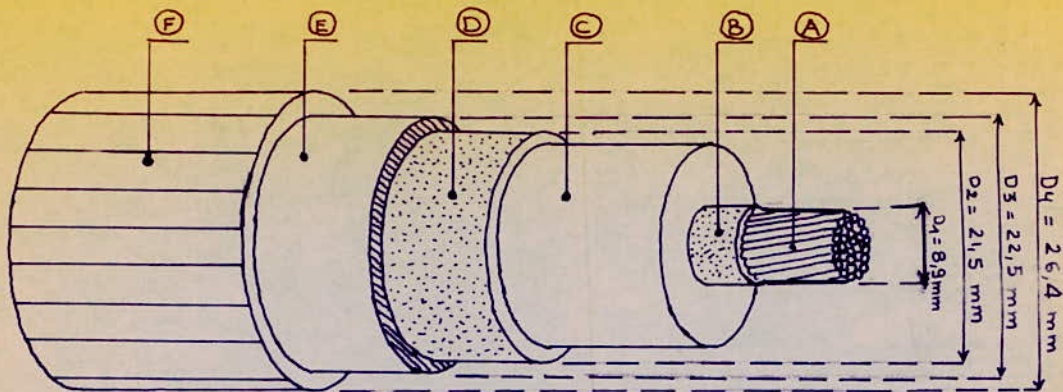
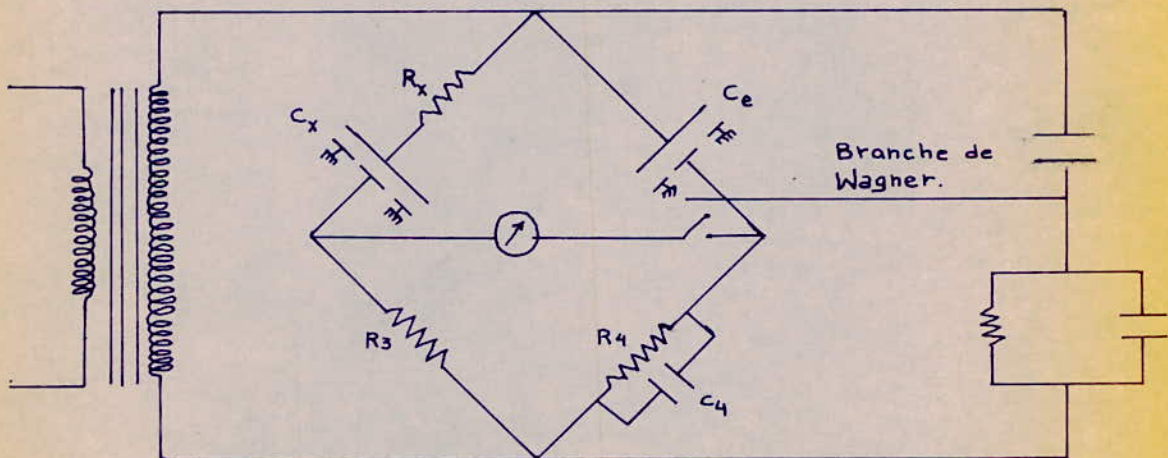


Figure 12 : Vue en perspective du câble terminé .

- (A): Ame conductrice (B): Ecran semi-conducteur (C): Isolant  
 (D): Ecran semi-conducteur (E): Ecran de cuivre (F): Gaine protectrice en P.C.V.



$C_e$ : capacité étalon .  
 $C_x$ : capacité du câble .

A l'équilibre on a :  $C_x = \frac{C_e \cdot R_4}{R_3}$   $\tan \delta = \omega R_4 C_4$

Figure 13 : Schéma de principe du pont de schering utilisé

#### 4.2. Essais de série:

Ces essais sont effectués systématiquement sur toutes les longueurs de fabrication. Ils servent à vérifier si le câble a les propriétés suffisantes pour sa mise en exploitation.

Ces essais comprennent:

- une mesure de la résistance lineique du conducteur.
- une vérification de la rigidité diélectrique sous tension de courte durée à fréquence industrielle
- une mesure de la résistance d'isolement à température ambiante

##### 4.2.1. Mesure de la résistance lineique.

La mesure est effectuée à l'aide d'un pont de wheastone sur la longueur totale de notre échantillon (100 m), à la température ambiante  $t = 18^{\circ}\text{C}$ . on trouve  $R_t = 0,358 \Omega/\text{Km}$ .

Cette valeur est ramenée à la température de référence ( $20^{\circ}\text{C}$ ) par le formule:

$$R_{20} = \frac{R_t}{1 + a_{20}(t - 20)}$$

ou:

$R_{20}$ : résistance lineique à la température  $20^{\circ}\text{C}$ .

$a_{20}$ : coefficient de variation, avec la température, de la résistance du cuivre, à masse constante et à dilatation libre.  $a_{20} = 3,93 \cdot 10^{-5}$

$R_t$ : résistance lineique à la température de mesure  $t$ .

d'ou:  $R_{20} = 0,360 \Omega/\text{Km}$ .

Cette valeur est conforme à la norme ( 10 ) qui tolère une résistance maximale à  $20^{\circ}\text{C}$  de  $0,379 \Omega/\text{Km}$ .



#### 4.2.2. Vérification de la rigidité diélectrique de courte durée à fréquence industrielle:

Cet essai permet de vérifier si le câble ne présente aucun défaut d'isolation avant sa livraison. A titre préventif, cet essai peut être réalisé avant l'extrusion de la gaine de protection. Notre câble étant à champ radial, nous appliquons une tension entre l'âme et l'écran métallique pendant 20 minutes.

La tension appliquée est égale à 2,5 U<sub>0</sub>, soit 45 Kv.

Cet essai s'est avéré satisfaisant car aucun claquage ne s'est produit durant la mise sous tension.

#### 4.2.3. Mesure de la résistance d'isolement à température ambiante.

La résistance d'isolement d'un câble est le quotient de la tension continue appliquée à un câble par le courant de fuite à travers l'isolant.

L'essai est réalisé à l'aide d'un Megohmmètre SCHLUMBERGER type PE 316. Sous une tension de mesure de 500 V continue, appliquée à toute la longueur de fabrication, on trouve:

$$R_i = 4715 \text{ M} \cdot \text{Km}$$

L'intérêt que présente la mesure de la résistance d'isolement est de permettre de contrôler le maintien de la qualité de fabrication de câbles de même type et de même dimensions.

La connaissance de la résistance d'isolement nous permet de calculer la résistivité transversale du câble à l'aide de la formule suivante:

$$\rho = \frac{2 \pi l R}{\log_e \frac{D}{d}}$$

ou:

$\rho$  : résistivité transversale en  $\Omega \cdot \text{cm}$

R: résistance d'isolement mesurée en

l: Longueur du câble en cm

D: diamètre extérieur de l'isolation en mm

d: diamètre intérieur de l'isolation en mm

Pour notre câble , on trouve:

$$\rho = 3,36 \cdot 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}.$$

Cette valeur est conforme à la norme (2) qui fixe l'ordre de grandeur à  $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ .

#### 4.3 Essais de type:

Ces essais sont obligatoirement effectués sur les prototypes et têtes de fabrication. Ils peuvent être renouvelés occasionnellement en partie ou totalité dans le but de vérifier que la qualification du type de fabrication se maintient dans le temps.

Les essais que nous avons réalisés sont conforme à la norme en vigueur ( ). Ils comprennent:

- un essai d'enroulement.
- une mesure des pertes diélectriques.
- un essai de cycles de chauffage.
- un essai de rigidité diélectrique de contrôle.
- un essai de tenue aux ondes de choc.
- une mesure de la résistance d'isolement à la température de service.

- i



#### 4.3.1. Essai d'enroulement:

L'essai d'enroulement s'effectue avant tout autre essai. Le câble étant appelé à subir des pliages lors de son installation l'essai d'enroulement nous permet de vérifier si les constituants du câble résistent aux contraintes mécaniques. Nous procéderons à cette vérification après l'essai de rigidité diélectrique de contrôle.

L'essai est effectué sur un échantillon de 10 m. Cet échantillon est enroulé sur un touret de diamètre  $\emptyset = 17(d+D)$  ( d: diamètre de l'âme (mm) ; D: diamètre extérieur du câble(mm)). IL est en suite déroulé, redressé puis enroulé à nouveau en sens inverse. Ce cycle d'opération est répété de façon à avoir 3 pliages dans un sens et 3 pliages dans l'autre.

Après l'essai de rigidité diélectrique (paragraphe 4.3.4) nous avons procédé à l'examen de l'échantillon. Les constituants ne présentent ni fente, ni déchirure, ni rupture et ni discontinuité.

Après cet essai d'enroulement, l'échantillon devait être soumis à un essai de décharges partielles. Par manque de matériel nécessaire, cet essai ne put être réalisé.

#### 4.3.2. Mesure des pertes diélectriques:

Les pertes diélectriques sont en général moins importantes que les pertes joule dans le cuivre, mais cependant la connaissance de leur niveau est nécessaire pour vérifier la qualité de l'isolant l'isolation du câble en fonction du temps de mise en service. Les mesures s'effectuent à l'aide d'un pont de Schering dont le Schéma de principe est présenté à la figure ( 13 ).

#### 4.3.2.1. Mesure de la capacité et de $\text{tg } \delta$ en fonction de la tension

Cet essai permet la détermination du facteur de dissipation sous différentes tensions à la température ambiante.

Les exigences auxquelles le facteur de dissipation doit satisfaire étant

- $\text{tg } \delta_{\text{max}} = 200 \cdot 10^{-4}$  à  $U_0$
- Variation maximale de  $\text{tg } \delta$  pour  $U$  variant entre  $0,5 U_0$  et  $2U_0$   
 $\Delta \text{tg } \delta = 25 \cdot 10^{-4}$ .

Nous procédons à cette vérification, par la mesure de  $\text{tg } \delta$  à différentes tensions. (tableau 4). Les résultats obtenus sont:

- $\text{tg } \delta = 175 \cdot 10^{-4}$  à  $0,5 U_0$
- $\text{tg } \delta = 197 \cdot 10^{-4}$  à  $U_0$
- $\text{tg } \delta = 249 \cdot 10^{-4}$  à  $2U_0$

On constate qu'à  $U_0$ , la valeur du facteur de dissipation est assez importante, elle est à la limite de la grandeur imposée. La variation de  $\text{tg } \delta$  entre  $0,5U_0$  et  $2U_0$  est de  $74 \cdot 10^{-4}$ ; cet écart n'est pas acceptable car il dépasse largement le seuil admissible.

La variation de la tension n'a pas d'influence sur la capacité du câble. Celle-ci reste constante et égale à  $185 \text{ nF/Km}$ . L'allure de la courbe (figure 14) nous montre que les pertes augmentent proportionnellement avec la tension. Ceci serait dû à l'existence de vacuoles à faible permittivité, entre les différentes couches de l'isolation, qui facilitent le phénomène de décharges partielles engendrant une dissipation d'énergie sous forme de chaleur. L'utilisation d'un semi-conducteur extrudé (meilleure adhérence) pourrait réduire le niveau des pertes diélectriques et réduire de même l'écart du facteur de dissipation entre  $0,5 U_0$  et  $2 U_0$ .



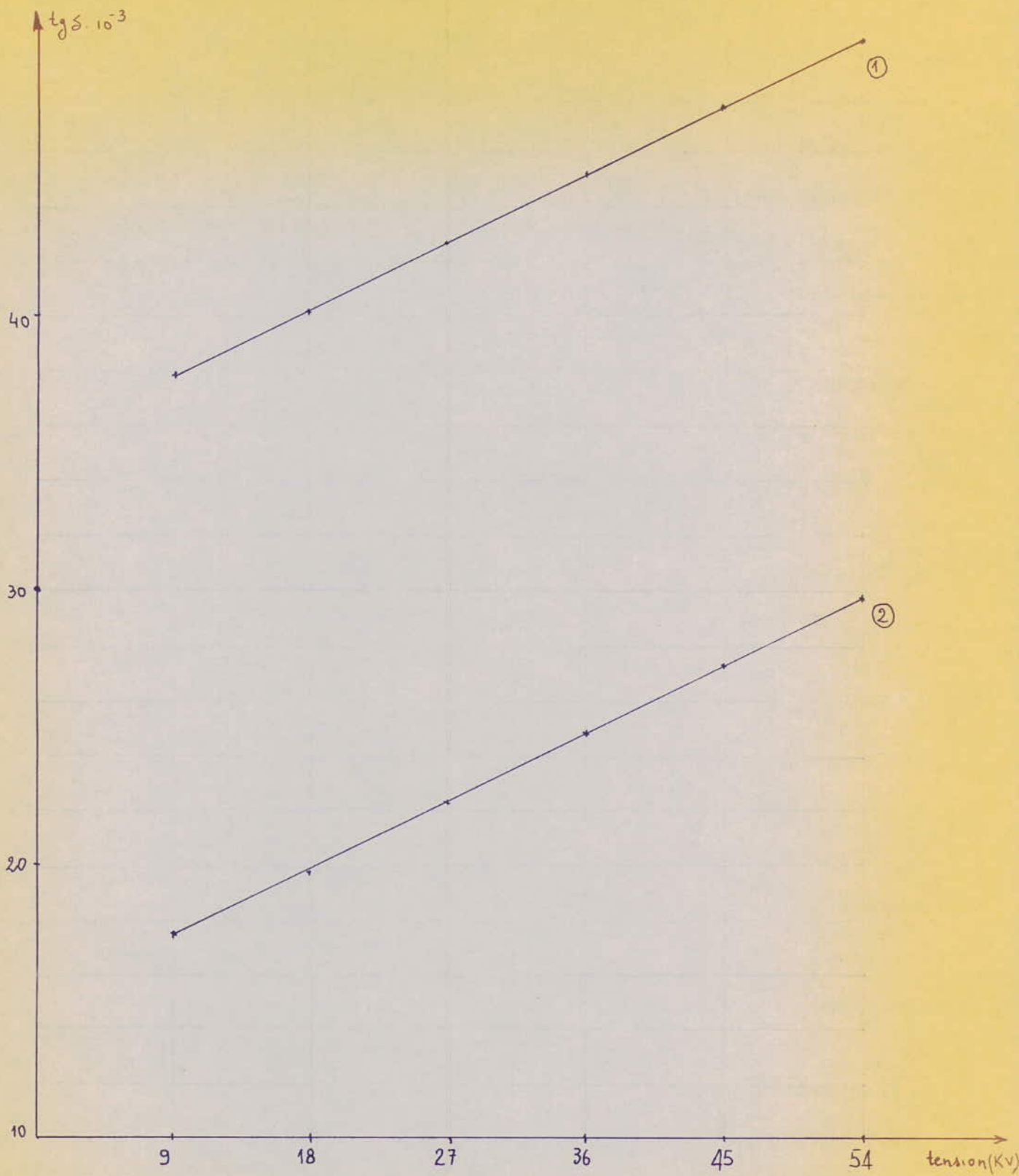


Figure 14: Variation du facteur de dissipation en fonction de la tension, à température constante.

(1) :  $\theta = 90^\circ\text{C}$

(2) :  $\theta = 20^\circ\text{C}$  .

#### 4.3.2.2. Mesure de tg $\delta$ en fonction de la température.

Cet essai nous permet de suivre l'évolution du facteur de dissipation, sous tension constante, à différentes températures.

Le chauffage du câble est obtenu par circulation d'un courant continu induit dans l'âme conductrice.

Les mesures sont effectuées sous une tension alternative de 9 KV, au lieu de 2KV comme recommandé. Ceci est dû au fait qu'on ne pouvait disposer de tension de cet ordre de grandeur.

nous obtenons les résultats suivants:

- $\text{tg } \delta = 175.10^{-4}$  à 20°C
- $\text{tg } \delta = 379.10^{-4}$  à 90°C.

Bien qu'elles soient élevées, ces valeurs répondent largement aux exigences imposées (2) qui sont:

- $\text{tg } \delta = 200.10^{-4}$  à 20°C
- $\text{tg } \delta = 400.10^{-4}$  à 90°C.

sous une tension de 2KV.

La courbe illustrant la variation de  $\text{tg } \delta$  en fonction de la température (figure 15) nous montre que les pertes diélectriques sont d'autant plus importantes que la température s'élève.

Contrairement à la variation du facteur de dissipation en fonction de la température obtenue sur les éprouvettes du mélange industriel (chapitre 1); nous obtenons sur câble une augmentation rapide du facteur de dissipation à partir de la température ambiante. Cette différence serait due à l'humidité introduite dans le câble durant l'opération de vulcanisation.

Nous procéderons à la vérification de cette hypothèse après l'essai de cycle de chauffage.



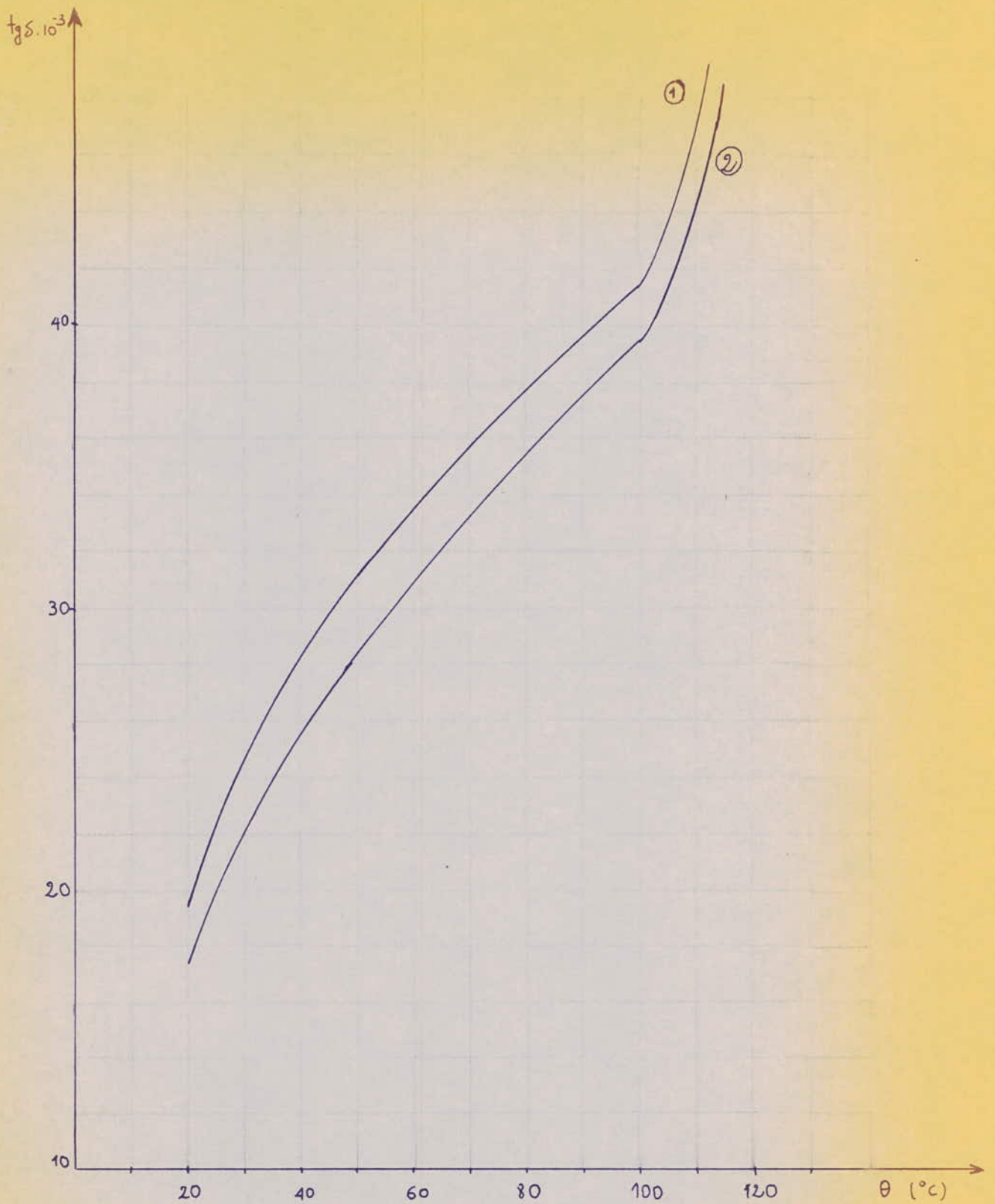


Figure 15 : Variation du facteur de dissipation en fonction de la temperature.

(1) : Mesures effectuées à  $U=U_0$  ( 18 KV )

(2) : " " " "  $U=0,5 U_0$  .

#### 4.3.2.3. Essai de cycles de chauffage.

Cet essai est principalement destiné à vérifier la stabilité mécanique des écrans. Nous vérifions de même lors de cet essai l'influence du chauffage sur les pertes diélectriques.

Un échantillon de 15 m est soumis à 3 cycles de chauffage obtenus par circulation dans le conducteur d'un courant portant l'âme à une température de 100°C.

La durée du chauffage est de 2 heures et celle du refroidissement de 4 heures pour chaque cycle.

Après le refroidissement du dernier cycle, la mesure de  $\text{tg } \delta$  à température ambiante nous donne:

$$- \text{tg } \delta = 87.10^{-4} \text{ à } 0,5U_0$$

$$- \text{tg } \delta = 96.10^{-4} \text{ à } U_0$$

$$- \text{tg } \delta = 127.10^{-4} \text{ à } 2 U_0$$

On constate que cet essai de cycles de chauffage a amélioré le facteur de dissipation. En effet, les valeurs obtenues ont diminué en moyenne de 50% .

L'écart du facteur de dissipation entre 0,5  $U_0$  et 2  $U_0$  se réduit de même. De  $74.10^{-4}$  avant chauffage il passe à  $40.10^{-4}$  après cet essai.

#### 4.3.2.4. Influence du vieillissement thermique.

Le facteur de dissipation s'étant amélioré après l'essai de cycles de chauffage, et afin de confirmer le bon vieillissement thermique de L'E.P.D.M. (chpitre 1); nous avons jugé utile d'étudier l'influence du vieillissement thermique sur le facteur de dissipation nous simulons ce vieillissement après des cycles de 8 heures de chauffage et 16 heures de refroidissement.



Après 3 cycles de chauffage on obtient les résultats présentés dans le tableau (5).

De la figure ( 16 ) illustrant les variations de  $tg \delta$  en fonction de la tension avant et après vieillissement, il ressort une nette amélioration du facteur de dissipation. A température ambiante, l'écart de  $tg \delta$  entre  $0,5 U_0$  et  $2 U_0$  devient égal à la valeur admise ( $25.10^{-4}$ ).

De la figure ( 17 ) représentant les variations de  $tg \delta$  en fonction de la température, on constate une autre amélioration du facteur de dissipation. Après vieillissement l'augmentation de  $tg \delta$  devient plus lente et l'allure de la courbe se rapproche à celle obtenue sur éprouvettes (chapitre 1).

Ceci confirme l'hypothèse émise à propos de la présence d'humidité dans le câble.

#### 4.3.3. Essai de rigidité diélectrique de contrôle?

Cet essai est réalisé sur le même échantillon qui a subi l'essai d'enroulement.

Nous appliquons à l'échantillon une tension alternative de valeur égale à  $3 U_0$  soit 54 KV durant 4 heures consécutives entre le conducteur et l'écran métallique. Pendant toute cette durée, il ne s'est produit aucun claquage sur notre échantillon. Ceci démontre la bonne tenue de l'isolant sous tension élevée de longue durée malgré les contraintes mécaniques qu'il a subies durant l'essai de pliage .

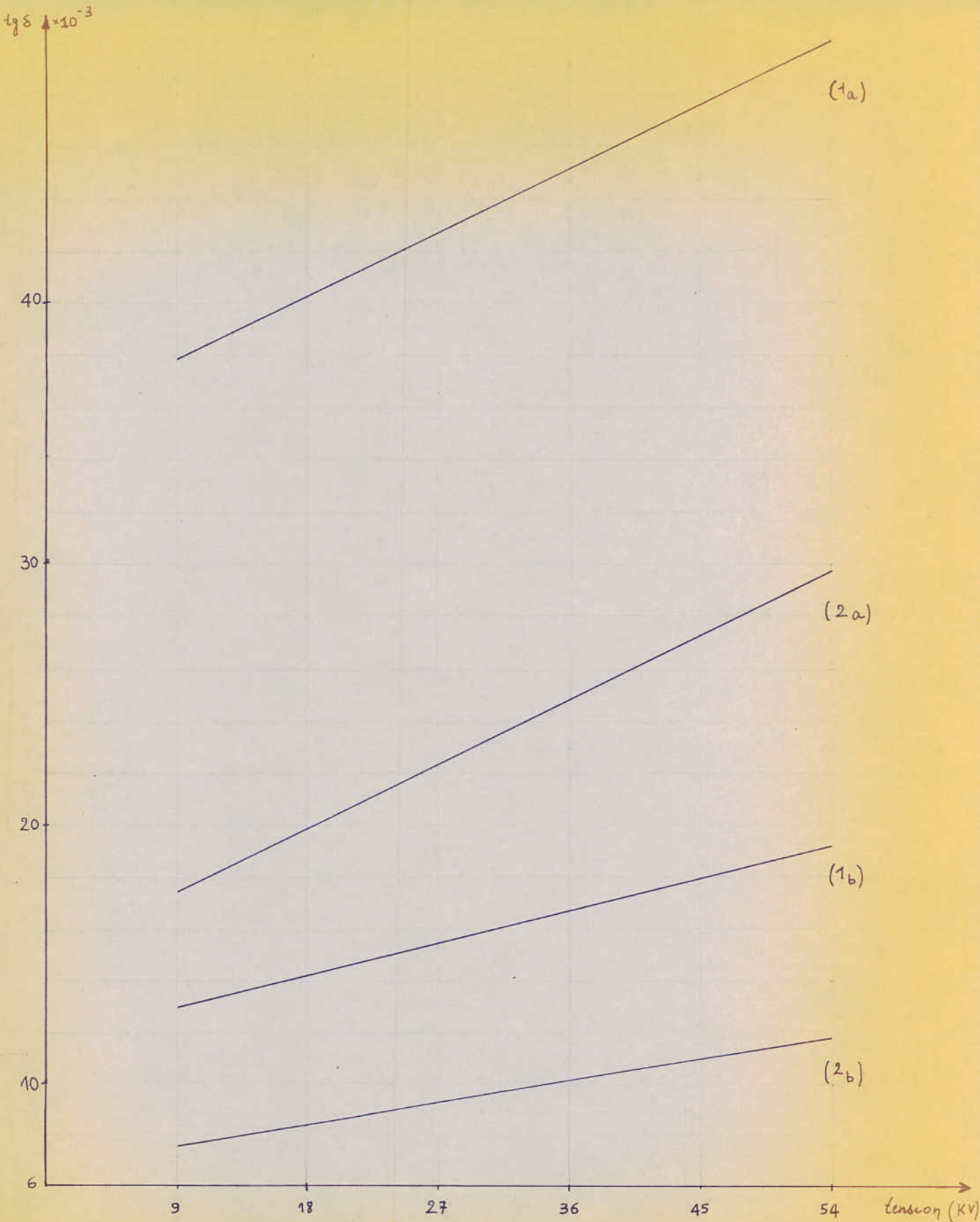


Figure 16: Variation du facteur de dissipation en fonction de la tension, à température constante; avant et apres vieillissement.

(1) : à 90°C (2) : à 20°C

(a) : avant vieillissement

(b) : apres vieillissement.





Durant la mise sous tension de l'échantillon, nous avons jugé intéressant de mesurer la valeur du facteur de dissipation à intervalle régulier de 30 mn pour déterminer sa variation et sa valeur maximale si un claquage se produirait sur l'échantillon. Vu la bonne tenue du câble, la variation obtenue (figure 13) se traduit par une augmentation du facteur de dissipation pendant les 2 premières heures avant de rester constant à la valeur de  $\text{tg } \delta = 29.10$ .

#### 4.3.4. Essai de tenue aux ondes de choc.

Cet essai nous permet de savoir si notre câble supportera à sa température maximale de service, 10 chocs positifs et 10 chocs négatifs avec un niveau de tension de 125 KV. Par manque de moyens pour nous permettre de réaliser cet essai à la température de 95°C, nous avons procédé de la manière suivante: nous avons d'abord chauffé notre échantillon, par circulation de courant continu induit, jusqu'à la température de 100°C. Après la stabilisation de la température, nous avons arrêté le chauffage et préparé l'échantillon à l'essai. Le temps mis entre l'arrêt du chauffage et la préparation de l'échantillon est environ de 10 mn, ce qui a permis la diminution de la température du câble à 60°C environ.

Notre échantillon a supporté sans défaillance les 10 chocs positifs et les 10 chocs négatifs sous le niveau de tension de 125 KV.



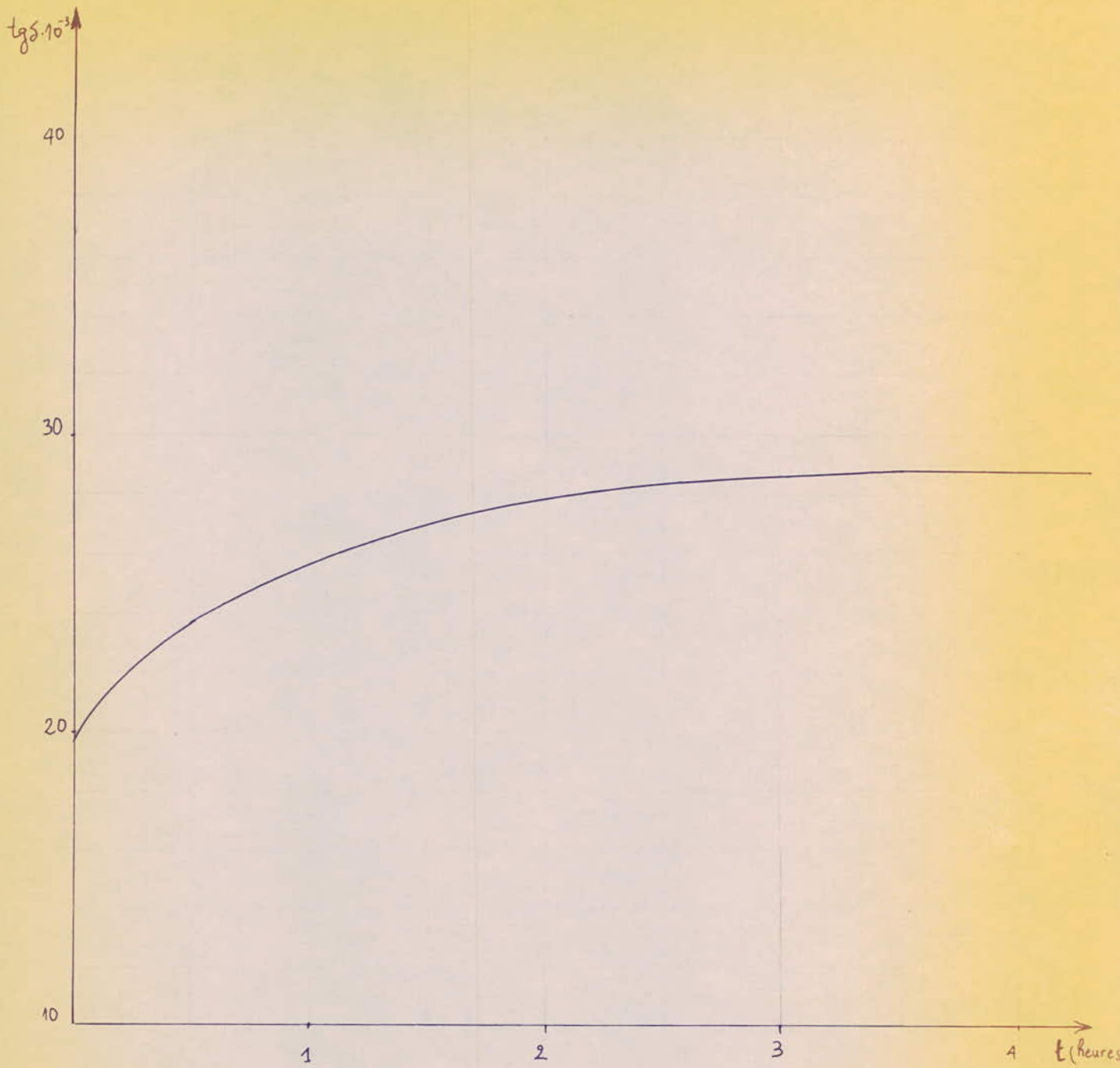


Figure 13: Variation du facteur de dissipation en fonction du temps d'application de la tension  $U = 3 U_0$  ( 54 KV ).

| U (Kv) / $\theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 9     | 13,5  | 18    | 22    | 31,5  | 36    | 45    | 54    |
|------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 20 $^{\circ}\text{C}$                    | 175   | 185,7 | 197   | 211,1 | 233,5 | 249   | 275   | 297,7 |
| 30                                       | 221   | 235,6 | 251,1 | 261   | 288,7 | 304,1 | 334,5 | 366,1 |
| 50                                       | 271,2 | 288,1 | 302   | 313,1 | 342   | 357,1 | 393   | 428,1 |
| 60                                       | 303,1 | 315,1 | 328,1 | 339,5 | 369,9 | 385,6 | 416,4 | 455,4 |
| 70                                       | 335,1 | 346,1 | 356,9 | 365,9 | 390,2 | 404   | 430   | 466   |
| 90                                       | 379,1 | 391,1 | 402   | 411   | 435   | 448   | 476   | 509,7 |
| 100                                      | 392,6 | 401   | 413,6 | 423   | 445   | 461   | 480   | 520,6 |
| 110                                      | 457,6 | 474   | 486,5 | 504   | 531   | 545,9 | 576,8 | 613,4 |
| 120                                      | 571   | 584,7 | 599   | 606,6 | 635   | 654,4 | 687,7 | 723,5 |

Tableau ( 4 ) : Variation du facteur de dissipation,  $\text{tg } \delta \cdot 10^{-4}$ , en fonction de la température sous différentes tensions, avant cycles de chauffage.

| U (Kv) / $\theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ )       | ( $U_0 / 9$ ) | ( $U_0 / 18$ ) | $2 U_0 / 36$ |
|------------------------------------------------|---------------|----------------|--------------|
| T $^{\circ}$ Ambiante<br>22 $^{\circ}\text{C}$ | 76            | 85             | 101          |
| 42                                             | 70            | 83             | 105          |
| 63                                             | 89            | 102            | 123          |
| 77                                             | 107           | 120            | 142          |
| 90                                             | 130           | 145            | 168          |
| 103                                            | 163           | 184            | 228          |
| 120 $^{\circ}$                                 | 216           | 242            | 332          |

Tableau ( 5 ) : Variation du facteur de dissipation en fonction de la t $^{\circ}$  sous différentes tensions après les cycles de chauffage.



#### 4.3.5. Mesure de la résistance d'isolement à la température de service

L'essai est réalisé sur un échantillon de câble chauffé à 90°C. La méthode de mesure est la même que celle décrite lors de la mesure de la résistance d'isolement à température ambiante.

La valeur trouvée étant de :  $R_i = 123,5 \text{ M}\Omega \cdot \text{Km}$

On déduit de même la résistivité transversale du câble à sa température maximale de service:

$$\rho = 8,79 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$$

Cette valeur est conforme à la norme (2) qui tolère une résistivité transversale de l'ordre de  $10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$  à la température maximale de service.

#### 4.4 Essai de claquage.

Cet essai sert à déterminer le coefficient de sécurité du câble qui est le rapport de la tension de perforation à la tension de service du câble. On procède donc à des essais de claquage sur différents échantillons du câble.

Avant la réalisation de l'essai, on capote les deux extrémités de l'échantillon et on enveloppe ces extrémités d'un diélectrique (carbure de silicium), on place de même des déflecteurs au niveau de l'écran. Nous prenons ces précautions pour empêcher la décharge de contourner l'isolant. On applique alors entre l'âme et l'écran une tension alternative progressivement croissante jusqu'à ce que la perforation se produise .

Pour les différents essais de claquage, nous obtenons une tension de perforation moyenne  $U = 142 \text{ KV}$  soit un coefficient de sécurité

$K = 8$ . On déduit le champ moyen :  $E = \frac{U}{r_2 - r_1} = 23,6 \text{ KV/mm}$ .

Cette valeur reste voisine de la valeur de la rigidité diélectrique de l'E.P.D.M.

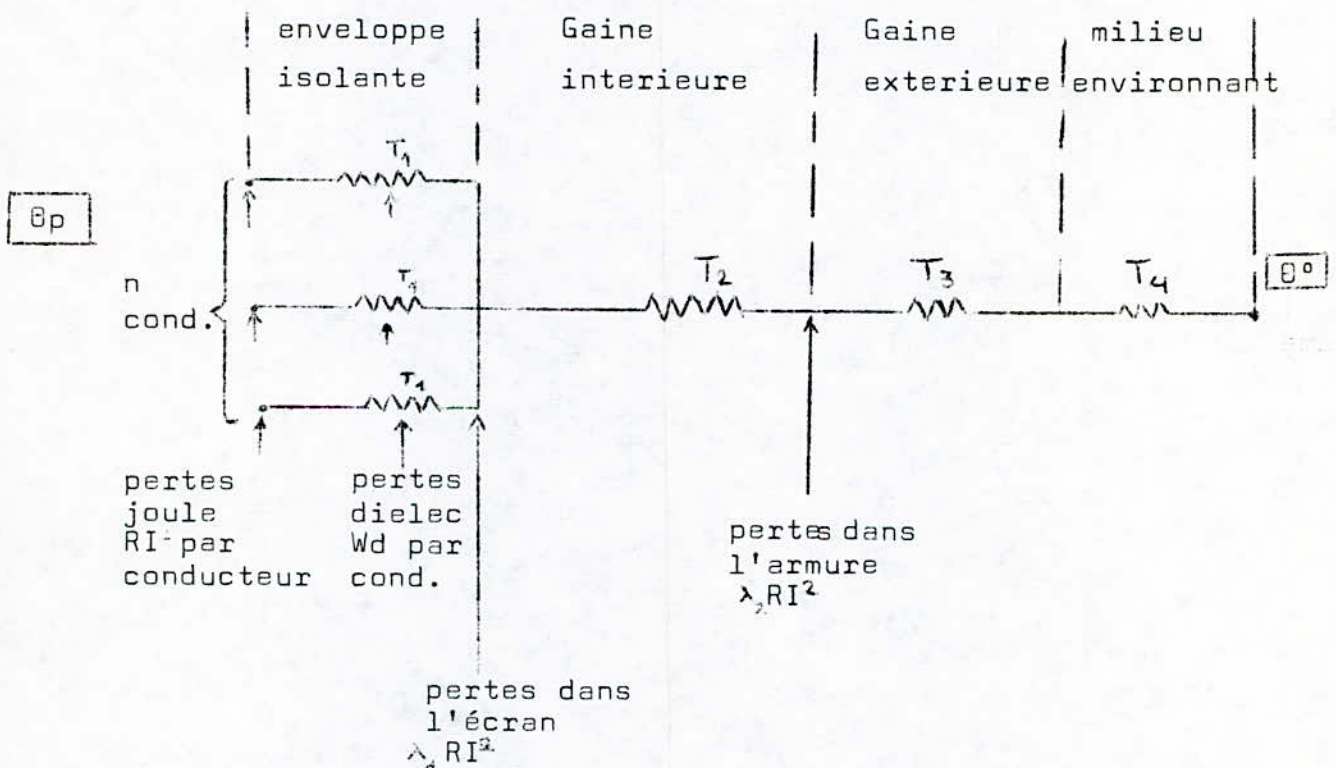
#### 4.5. Calcul du courant admissible dans le câble.

La principale caractéristique d'un câble est sa capacité de transport (ou puissance transmissible) qui résulte de sa tension de service et de l'intensité du courant nominal.

Nous calculerons le courant admissible en régime permanent et en régime de court-circuit.

##### 4.5.1. Courant admissible en régime permanent (facteur de charge 100%)

Nous déterminons l'intensité de ce courant par la méthode de calcul recommandée par la norme ( ) selon le critère thermique. Un câble est représenté du point de vue thermique par le circuit suivant:



où:

I: Intensité admissible dans un conducteur en régime permanent(A)

$\theta_p$ : Température admissible sur l'âme en régime permanent( $^{\circ}C$ )

$\theta_o$ : Température du milieu environnant (air ou sol) ( $^{\circ}C$ )



R: résistance d'un conducteur en courant alternatif, à la température de service ( $\Omega/\text{Km}$ )

Wd: pertes diélectriques dans l'isolant d'un conducteur ( $^{\circ}\text{C.cm/W}$ )

T<sub>1</sub>: résistance thermique de l'enveloppe isolante d'un cond ( $^{\circ}\text{C}$ )

T<sub>2</sub>: résistance thermique de la gaine intérieure ( $^{\circ}\text{C.cm/W}$ )

T<sub>3</sub>: résistance thermique de la gaine extérieure ( $^{\circ}\text{C.cm/W}$ )

T<sub>4</sub>: résistance thermique du milieu environnant ( $^{\circ}\text{C.cm/W}$ )

n: nombre de conducteurs.

$\lambda_1$ : rapport des pertes dans l'écran aux pertes joule dans les conducteurs.

$\lambda_2$ : rapport des pertes dans l'armure aux pertes joule dans les conducteurs.

La relation générale donnant l'intensité admissible I, en régime permanent, est :

$$\Delta\theta = \left( I^2 R + \frac{W_d}{2} \right) T_1 + \left[ I^2 R (1 + \lambda_1) + W_d \right] n T_2 + \left[ I^2 R (1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d \right] n (T_3 + T_4).$$

Pour notre câble, on a:  $T_2 = 0, \lambda_2 = 0, n = 1$  car on a un câble sans armure. Ainsi de la formule précédente on déduit le courant admissible par l'expression:

$$I = \left[ \frac{\Delta\theta - W_d \left( \frac{T_1}{2} + T_3 + T_4 \right)}{R T_1 + R (1 + \lambda_1) (T_3 + T_4)} \right]^{1/2}$$

Les Calculs sont effectués dans le cas d'une canalisation à 3 conducteurs disposés en trèfle et en nappe jointifs.

Les conditions d'installation sont les suivantes:

- cas A: La canalisation est enterrée à 80 cm de profondeur dans un terrain de résistivité thermique moyenne de  $85^{\circ}\text{C.cm/W}$ . La température maximale du sol est prise égale à  $20^{\circ}\text{C}$ .

- cas B: La canalisation est disposés à l'air libre, sur tablette, à l'abri des rayons solaires. La température maximale de l'air est prise égale à 30°C.

La résistivité thermique de notre isolant ne pouvait être déterminée avec exactitude, nous effectuons de ce fait les calculs avec la valeur prescrite dans la norme (500°C.cm/W) et la valeur approchée déterminé par calcul (300°C.cm/W).

Les résultats obtenue sont:

| résistivité thermique de l'isolant: | conducteurs en trèfle           |       | cond en nappe |
|-------------------------------------|---------------------------------|-------|---------------|
|                                     | $\rho = 500^\circ\text{C.cm/W}$ | A     | 242 A         |
|                                     | B                               | 221 A | 229 A         |
| $\rho = 300^\circ\text{C.cm/W}$     | A                               | 258   | 257           |
|                                     | B                               | 233   | 241           |

tableau ( ): courants admissibles dans le câble suivant les conditions d'installation.

A: canalisation enterrée

B: canalisation à l'air libre.

Ces valeurs satisfont à la norme (11) qui donne les valeurs suivantes: -I= 235.A pour un câble enterré

-I= 230.A pour un câble à l'air libre.

Remarque: Si les conditions propres à l'installation sont différentes de celles précisées, on calcule le facteur de correction K à appliquer à l'intensité à transporter.



K est le produit des différents facteurs de correction intervenant on distingue 4 facteurs de correction:

K<sub>1</sub>: Facteur de correction de température à appliquer pour tous câbles posés dans une température ambiante différente de:

- 20°C pour les câbles enterrés
- 30°C pour les câbles à l'air libre.

K<sub>2</sub>: Facteur de correction en fonction du mode de pose.

K<sub>3</sub>: Facteur de correction de proximité.

K<sub>4</sub>: Facteur de correction pour câble enterré dans les sols de résistivité thermique différente de 85°C cm/W.

4.5.2. Courant admissible en régime de court-circuit:

Pour les câbles à champ radial, les court-circuits sont généralement homopolaires.

On suppose que le câble est initialement chaud (90°C), que la température du conducteur en fin de surcharge ne dépasse pas 250°C et que l'échauffement est adiabatique.

On peut alors écrire:  $\frac{I_{cc} \sqrt{t}}{S} = K_c \quad (A.S^{1/2}/mm^2)$

avec:

$$K_c = \left[ \frac{\gamma}{j_{20} c_{20}} \text{Log}_e \left\{ \frac{1 + a_{20}(\theta_f - \theta_0)}{1 + a_{20}(\theta_{cc} - \theta_0)} \right\} \right]^{1/2}$$

ou:

I<sub>cc</sub>: intensité admissible, en régime de court-circuit, dans le conducteur (A)

t : durée du court-circuit (S)

S : section du conducteur (S = 50 mm<sup>2</sup>)

γ : chaleur volumique (du métal) constituant l'âme du câble  
(cu: γ = 3,5.10 j/°C.mm)

$\rho_{20}$ : résistivité électrique du conducteur à 20°C

(cu:  $\rho_{20} = 1,7241 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{mm}$ )

$\alpha_{20}$ : coefficient de variation de  $\rho$  avec la température

(cu:  $\alpha_{20} = 3,93 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )

$\theta_f$ : Température du conducteur à la fin du court-circuit

( $\theta_f = 250^\circ\text{C}$ )

$\theta_a$ : Température du conducteur au début du court-circuit

( $\theta_a = 90^\circ\text{C}$ )

$\theta_0$ : Température du milieu environnant:

- $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$  pour le câble enterré
- $\theta_0 = 30^\circ\text{C}$  pour le câble à l'air libre.

Les valeurs obtenues pour un temps de court-circuit de une seconde sont les suivantes:

- câble enterré :  $I = 7210 \text{ A}$ , soit  $S = 144 \text{ mm}^2$
- câble aérien:  $I = 7305 \text{ A}$ , soit  $S = 146 \text{ mm}^2$ .



Chapitre - 5 -      COMPARAISON ENTRE LE CABLE ISOLE A L'E.P.D.M ET LE CABLE  
ISOLE AU PAPIER IMPREGNE .

Après une comparaison d'ordre générale entre les câbles à isolant sec et à papier imprégné, nous faisons une étude économique comparative entre le câble isolé à l'E.P.D.M et le câble isolé au papier imprégné. Nous présentons de même une comparaison des caractéristiques diélectriques à 20°C des deux câbles .

5-1-Comparaison générale:

Les câbles à isolant sec présentent d'importants et nombreux avantages sur les câbles isolés au papier imprégné, dont les principaux sont :

- Possibilité de réaliser des remontées verticales importantes, l'isolant n'étant pas susceptible de s'écouler du fait de son état solide
- Légèreté : les matériaux synthétiques étant moins sensibles à l'action de l'humidité que le papier imprégné, permettent dans la plupart des cas de se dispenser de la présence d'une gaine de protection. La manutention et la mise en place du câble à isolant sec sont ainsi largement facilitées.
- Simplicité et dimensions réduites des boîtes d'extrémité et de jonction, du fait de la nature de l'isolant.
- Possibilité de conférer à l'isolation des caractéristiques particulières appropriées à chaque emploi envisagé, du point de vue électrique, thermique, mécanique ou chimique ; par suite de nombreux types de matériaux et de formulations envisageables .

-5-2- Etude economique comparative.

Nous procedons à cette etude par la determination du prix de revient d'un km de câble isolé à l'E.P.D.M avec semi-conducteur extrudé et d'un câble isolé au papier impregné .

-5-2-1- Prix de revient à l'usine d'un km de câble E.P.D.M , à champ radial , non armé , tension spécifiée 18/30 kV , section 1 x 50 mm<sup>2</sup> .

| Designation matieres premieres           | Poids (kg/km) |
|------------------------------------------|---------------|
| - Semi-conducteur (à base d'EPDM ) ..... | 36            |
| - Enveloppe isolante LBMT .....          | 720,3         |
| - Ruban .....                            | 7,3           |
| - Ruban cuivre .....                     | 104,4         |
| - Gaine en PCV .....                     | 340           |
| - Cuivre .....                           | 445,2         |

| Designation machines       | nombre d'heures/km |
|----------------------------|--------------------|
| - Tube 90 .....            | 01                 |
| - Rechauffeur 90 .....     | 01                 |
| - Boudineuse C/C 120 ..... | 05,25              |
| - Rechauffeur 120 .....    | 05,25              |
| - Presse à plomb .....     | 07                 |
| - Vulcanisation .....      | 01,5               |
| - Depouilleuse .....       | 02                 |
| - Rubaneuse .....          | 12,5               |
| - Boudineuse .....         | 04                 |
| T O T A L                  |                    |
|                            | 39,5               |



Le prix de revient à l'usine d'un cable sec isolé à l'E.P.D.M.  
est de 25 895,31 DA/km ( prix SONELEC ) .

-5-2-2- Prix de revient à l'usine d'un km de cable armé isolé au papier impregné  
tension specifiée 18/30 kV, section 1 X 50 mm<sup>2</sup>.

| Designation matieres premieres | Poids(kg/km) |
|--------------------------------|--------------|
| - Semi-conducteur .....        | 02,9         |
| - Enveloppe en papier .....    | 267,3        |
| - Papier metallisé .....       | 13,2         |
| - Impregnation .....           | 935          |
| - Tube de plomb .....          | 1358,7       |
| - Matelas jute impregné .....  | 87,5         |
| - Deux feuillets noirs .....   | 633          |
| - Matelas jute impregné .....  | 106,7        |
| - Bitume .....                 | 388,3        |
| - Craie .....                  | 94,1         |
| - Cuivre .....                 | 445,2        |

| Designation machines   | nombre d'heures/km |
|------------------------|--------------------|
| - Rubaneuse .....      | 25                 |
| - Impregnation .....   | 288                |
| - Presse à plomb ..... | 4                  |
| - Armeuse .....        | 12,5               |
| T O T A L              | 329,5              |

Le prix de revient à l'usine d'un km de câble armé isolé au papier imprégné est 48 055,57 DA .

Il ressort de cette étude que le prix de revient est largement à l'avantage du câble isolé à l'E.P.D.M.; ceci étant principalement dû au temps mis pour sa réalisation.

-5-3- Comparaison des caractéristiques diélectriques à 20 °C :

| Caractéristiques           | câble EPDM                 | câble papier imprégné (SONELEC) |
|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| - tg $\delta$              | $85 \cdot 10^{-4}$ à $U_0$ | $40 \cdot 10^{-4}$ à $1,25 U_0$ |
| - Capacité nF/km           | 185                        | 220                             |
| - Champ maximal de service | 3,8 à 4 kV                 | 4 kV                            |
| - Résistance d'isolement   | 4715 M $\Omega$ .km        | 10 000 M $\Omega$ .km           |

Les matières thermoplastiques, réticulées ou vulcanisées, remplacent de plus en plus les isolants de papier imprégné. Les utilisateurs exigent de ces nouveaux câbles, une fiabilité plus élevée, sinon égale à celle des câbles isolés au papier.

De cette comparaison des caractéristiques diélectriques il ressort que le câble isolé à l'E.P.D.M est moins performant que le câble isolé au papier.

Il est donc nécessaire que la cablerie dispose de moyens de production garantissant non seulement une haute productivité, mais surtout une excellente qualité du produit fini . . .



## C O N C L U S I O N . .

- Il ressort de notre étude que l'isolant E.P.D.M élaboré par la cablerie a de bonnes caractéristiques diélectriques lui permettant son utilisation en moyenne tension .

- Bien que notre câble satisfait aux exigences des normes en vigueur, ses propriétés seraient améliorées avec l'emploi d'un matériel plus approprié et une meilleure surveillance des conditions de sa réalisation.

- Nous avons obtenu une bonne résistance de l'isolant à moyen terme. Il serait intéressant que la cablerie poursuive cette étude .

- L'isolation aux matières synthétiques admet des températures de service plus élevées que celle du papier imprégné qui ne peut dépasser 65°C; l'EPDM admet une température de 90°C.

- Sur la base de données fournies par la SONELEC, nous pouvons conclure que le câble à l'EPDM est aussi, du point de vue économique, meilleur que le câble à papier imprégné.

- Pour une éventuelle production de câbles à EPDM; en plus d'un local pressurisé, la cablerie de la SONELEC du gde de constantine (ENICABLE) devrait être dotée de :

- . Trois boudineuses en tandem ou trois boudineuses à une seule tête d'extrusion, qui permettraient l'application simultanée des trois couches: semi-conducteur/isolant/semi-conducteur.
- . Des appareils de mesure et de contrôle de la qualité de l'isolation notamment l'excentricité de l'isolant, la pression et la température en différents points de la boudineuse et du tube à vulcanisation .
- . D'une installation de vieillissement en continu et d'appareils de mesure des décharges partielles.

- Ce projet est aussi un complément appréciable à notre formation. Les suggestions fructueuses qui nous ont été fournies, les facilités d'accès aux différents ateliers et laboratoires, encouragent énormément les rapports université - industrie .





## Chapitre -3- PROCESSUS DE FABRICATION .

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| * 3-1- Réalisation de l'âme                                                |    |
| -3-1-1- Le laminage .....                                                  | 40 |
| -3-1-2- Le décapage .....                                                  | 41 |
| -3-1-3- Le tréfilage .....                                                 | 42 |
| -3-1-4- Le cablage .....                                                   | 43 |
| * 3-2- Rubanage des écrans semi-conducteurs                                |    |
| -3-2-1- Rubanage de l'écran semi-conducteur sur l'âme<br>conductrice ..... | 44 |
| -3-2-2- Rubanage de l'écran semi-conducteur sur l'isolant ..               | 44 |
| * 3-3- Extrusion et Vulcanisation de l'isolant                             |    |
| -3-3-1- L'extrusion .....                                                  | 45 |
| -3-3-2- La vulcanisation .....                                             | 45 |
| * 3-4- Rubanage de l'écran métallique .....                                | 46 |
| * 3-5- Extrusion de la gaine de protection .....                           | 46 |
| * 3-6- Remarques .....                                                     | 47 |

## Chapitre -4- ESSAIS ET MESURES SUR CABLE .

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| * 4-1- Caractéristiques et dimensions du câble réalisé .....                                       | 49 |
| * 4-2- Essais de série                                                                             |    |
| -4-2-1- Mesure de la résistance linéique .....                                                     | 51 |
| -4-2-2- Vérification de la rigidité électrique de courte<br>durée à fréquence industriel .....     | 52 |
| -4-2-3- Mesure de la résistance d'isolement à température<br>ambiante .....                        | 52 |
| * 4-3- Essais de type                                                                              |    |
| -4-3-1- Essais d'enroulement .....                                                                 | 54 |
| -4-3-2- Mesures des pertes diélectriques                                                           |    |
| -4-3-2-1- Mesure de la capacité et de tg 0 en fonction<br>de la tension .....                      | 55 |
| -4-3-2-2- Mesure du facteur de dissipation en fonction<br>de la température .....                  | 57 |
| -4-3-2-3- Essais de cycles de chauffage .....                                                      | 59 |
| -4-3-3- Essai de rigidité de contrôle .....                                                        | 60 |
| -4-3-4- Essai de tenue aux ondes de choc .....                                                     | 63 |
| -4-3-5- Mesure de la résistance d'isolement à la température<br>maximale de service (.90°C.) ..... | 66 |
| * 4-4- Essai de claquage .....                                                                     | 66 |
| * 4-5- Calcul du courant admissible dans le câble .....                                            |    |
| -4-5-1- Courant admissible en regime permanent .....                                               | 67 |
| -4-5-2- " " " " de court-circuit .....                                                             | 70 |

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>Chapitre - 5 - COMPARAISON ENTRE LE CABLE ISOLE A L'EPDM ET LE CABLE<br/>ISOLE AU PAPIER IMPREGNE .....</u> | 72 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                           |    |
|---------------------------|----|
| C O N C L U S I O N ..... | 76 |
|---------------------------|----|

---( BIBLIOGRAPHIE )---

---

- [1]: " Methodes d'essais pour les enveloppes isolantes et les gaines de câbles électriques rigides et souples (mélanges élastomères et thermoplastiques) " norme CEI n° 540 (1979) .
- [2]: " Câbles de transport d'énergie isolés par diélectriques massifs extrudés pour des tensions de 1kV à 30kV . " norme CEI n° 502 (1975) .
- [3]: " Flamme retardant compounds , rubber age . " L.HAGAN .  
" Peach bottom fire spurs improved, cable design. Electrical world. " J.FORENCISK .
- [4]: " Methodes recommandées pour la mesure des résistivités transversales et superficielles d'un materiau isolant électrique . " norme CEI n° 112 (1971) .
- [5]: " Méthodes d'essais recommandées pour la détermination de la rigidité diélectrique des matériaux isolants solides aux fréquences industrielles . " norme CEI n° 243 (1977) .
- [6]: " Recherches et progrès récents dans la technique des câbles à courant alternatif " .  
par : R.TELLIER , L.CONSTANTIN.électricité de FRANCE direction études et recherches
- [7]: " Recommandations pour la détermination de l'endurance thermique des isolants solides, après influence de la chaleur . " norme VDE n° 0304 -3- (1970) .
- [8]: " A propos de la résistivité des écrans semi-conducteurs des câbles MT et HT . " par : J.P.REBOUL université des sciences et techniques du LANGUEDOC .  
VETTLER laboratoire de recherches des établissements BARNIER; VALENCE .
- [9]: " Contribution à l'étude de la propagation des arboréscences électriques dans l'E.P.D.M . " par M.A.HANDALA . Thèse de magister (1982) .
- [10]: " Résistance linéique des câbles isolés. " norme AFNOR C-32-012 .
- [11]: " Câbles moyenne et haute tension à isolation synthétique extrudée . " norme HN 33-S-22 . (1971) .
- [12]: " Essais à haute tension . " norme CEI n° 060 -2- (1973) .  
" Essais de choc des câbles et leurs accessoires . " norme CEI n° 230 (1969) .
- [13]: " Calcul du courant admissible dans les câbles en régime permanent (100% de charge) " norme CEI n° 287 (1969) .
- \* " Installations électriques à haute et basse tension . " A.MAUDUIT tome 1 .
- \* " Electrical insulation . " normes ASTM :  
- test methods - part 39 -  
- specifications - part 40 -



### Le choix de l'aluminium .

Les industries productrices de câbles de transport et de distribution d'énergie sont d'importantes consommatrices de cuivre, et le développement industriel mondial doit normalement se traduire par une augmentation de la consommation de cette matière première. Or des études récentes(\*) ont fait apparaître que les réserves identifiées, économiquement exploitables dans le monde entier, sont de cinquante (50) ans environ au rythme actuel de la consommation.

Par contre en ce qui concerne l'aluminium, on évalue à trois cent (300) ans les réserves possibles à partir de la bauxite.

Sur le plan économique, l'utilisation de l'aluminium dans le domaine se justifie pleinement. A titre d'exemple, on peut indiquer que le prix au Km d'un câble en aluminium à trois conducteurs de 240 mm<sup>2</sup> est 23% plus faible que celui d'un même câble en cuivre de 150 mm<sup>2</sup>.

De plus, on peut constater que le bilan énergétique de fabrication des produits semi finis est plutôt favorable à l'aluminium, puisqu'on évalue à 40500 thermies l'énergie nécessaire pour produire une tonne d'aluminium alors que 44500 thermies environ sont nécessaires pour produire les deux tonnes de cuivre équivalentes .

Sur le plan technique, la résistivité de l'aluminium est 1,6 fois plus élevée que celle du cuivre. En conséquence pour avoir une résistance linéique comparable, un conducteur en aluminium devra avoir une section 1,6 fois supérieure à celle d'un conducteur en cuivre, mais la masse spécifique de l'aluminium est 3,3 fois inférieure à celle du cuivre .

Il en résulte qu'un conducteur en aluminium est deux fois plus léger qu'un conducteur en cuivre, de même résistance linéique.

Enfin, la chaleur spécifique de l'aluminium est 2,3 fois supérieure à celle du cuivre .

### Comparaison Al-Cu .

Parmi les composants constituant le câble, le conducteur représente un pourcentage important du coût du câble, pouvant atteindre 30% du prix total dans le cas d'un conducteur en cuivre.

(\*): Laboratoire centrale des industries électriques  
IE-79-100 (FRANCE)

Tableau comparatif :

| résistivité<br>à 20°C<br>( $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2 / \text{cm}$ ) | température<br>de fusion<br>(°C) | chaleur de<br>fusion<br>(KJ/Kg) | densité<br>(Kg/m <sup>3</sup> ) | prix Fr/Km<br>(1974)                  |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| $\rho = 1,72$                                                            | 1083                             | 205                             | d=8900                          | c = 10 à 16,<br>fil de 3 mm           |
| $\rho = 2,83$                                                            | 658                              | 388                             | d=2700                          | c = 5 à 6<br>fil de 3 mm <sup>2</sup> |

\* Critère de comparaison à même capacité de transport, en prenant comme référence l'aluminium.

|                                                                     | Cuivre  | Aluminium |
|---------------------------------------------------------------------|---------|-----------|
| $\rho \cdot d \cdot c$ à même<br>niveau de pertes                   | 4 à 6   | 1         |
| $\sqrt{\rho \cdot d \cdot c}$<br>à l'optimum<br>technico-économique | 2 à 2,4 | 1         |

Le coût de conducteurs ayant une même capacité de transport, varie si l'on ne tient pas compte de leur mise en oeuvre, comme le produit (résistivité x densité x coût au Kg). L'examen du tableau comparatif montre, en se basant sur ce critère, l'intérêt de l'aluminium. Toute fois l'utilisation de ce critère s'avère insuffisante pour apprécier l'intérêt de ces métaux.

L'utilisation d'un métal à plus forte résistivité que <sup>le</sup>cuivre nécessite en effet une section de conducteur plus importante, cette augmentation de la section se répercute sur le coût de l'isolation électrique, de la gaine .....

A titre d'exemple, contrairement aux conclusions résultants de l'utilisation du critère précédent, nous pouvons indiquer que le prix de revient d'un câble 225 KV 300 MVA isolé au polyéthylène de 1200 mm<sup>2</sup> AL est de 23% inférieur au prix du même câble quand sa section est de 805 mm<sup>2</sup> en cuivre



Section nécessaire pour l'échauffement en régime permanent " S<sub>op</sub> "

L'intensité maximale admissible en régime permanent, ou capacité de transport, est l'intensité qui provoque à l'état d'équilibre thermique, l'échauffement de l'âme à la valeur permise. Cette intensité dépend essentiellement des conditions d'installation et d'ambiance dans lesquelles le câble sera utilisé.

Si ces conditions diffèrent de celles de références (normes), on calculera l'intensité fictive

L'intensité fictive, est qui provoquerait le même échauffement de l'âme que l'intensité à transporter si la liaison était installée dans les conditions normalisées.

Connaissant l'intensité fictive, on déterminera la section " S<sub>op</sub> " correspondante.

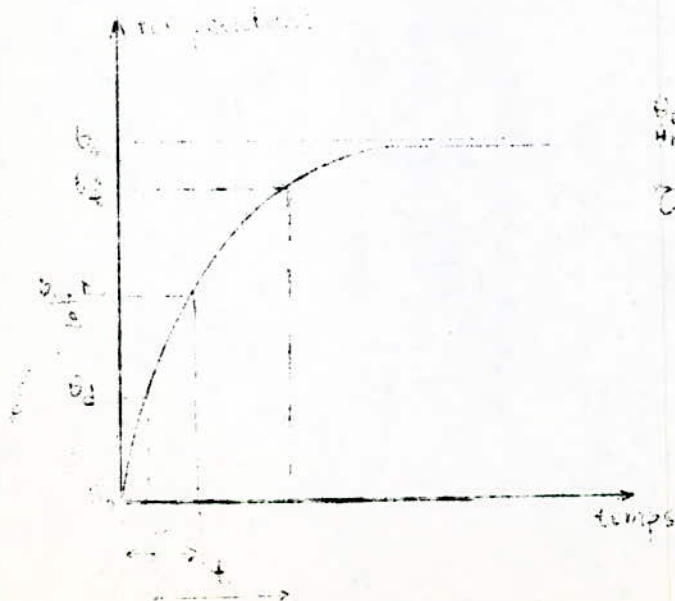
Section nécessaire pour l'échauffement en régime variable " S<sub>ov</sub> "

La variation de la charge liaison peut revêtir deux formes :

- régime cyclique : variation de l'intensité en fonction du temps, selon un cycle déterminé se répétant périodiquement que l'on peut représenter par un diagramme de charge.
- surcharge.

Dans les deux cas, la connaissance de la loi d'échauffement du câble est nécessaire.

Une représentation simplifiée, permettant une estimation très approximative, consiste à assimiler l'échauffement de l'âme, sous l'effet d'une intensité constante, à une branche d'hyperbole



- $\theta_0$ : température ambiante
- $\theta_2$ : température atteinte à l'état d'équilibre pour l'intensité considérée.
- $\tau$ : durée représentant le temps nécessaire pour atteindre 50% de l'échauffement correspondant au régime permanent. Elle dépend essentiellement des conditions de diffusion de la chaleur dans le câble et de sa dissipation dans le milieu environnant.

$$\theta(t) = \theta_0 + (\theta_2 - \theta_0) \frac{t}{t + \tau}$$

La loi d'échauffement permet d'obtenir ainsi la température de l'ame  $\theta_c$  consecutive à l'application d'une intensité donnée pendant une durée  $T$ , à partir d'un état initial dans lequel la température de l'ame est " $\theta_j$ ".

Section nécessaire en cas de court-circuit  $S_c$ .

Dans le dispositif de sécurité de toute installation de transport d'énergie, un retard est volontairement prévu pour éviter des coupures lors de court-circuits fugitifs. Le câble doit donc résister à une intensité plus grande, que celle prévue dans le régime normal, pendant le temps correspondant au réglage du relais temporisé.

La température maximale admissible au niveau de l'ame, pendant une surcharge n'excédant pas 5 secondes est  $\theta_c = 250^\circ\text{C}$ . (2).

Pour la détermination de  $S_c$  on doit connaître, en plus de  $\theta_c$  ;

- L'intensité de surcharge durant le court-circuit :  $I_c$
- La température de l'ame avant le court-circuit :  $\theta_c$  (°C)  
( on prend en général, la température maximale admissible :  $90^\circ\text{C}$  pour notre cas ).
- La durée du court-circuit  $T$  (secondes) .

$I_c$  et  $T$  sont des données qui dépendent du réseau et des dispositifs de protection .

Connaissant  $I_c$  et la densité de courant  $d$  on aura  $S_c = \frac{I_c}{d}$

La densité de courant  $d$  est donnée dans le tableau 5 .

| durée de la sur charge (s)         | 0,2 | 0,5 s | 1 s | 2  |
|------------------------------------|-----|-------|-----|----|
| ame en cuivre à $90^\circ\text{C}$ | 310 | 196   | 139 | 98 |

Tableau 5 : densité de courant lors d'un court-circuit

Pour un calcul approché, on peut également appliquer la formule suivante :

$$S_c \text{ ( mm}^2 \text{ )} = \frac{I_c}{K \sqrt{\frac{\theta_c - \theta}{t}}}$$

$K$  : constante qui dépend du métal constituant l'ame .



Cas du regime cyclique : "S<sub>ev1</sub>"

A partir du diagramme de charge et de la courbe d'échauffement correspondant aux différentes intensités envisagées : Une première approximation de la section peut être obtenue à l'aide de l'intensité quadratique . Celle - ci est l'intensité fictive , dont le transport en permanence provoquerait les mêmes pertes thermiques que le regime de charge envisagé.

$$\text{Elle est donnée par : } I_f = \sqrt{\frac{\sum I_i^2 t_i}{\sum t_i}}$$

I<sub>i</sub> et t<sub>i</sub> sont les intensités et les durées correspondant aux périodes successives du cycle .

Connaissant I<sub>f</sub> on en déduira S<sub>ev1</sub>

Cas d'une surcharge : " S<sub>ev2</sub> "

A l'aide de la loi d'échauffement correspondant à l'intensité de surcharge , on détermine , à partir de la température de l'âme avant l'application de la surcharge , la température atteinte en fin de surcharge . Celle - ci ne doit pas dépasser la valeur maximale admissible pour l'isolant .

Les différents paramètres sont liés par :

$$t_s = \frac{(\theta_s - \theta_o) (\theta_f - \theta_j)}{(\theta_s - \theta_f) (\theta_s - \theta_j)}$$

- t<sub>s</sub> : durée de surcharge admissible ( min )
- : durée pour atteindre 50% de l'échauffement permanent . ( min )
- θ<sub>j</sub> : température de l'âme avant le surcharge . ( °c )
- θ<sub>s</sub> : température admissible sur l'âme en fin de surcharge ( °c )
- θ<sub>f</sub> : température de l'âme correspondant au transport en permanence de l'intensité de surcharge ( °c )
- θ<sub>o</sub> : température ambiante .





