

7/80

2 ex

**U. S. T. H. B.**

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE ET D'ÉLECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

الجامعة الوطنية للعلوم والتقنية  
المكنية  
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHÈQUE

**ÉTUDE DE LA TECHNOLOGIE DE FABRICATION  
D'UN CABLE 30 KV A CHAMP RADIAL ISOLÉ  
AU PAPIER IMPREGNÉ**

PROPOSÉ PAR :  
W. MICHALAK  
Professeur à L' E. N. P. A.

ETUDIE PAR :  
M. A. HANDALA  
M. IMACHE

## REMERCIEMENTS.

Nous remercions vivement M. W. MICHALAK et tout le Personnel du Laboratoire d'essais de la Câblerie SONELEC pour l'aide précieuse qu'ils nous ont apportée dans l'élaboration de ce projet.

**U. S. T. H. B.**

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE ET D'ÉLECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

**ÉTUDE DE LA TECHNOLOGIE DE FABRICATION  
D'UN CABLE 30 KV A CHAMP RADIAL ISOLÉ  
AU PAPIER IMPREGNÉ**

PROPOSÉ PAR :

W. MICHALAK

Professeur à L' E. N. P. A.

ETUDIÉ PAR :

M. A. HANDALA

M. IMACHE

DEDICACES.

A la mémoire de ma mère.

A ma famille.

A mes amis.

Mohand Amokrane HANDALA.

A la mémoire de mon père.

A ma mère.

A mes frères et soeurs.

A mes oncles

Mohamed IMACHE.

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

- Dans le transport et la distribution de l'énergie électrique, on utilise deux types de lignes :

- ligne aérienne constituée par des conducteurs nus, posés sur des isolateurs fixés à des poteaux.
- Câble- souterrain constitué par des conducteurs isolés sur toute leur longueur et réunis dans une enveloppe commune convenablement protégée.

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

Dans les grandes villes, la distribution d'énergie électrique est réalisée par câbles souterrains moyenne tension.

En Algérie, le réseau de distribution souterrain tend à être uniformisé en 30 KV.

Notre étude portera sur un câble 30 KV isolé au papier imprégné fabriqué par la Câblerie Sonelec de Gué de Constantine. Nous décrirons le processus de fabrication adopté, nous analyserons ensuite les différents constituants du câble et enfin nous ferons l'étude du câble fini ( étude théorique et essais dans le Laboratoire haute tension existant au sein de cette Câblerie).

I - ETUDE DU PROCESSUS DE FABRICATION  
DU CABLE

A - LAMINAGE.

Le cuivre électrolytique à l'état pur ( $\approx 99,99\%$ ) est importé sous forme de lingots de 120 Kg et de 1,20 m de long.

Le lingot est chauffé ( $t \approx 800^{\circ}\text{C}$ ) dans un four jusqu'à l'état de déformation plastique. Il passe ensuite à travers les cages d'un dégrossisseur. Après dix passes, sa section se trouve considérablement diminuée. On l'engage alors dans la première cage du train de laminoir à cannelures. Après avoir traversé les huit cages du train de laminoir, le fil sort avec un diamètre de 8 mm pour être enroulé sous forme de bottes.

B - DECAPAGE.

Durant l'opération de laminage à chaud et à l'air ambiant, le fil se recouvre d'une couche d'oxyde qu'on doit soigneusement enlever en raison de la dureté et de l'absence de plasticité des oxydes métalliques.

Cette opération se fait par attaque chimique =

Les bottes de fil dont successivement

- plongées dans un bain d'acide sulfurique dilué,
- lavées sous un jet d'eau,
- replongées dans une solution de crème de tartre et d'eau.
- et finalement immergées dans un bain de borax et d'eau.

On obtient alors du fil prêt à être tréfilé ( fil machine).

Pour éviter des enfilages fréquents sur les tréfileuses, on soude bout à bout sur une soudeuse électrique les bottes de fil que l'on enroule ensuite sur bobine.

### C - TREFILAGE.

Le tréfilage dont l'étymologie implique à la fois la notion de traction et celle de fil, est un procédé qui utilise la plasticité des métaux pour les transformer en fil, grâce à un effort de traction continu.

#### 1°) MACHINE DE TREFILAGE.

##### a) Organes principaux d'une tréfileuse:

- Le dévidoir sur lequel les bottes de fil sont disposées avant le tréfilage.
- la filière qui est l'outil de travail
- la bobine sur laquelle le fil s'enroule après tréfilage.

##### b) Filières :

Elles sont généralement en carbure de tungstène ou, plus rarement, en diamant ( à cause de leur prix élevé, l'emploi de ces dernières est limité aux fils de faible diamètre  $\varnothing \approx 0,15 \text{ mm}$ )

La fig. I de la page 6 nous montre le schéma d'une filière.

#### 2°) PRINCIPE DU TREFILAGE.

La filière possède un orifice calibré qui impose sa forme et ses dimensions au fil et évite la cassure de ce dernier. En appliquant plusieurs tractions répétées à travers une série de filières, on peut obtenir un fil de diamètre très réduit. C'est ainsi qu'on transforme le fil machine en fil de câblage.

On choisit les filières et la vitesse de tréfilage suivant le diamètre que l'on désire obtenir. La vitesse de tréfilage est d'autant plus grande que le diamètre du fil à obtenir est faible.

Ordre de grandeurs des vitesses de tréfilage :

Pour un type de tréfileuse utilisée par Sonelec on a =

$\emptyset = 1,35 \text{ mm}$  ( plus petit diamètre obtenu ) pour une vitesse  
( sur cette machine )  $V = 30 \text{ m/S}$

$\emptyset = 3,22 \text{ mm}$  ( ..... ) pour une vitesse  
 $V = 7 \text{ m/S}$

### 3°) LUBRIFICATION.

Les énormes pressions mises en jeu dans les opérations de tréfilage et les grandes vitesses de tréfilage exigent des lubrifiants de bonne qualité, qui préservent le cuivre de l'oxydation et limitent au maximum l'usure des filières.

### 4°) TRAITEMENTS THERMIQUES.

Le fil tréfilé subit un recuit qui abaisse sa dureté et lui confère une aptitude élevée au pliage et à la torsion.

Deux procédés de traitement sont utilisés :

- 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 avant de sortir de la tréfileuse pour être enroulé sur une bobine, prêt à être câblé.

- Traitement en pots fermés : les bobines de fil dur sont recuites dans des pots fermés, sous vide pour éviter l'oxydation.

Dans les deux procédés de recuit, la température et la durée du chauffage sont d'autant plus grandes que le diamètre du fil à traiter est grand.

REMARQUE : Le deuxième procédé étant très lent, il n'est utilisé que dans le cas de tréfileuses non dotées du système de traitement continu.

#### D - CABLAGE.

Jusqu'à une section de quelques millimètres carrés, on emploie parfois des conducteurs massifs, mais le plus généralement, les âmes conductrices des câbles sont réalisées par plusieurs brins toronnés formant ainsi ce qu'on appelle un conducteur câblé. Le but de cette subdivision du conducteur est de lui conférer la souplesse requise pour sa manipulation et son bon comportement en service. Les conducteurs sont en effet exposés à des sollicitations mécaniques qu'ils supporteront mieux s'ils ne sont pas massifs.

##### 1°) NOMBRE ET DISPOSITION DES BRINS:

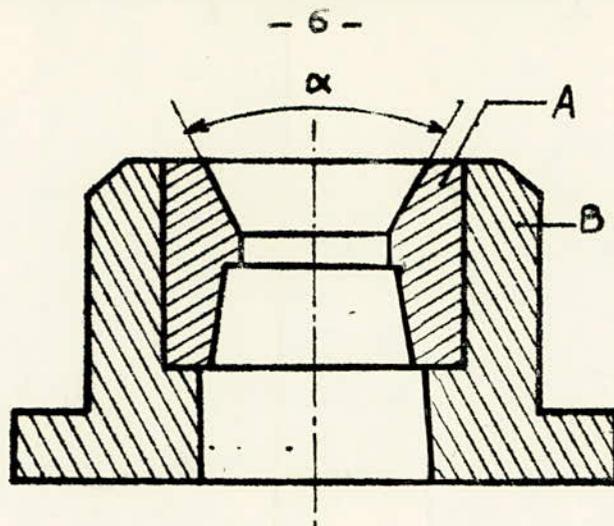
On câble les brins en couches régulières comprenant 1, 7, 19, 37, 61, 127 brins suivant la section à obtenir et le degré de souplesse exigé.

Les diamètres des conducteurs correspondants sont :  
 $d, 3d, 5d, 7d, \text{etc...}$  d'étant le diamètre d'un brin.

La fig.2 page 6 nous donne la disposition des brins.

##### 2°) CHOIX DU PAS ET SENS DU PAS DE CABLAGE :

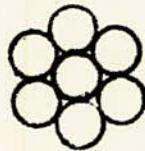
Le choix du pas est basé sur un compromis entre deux considérations : d'une part, il ne peut être trop grand, car il y aurait danger que les brins se séparent spontanément lorsqu'on enroule ou déroule le câble ;



A : filière  
 B : porte filière  
 $\alpha$  : angle  
 d'ouverture  
 de la filière

$$12^\circ \leq \alpha \leq 16^\circ$$

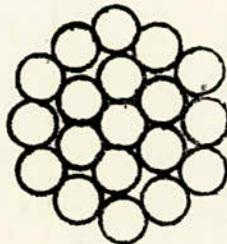
Fig.1 Schéma d'une filière



- 7 brins (1 conducteur central + une couche de 6 brins)

Fig.2

- 19 brins (1 conducteur central + une couche de 6 brins  
 + une couche de 12 brins)



- 37 brins = 1 + 6 + 12 + 18

- etc ...

d'autre part, il ne peut non plus être trop petit, car ceci majorerait la résistance du conducteur, la longueur réelle des brins devenant alors fort supérieure à celle du câble. On adopte en général un pas d'environ 12 à 18 fois la diamètre du conducteur.

Le deuxième point concerne le sens du pas de câblage: pour les câbles où plusieurs couches sont disposées autour d'un brin central, il sera indispensable de donner aux couches successives des pas de sens opposés, ceci également afin de réduire la tendance au décablage.

## E - ISOLATION.

La fonction de toute isolation est d'assurer la séparation électrique entre deux conducteurs portés à des potentiels différents.

Le procédé d'isolation consiste à enrouler en hélice plusieurs bandes de papier sur le conducteur jusqu'à obtenir l'épaisseur que l'on désire et à imprégner d'huile isolante cette couche de papier.

### 1°) RUBANAGE.

Cette opération est réalisée sur une machine dite rubaneuse. Celle-ci a plusieurs têtes, chacune pouvant porter dix galettes de papier. Deux têtes successives tournent dans des sens opposés. Ainsi on peut enrouler jusqu'à dix couches de papier dans un sens et les dix couches suivantes dans le sens opposé.

#### a) Semi - conducteur.

Pour les câbles à tension spécifiée supérieure à 11600 V, la première couche de papier, qui vient directement en contact avec le cuivre, est un papier semi-conducteur destiné à former un écran anti-décharges.

Le rubanage de ce papier est effectué avec un léger recouvrement entre spires successives.

b) Papier Isolant.

Sur la couche semi-conductrice, on rubane plusieurs bandes de papier isolant de 10 à 30 mm de largeur et de 0,06 à 0,15 mm d'épaisseur. Elles sont enroulées en hélice par couches superposées de façon à obtenir la structure feuilletée de la fig. 3 page 12 .

Les spires d'une bande de papier doivent recouvrir le déjoint de la bande placée en dessous et, par conséquent, recouvrir en partie deux spires de cette bande.

L'épaisseur de l'isolant et, par conséquent, le nombre de couches de papier est fonction des paramètres électriques et diélectriques du câble.

Les deux dernières bandes portent un numéro ( 1,2,3 ou 4) permettant le repérage du conducteur.

c) Papier Métallisé.

Pour réaliser un champ radial autour du conducteur, on dispose autour de l'isolant une couche de papier métallisé en contact électrique avec la gaine de plomb, donc au potentiel du sol.

Pour permettre l'imprégnation, l'écran métallisé est perforé de petits trous sur toute sa surface.

d) Imprégnation du papier.

Le papier peut contenir jusqu'à 10 % de son poids d'humidité. Pour faire un bon isolant, il faut :

- enlever complètement cette humidité ainsi que l'air emprisonné entre les diverses couches de papier.
- Remplacer l'humidité et l'air par une matière isolante convenablement choisie; de façon que le papier soit complètement imprégné.

Le câble enroulé dans un panier métallique est d'abord placé dans une cuve chauffée à 120°C environ, où l'on effectue une dépression ( 0,5 mm de mercure ).

Le séchage du papier est réalisé en maintenant la dépression entre 0,5 et 0,2 mm de Hg pendant environ 24 heures. Lorsque le papier est complètement desséché, on met la cuve en communication avec un réservoir rempli de matière isolante chaude déshydratée et dégazée. La cuve se remplit ainsi par aspiration. La matière isolante pénètre alors dans le câble par capillarité à travers le papier.

Après l'admission de la matière isolante, qui dure environ deux heures, l'imprégnation proprement dite, sous une pression de 0,5 à 0,2 mm de Hg, s'effectue pendant environ une centaine d'heures. Cette opération terminée, on "casse" le vide et on arrête le chauffage. Lorsque le bain revient à la température de 90°C environ, on sort les paniers de la cuve.

et on les laisse refroidir jusqu'à la température ambiante. Une fois la matière d'imprégnation devenue pâteuse, on sort le câble à l'air libre sans que l'imprégnant s'écoule, mais il importe de le mettre rapidement à l'abri de l'humidité en revêtant le câble de son enveloppe étanche, qui est le plus souvent en plomb.

A titre d'exemple nous donnons ci-dessous les différentes opérations de l'imprégnation d'un câble :

- section - - - - - 1 x 70 mm<sup>2</sup> Cuivre rond
- tension spécifiée - - 17,5 KV
- metrage - - - - - 100 m

OPERATIONS	Durée
1- Mise en cuve . . . . .	1 h
2- Chauffage jusqu'à obtenir 100°C au centre du panier. . . . .	23 h
3- Montée du vide à 0,5 mm de Hg. . . . .	42 h
4- Séchage sous 0,5/0,2 mm de Hg. . . . .	24 h
5- Admission de la matière d'imprégnation . . . . .	2 h
6- Imprégnation sous 0,5/0,2 mm de Hg. . . . .	108 h
7- Casse du vide et arrêt du chauffage . . . . .	2 h

8- Sortie de cuve lorsque le couple thermoélectrique le plus chaud est voisin de 90°C ( 3 couples thermoélectriques nous donnent la température au fond, au centre et à la surface du panier).

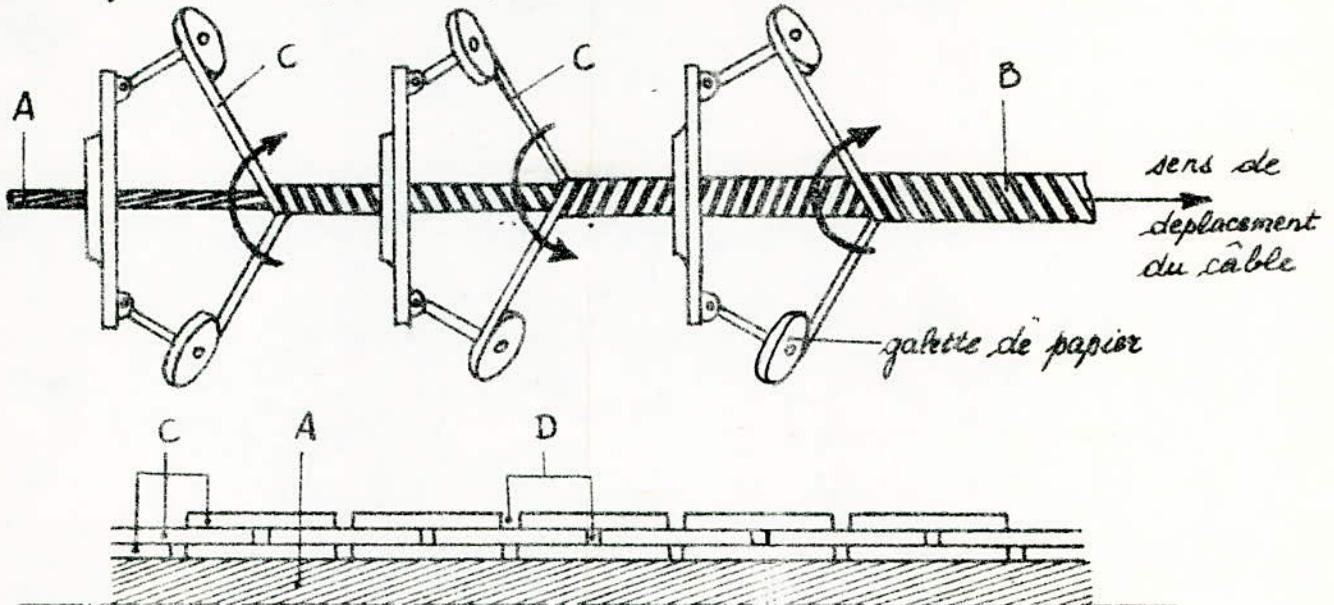
#### F- REVETEMENT.

Le revêtement est constitué par l'ensemble des couches en matériaux appropriés, destinées à donner au câble une forme déterminée et à assurer sa protection contre les dégradations extérieures. Les parties de ce revêtement, qui forment un tube de matière continue, reçoivent le nom de gaine.

##### 1°) Mise sous gaine de plomb.

Une gaine de plomb constitue autour du conducteur une protection contre l'humidité. La mise sous plomb se fait au moyen d'une presse hydraulique. Le plomb est fondu à environ 380°C et versé dans une chambre où il est maintenu à une température de 200°C. Le câble passe dans cette chambre et sort à travers une filière dont on choisit le diamètre pour donner à la gaine de plomb l'épaisseur désirée.

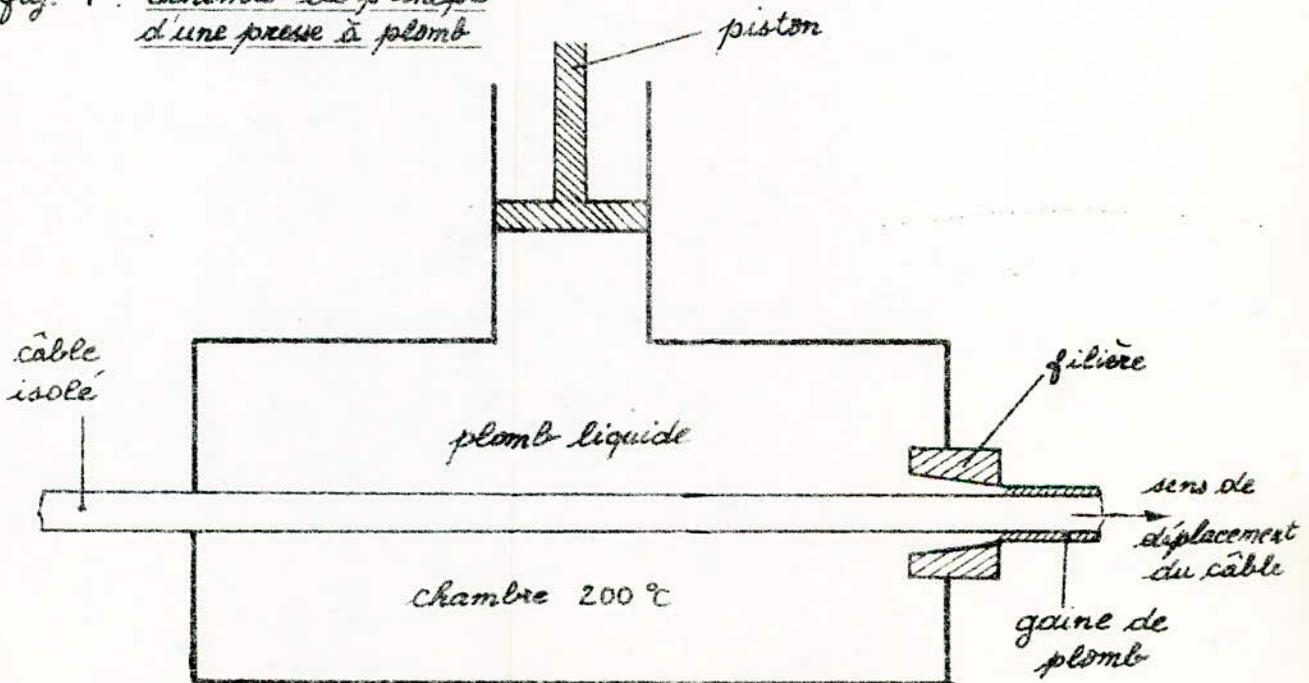
fig. 3: Rubanage du papier et structure de l'isolant



A : conducteur cuivre  
B : conducteur isolé

C : rubans de papier  
D : déjoints

fig. 4 : Schéma de principe d'une presse à plomb



L'Armure est constituée par deux feuillards en acier enroulés sur le câble, dans le même sens, en spires non jointives de façon à laisser au câble assez de souplesse.

Le feuillard de la couche supérieure doit recouvrir les intervalles laissés entre les spires de la première couche.

#### 5°) Revêtement extérieur.

Pour empêcher la destruction du feuillard par l'oxydation, on recouvre les deux rubans d'acier par un matelas de jute goudronné.

Enfin, le tout est recouvert d'un enduit de craie traitée afin d'agglomérer les fils de jute du matelas extérieur, d'éviter que ces fils ne se déroulent et laissent le feuillard à nu, et de faciliter la manipulation du câble lors de la pose.

La fig. 5 de la page 14 nous montre un câble triplomb fini.

Le câble fini est enroulé sur un tourêt et envoyé au laboratoire pour subir les essais recommandés par les normes. Après quoi, les extrémités du câble sont soigneusement recouvertes à l'aide de capuchons en plomb, soudés sur le feuillard ; ceci pour éviter toute pénétration d'humidité lors du stockage.

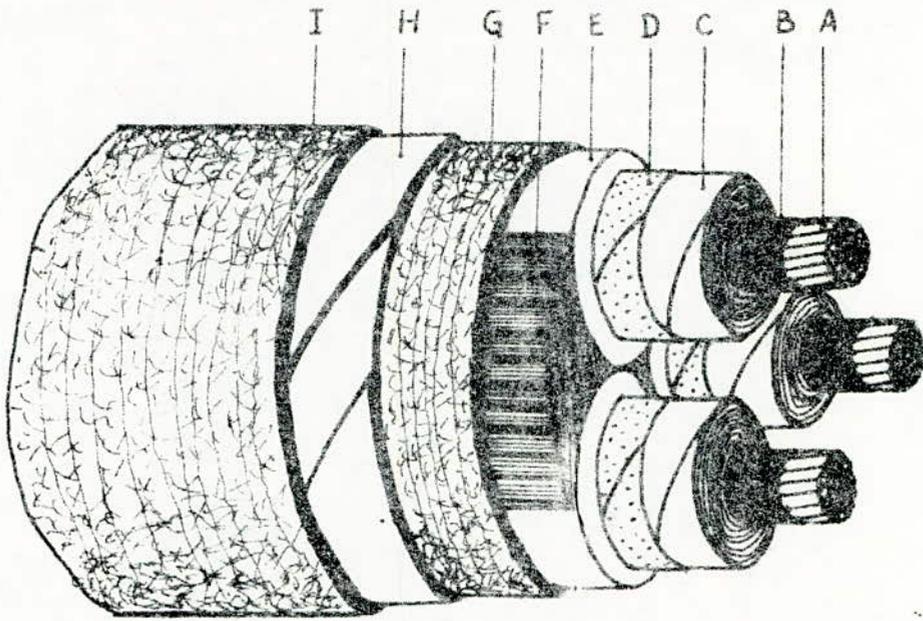
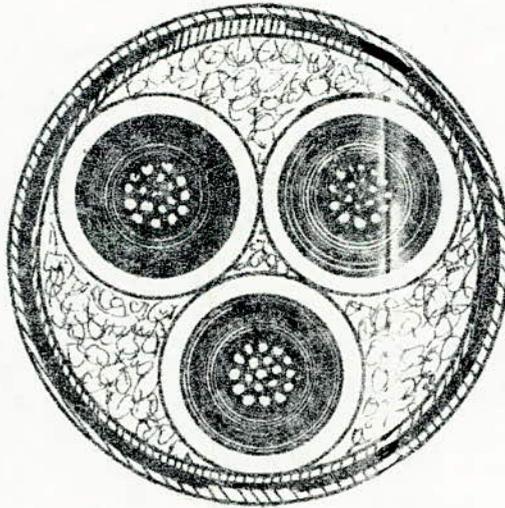
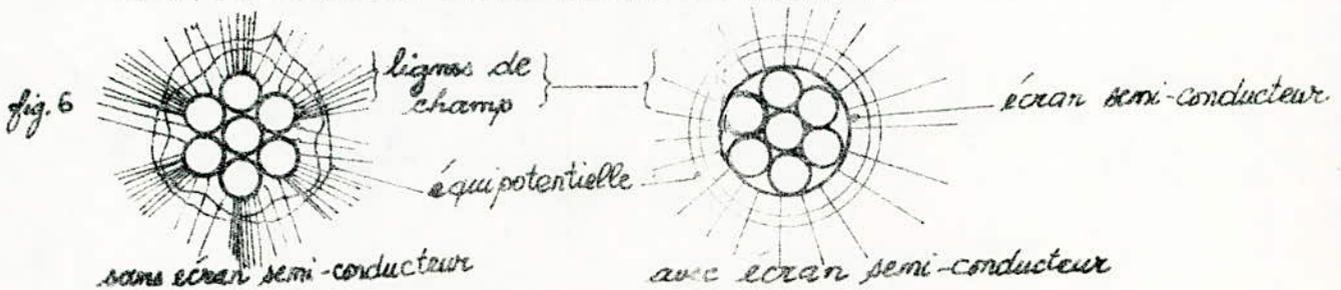


fig.5: Parties constitutives d'un câble triplomb.

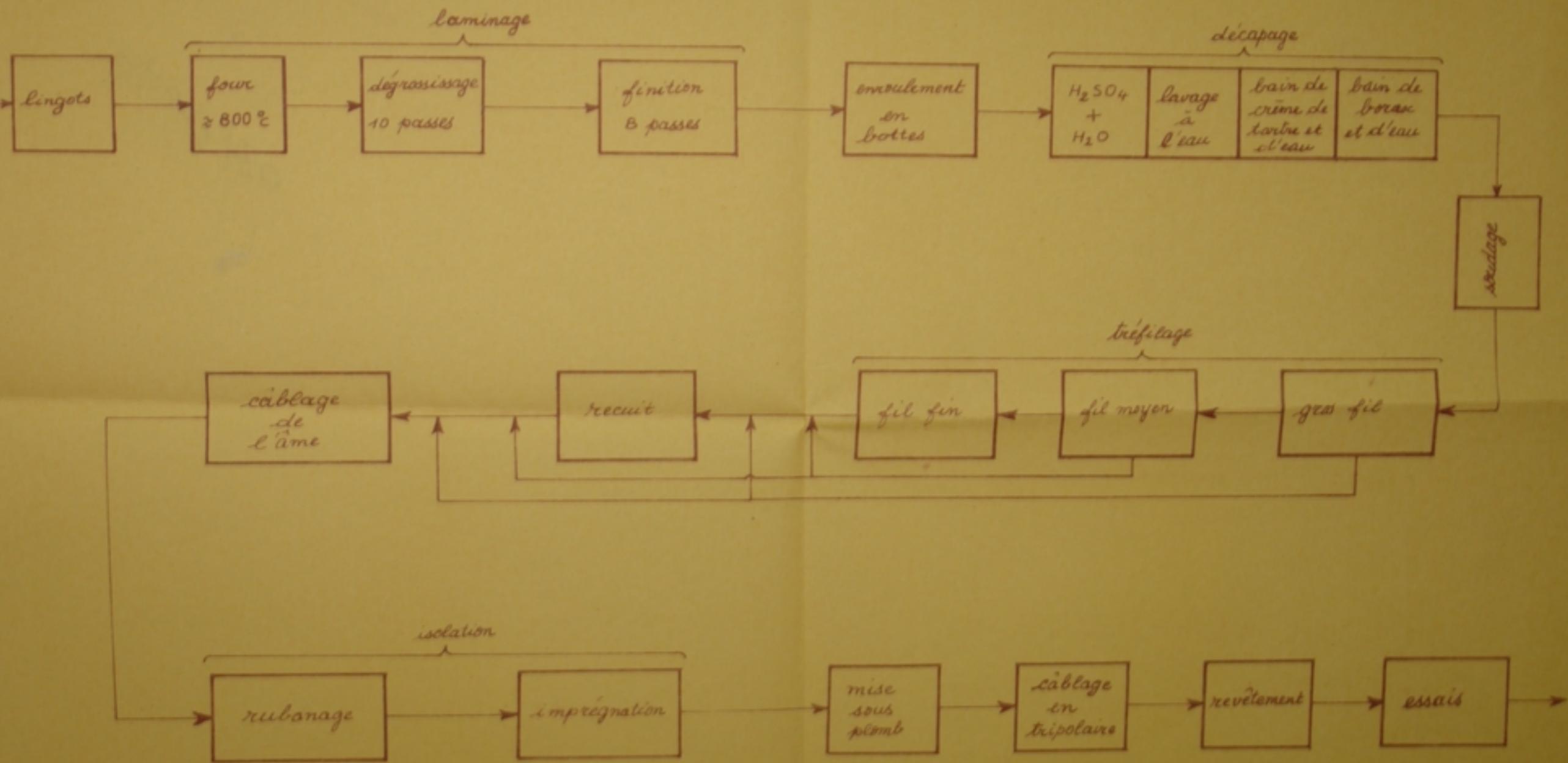
- A : âme conductrice
- B : écran semi-conducteur
- C : papier isolant
- D : écran métallique
- E : gaine de plomb
- F : bourrage en jute
- G : matelas en jute goudronné
- H : feuillets
- I : revêtement extérieur en jute goudronné.



Coupe à travers un câble triplomb.



# ORGANIGRAMME DU PROCESSUS DE FABRICATION D'UN CABLE TRIPOLAIRE



## II - PROPRIETES DES MATERIAUX UTILISES DANS LA FABRICATION DU CABLE.

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 donnons ci-dessous les principales propriétés et caractéristiques, conformes aux normes, que doivent avoir ces différents éléments pour donner au câble une bonne tenue aux contraintes auxquelles il sera soumis durant le service.

### A - AME CONDUCTRICE.

Le cuivre utilisé en électrotechnique est de haute pureté, généralement pas en dessous de 99,9 %. Cette catégorie présente la conductivité maximale. Le cuivre est le deuxième conducteur après l'argent dans les valeurs de conductivité.

La surface du conducteur ne doit présenter ni pailles, ni bavures. Elle doit être propre et débarrassée de toute trace d'oxyde et autres impuretés.

Le cuivre électrotechnique recuit qui constitue l'âme du conducteur doit satisfaire aux spécifications internationales données par la norme NFC 30 - 010 (1).

(1) NFC 30-010 = Norme établie par l'UTE. (Union Technique de l'Électricité) et homologuée par AFNOR ( Association Française de Normalisation) Sonelec fabrique ses câbles en se référant essentiellement aux normes françaises.

La lettre C suivie d'un numéro et d'un groupe de 3 chiffres désigne les règles de l'UTE.

Les lettres NF placées en avant indiquent que le règlement a été homologué par AFNOR, lui donnant ainsi un caractère officiel.

1°) Principales caractéristiques du cuivre.

- Résistivité à 20°C ( ohm mm<sup>2</sup>/m . . . . . 0,01724
- Coefficient de variation de la résistance ( ( par °c) . . . . . 0,00393
- Résistance à la rupture( daN/mm<sup>2</sup>) . . . . . 22 à 25
- Allongement à la rupture ( %) . . . . . 30 à 35
- Masse volumique à 20°C ( Kg/dm<sup>3</sup>) . . . . . 8,89
- Coefficient de dilatation linéaire (par °c). . 0,000017

2°) Section de l'âme.

La section d'un conducteur est le produit du nombre de brins par la section d'un brin.

Les sections nominales des âmes conductrices sont définies et réparties en 6 classes, dans l'ordre de souplesse croissante, par la norme NFC 32-012. Les sections nominales 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.

B - PAPIER SEMI-CONDUCTEUR.

C'est un matériau à résistivité intermédiaire placé entre l'isolant et le conducteur.

La concentration du champ électrique sur les irrégularités de surface de l'âme ( effet de brin) pourrait être préjudiciable à la bonne tenue, en service, de l'isolant. Pour éviter cette concentration, on utilise un écran semi-conducteur destiné à créer une surface équipotentielle autour de l'âme ( fig. 6 page 14 ). Il est réalisé, en général, à base de matériaux appartenant à la même famille que l'isolant.

## C - ISOLANT.

La partie la plus déterminante et la plus délicate dans la construction d'un câble souterrain est l'isolation. Du choix de l'isolant et des soins apportés dans cette opérations dépendront les caractéristiques diélectriques du câble. Dans les câbles haute tension et très haute tension, l'isolation au papier imprégné est actuellement la plus répandue.

Les papiers sont obtenus à partir de fibres végétales broyées. Il existe une grande variété de papier de cellulose naturelle parmi lesquelles nous retenons pour notre cas le papier dit " kraft " obtenu à partir de pulpe de bois ( pin et sapin ) traitée à la soude et au sulfate pour débarrasser la cellulose pure de la lignine.

### 1°) Propriétés du papier non imprégné.

Bien que ces propriétés soient profondément modifiées quand le papier se trouve imprégné, elles conditionnent néanmoins la mise en oeuvre et la tenue en service de l'isolation à laquelle le papier est destiné.

Les caractéristiques les plus importantes du papier non imprégné sont :

#### a°) Epaisseur.

Les déjoints ( intervalles entre spires d'une couche de ruban de papier fig. 3 page 12 ) qui constituent le point le plus faible dans l'isolation d'un câble haute tension sont le siège d'importants dégagements de chaleur dans tous les cas, qu'ils soient partiellement remplis de gaz ou d'huile. Pour limiter la hauteur de ces déjoints, il est recommandé d'utiliser des papiers de faible épaisseur. Mais ceci nous donne un ensemble diélectrique fortement stratifié pouvant, par conséquent, être favorable à l'introduction d'une plus grande quantité d'impuretés lors du rubanage et de l'imprégnation quand ces opérations n'ont pas été soigneusement réalisées.

Les papiers de câbles ont une épaisseur de 0,075 à 0,2 mm et une largeur variant de 15 à 30 mm en fonction du diamètre du câble ( norme NFC 33-100).

b°) Masse volumique et perméabilité à l'air.

On considère le plus souvent la masse au mètre carré d'un papier ( grammage) au lieu de la masse volumique. La masse volumique et la perméabilité à l'air sont des caractéristiques particulièrement importantes à considérer dans la mesure où le papier, une fois imprégné, doit supporter une tension élevée et assurer une bonne tenue, spécialement aux ondes de choc.

Le papier " kraft " utilisé pèse 100 g au mètre carré. En général, les papiers de câbles ont des ~~masses~~ masses volumiques faibles 0,7 à 1 g/cm<sup>3</sup>.

c°) Hygroscopicité.

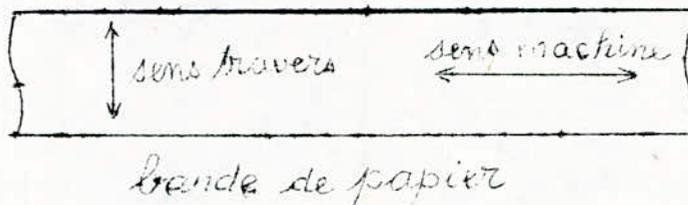
Le papier " Kraft" a une hygroscopicité très remarquée. Sa teneur en eau peut aller jusqu'à 20 % et influe beaucoup sur ses propriétés. L'optimum des propriétés mécaniques correspond à une teneur en eau de 6 à 8 %. La résistance à la traction qui a un rôle important lors du rubanage, augmente avec l'humidité. La valeur optimale correspond à un taux d'humidité d'environ 5 %. Cependant une teneur élevée en eau du papier est préjudiciable aux propriétés électriques et, de plus, elle accélère le vieillissement de l'isolant.

d°) Propriétés mécaniques.

Le papier doit avoir de bonnes propriétés mécaniques aussi bien pendant l'opération de rubanage qu'en service. Les principales sont :

- La résistance à la traction (définie par la norme NF Q 03-004).
- La résistance au déchirement ( définie par la norme NF Q 03-011).

Les conditions d'enroulement des papiers de câbles imposent des valeurs élevées de la résistance à la traction et de l'allongement à la rupture dans le sens machine, de même qu'une bonne résistance au déchirement dans le sens travers.



e°) Propriétés thermiques.

Nous devons prendre en considération la stabilité thermique du papier non imprégné afin d'éviter toute dégradation ( papier cassant) lors du sechage et du traitement sous vide.

REMARQUES.

Nous avons volontairement omis de parler des propriétés diélectriques du papier sec car celui-ci n'est soumis aux contraintes diélectriques qu'après imprégnation.

A titre d'indication, nous donnons ci-dessous quelques résultats d'essais effectués sur le papier sec "kraft" au laboratoire de chimie de la cablerie ( essais effectué selon les normes NFQ 03 -004 à NFQ 03 009)

Grammage (g/m <sup>2</sup> )	Epaisseur (mm)	Porosité	Humidité (%)	Allongement (%)	
				sens machine	sens travers
100	0,13	0,6	7,9	8,2	6,6

Longueur à la rupture (m)	
S.M	S.T.
5517	4581

## 2°) Propriétés de l'imprégnant.

Le papier non imprégné a des propriétés diélectriques médiocres, qui sont à peine supérieures à celles d'un film d'air de même épaisseur. Par contre, l'expérience a montré que les propriétés diélectriques d'une isolation au papier imprégné sont nettement meilleures.

Le choix de l'imprégnant est important puisque de lui dépendent les caractéristiques de l'isolation, c'est à dire principalement une bonne tenue à la tension, des pertes diélectriques faibles et une permittivité relative élevée.

Il existe plusieurs types d'imprégnants dont les huiles minérales, les huiles de synthèse, les diélectriques chlorés et les huiles d'~~origine~~ végétale.

Pour les câbles à moyenne tension isolés au papier imprégné de matière non migrante, on utilise généralement un mélange d'huile de naphte et de résine. Ce mélange d'imprégnation doit avoir des qualités de viscosité déterminées afin qu'à la température d'imprégnation, 120°C environ, il soit suffisamment fluide pour que l'imprégnation se fasse à coeur, et pour qu'aux températures les plus basses auxquelles le câble peut-être posé, il ne soit pas cassant.

Le composé d'imprégnation peut contenir un certain nombre de gaz et des impuretés solides qui sont néfastes à l'isolation du câble, car ils constituent des zones de faible rigidité diélectrique. Un taux d'humidité élevé est aussi préjudiciable à la bonne tenue de l'isolation.

L'imprégnant doit donc être desséché, dégazé et exempt de toute impureté afin qu'il atteigne des valeurs de rigidité diélectrique élevées.

Ordre de grandeur des principales caractéristiques des huiles pour câbles :

- Permittivité relative à 20 °C - - - - - 2,2 à 2,4
- Facteur de dissipation à 60°C - - - - - 0,001 à 0,005
- Résistivité thermique - - - - - 450° c cm/W.

3°) Propriétés<sup>du</sup> papier imprégné.

Les propriétés du papier et de l'huile sont modifiées quand ces deux constituants sont en présence.

Les principales sont la permittivité relative, la rigidité diélectrique et le facteur de dissipation diélectrique notamment en fonction d'un certain nombre de paramètres, parmi lesquels la température.

a°) Permittivité relative et facteur de dissipation.

Le papier imprégné peut être considéré comme une association, en série, de la cellulose et de l'imprégnant. La permittivité et le facteur de dissipation dépendent étroitement de la masse volumique du papier car elles sont beaucoup plus faible pour l'imprégnant que pour la cellulose.

Les pertes diélectriques diminuent avec la masse volumique, mais au delà d'une certaine limite, la tenue diélectrique risque d'être affectée.

La permittivité et le facteur de dissipation diélectrique du papier imprégné varient également avec sa teneur en eau. Celle-ci a, en particulier, une influence non négligeable sur ces caractéristiques avec la température, comme on peut le voir sur les fig. 7 et 8 page 23 .

b°) Rigidité diélectrique.

La rigidité diélectrique d'un papier à l'état imprégné est nettement améliorée par la présence de l'imprégnant. Elle augmente aussi avec la masse volumique et l'imperméabilité à l'air du papier.

Les irrégularités d'épaisseur du papier réduisent la tenue aux impulsions, mais cette réduction n'est pas importante pour des épaisseurs comprises entre 0,03 et 0,2 mm.

Un autre facteur important pour la tenue aux impulsions est la viscosité de l'imprégnant. Une viscosité élevée augmente en général la rigidité diélectrique mais en même temps elle réduit l'influence de la masse volumique. L'influence de la viscosité se traduit encore par un effet de la température : Une augmentation de cette dernière provoque, en effet, une diminution de la viscosité, et de ce fait, une réduction de la rigidité diélectrique.

#### 4°) Papier métallisé.

On réalise un écran métallique en enroulant autour de l'isolant une bande de papier métallisé ( avec une couche d'aluminium de 0,01 à 0,02 mm d'épaisseur) . Cet écran permet de créer une surface équipotentielle autour de l'isolant afin de supprimer la composante tangentielle du champ électrique. On obtient ainsi un champ radial ( les lignes de champ sont normales aux couches d'isolation).

Cette enveloppe métallique est perforée de nombreux petits trous laissant facilement pénétrer le compound d'imprégnation.

Cet écran, réuni au potentiel de la terre permet d'assurer l'écoulement des courants capacitifs et des courants de défaut à la terre ( court-circuit homopolaire), la protection des personnes et du matériel en cas de perforation du câble par un corp conducteur extérieur.

L'écran conducteur sert aussi à maintenir la surface de l'isolant au même potentiel que la gaine de plomb et d'éviter, en cas de mauvais contact ou de décollement de la gaine de plomb, des décharges partielles qui provoqueraient à plus ou moins longue échéance, la dégradation et le claquage de l'isolant.

En effet si un léger décollement ou interstice gazeux apparaît accidentellement entre la gaine de plomb et l'isolant ( dilatation plastique du plomb sous l'effet thermique) le champ électrique qui tend à se concentrer dans le milieu de plus faible permittivité risque d'atteindre, à cet endroit là, le seuil d'ionisation et ainsi amorcer des décharges partielles. La fig. 9 page 23 nous montre un décollement entre écran métallique et la gaine de plomb.

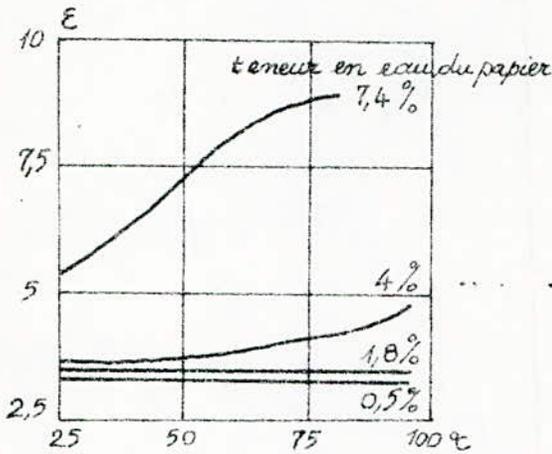


Fig. 7: Variation de la permittivité ( $\epsilon$ ) à 50Hz en fonction de la température dans le cas du papier Kraft imprégné d'huile neuve, pour 4 valeurs de la teneur en eau du papier. Champ 5 kV/cm.

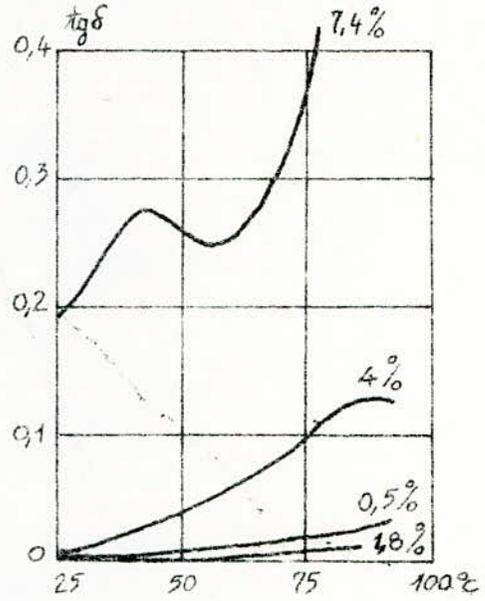


Fig. 8: Facteur de pertes ( $\text{tg}\delta$ ) en fonction de la température dans le cas du papier Kraft imprégné d'huile neuve, pour 4 valeurs de la teneur en eau du papier. Champ 5 kV/cm.

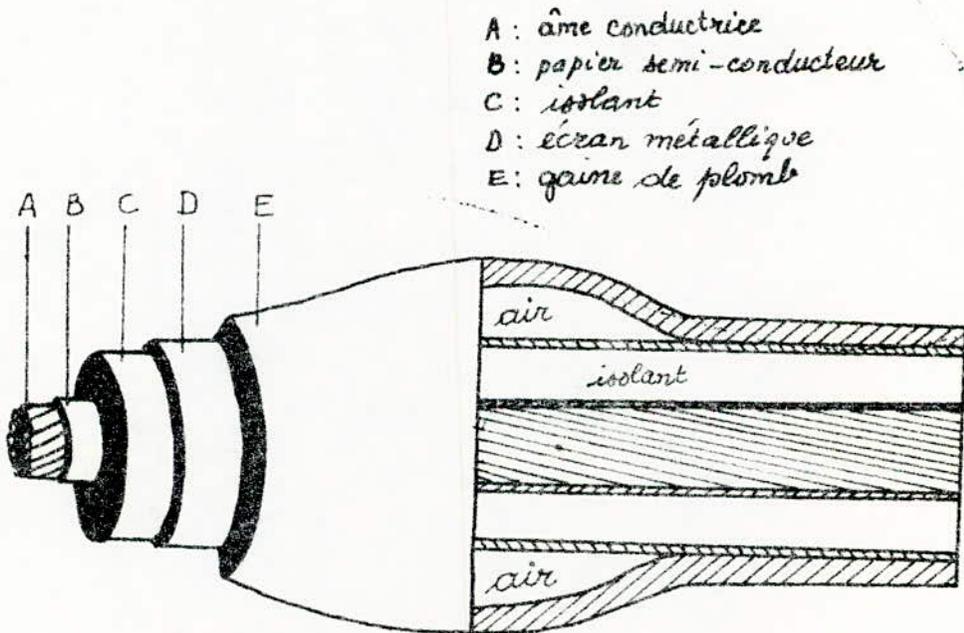


fig. 9 : décollement de la gaine de plomb.

5°) Revêtement.

a°) Gaine de plomb.

Le plomb procure à l'isolant une protection particulièrement efficace contre l'action de l'humidité. Du fait de sa réalisation sous forme de gaine continue, par filage à la presse, ce type d'écran procure une étanchéité parfaite. Il constitue une excellente barrière de protection contre les principaux agents chimiques, en raison de la passivité du plomb à l'égard de la plupart des agents de corrosion. Pour les câbles isolés au papier imprégné, le métal utilisé est du plomb pur ( de première fusion).

Lorsque le câble est susceptible d'être soumis à des vibrations on utilise du plomb allié qui donne une bien meilleure résistance à la cristallisation.

L'épaisseur du tube de plomb varie entre 1,1 et 3,6mm suivant le diamètre extérieur du câble avant la mise sous plomb ( norme NFC 33 -100).

b°) Armure en feuillards.

Elle assure la protection mécanique du câble contre les compressions, les chocs et les efforts de traction en cours de pose et pendant l'exploitation.

L'armure est constituée par deux feuillards en acier doux recuit, exempt d'oxydation et entièrement enduit sur les deux faces.

Les feuillards ont une épaisseur variant de 0,2 à 1 mm et une largeur de 50mm environ ( norme NFC 32 -050).

c°) Jute goudronné.

Ce sont des ficelles en jute qu'on imprègne par du bitume après les avoir enroulées sur l'armure. Ce revêtement constitue une protection pour les feuillards contre l'oxydation. Son épaisseur varie de 1 à 3,5 mm suivant le diamètre du câble sur l'armure - ( norme NFC 32-50).

III - ANALYSE THEORIQUE DES CONTRAINTES  
ELECTRIQUES ET DIELECTRIQUES DANS  
LE CABLE.

1°) Champ électrique - généralités.

Toute apparition de charge électrique d'un certain signe, provoque la création d'une charge électrique égale mais de signe contraire dans une zone déterminée ou en divers points des corps de l'espace environnant. Ces charges de signes opposés sont réunies par des lignes de force.  
(lignes de champ).

La terre est considérée comme un conducteur indéfini dont tous les points sont au même potentiel. On attribue arbitrairement à ce potentiel la valeur zéro, ce qui permet de donner une signification au potentiel en un point : c'est la différence de potentiel existant entre ce point et un point quelconque du sol.

Les vecteurs champ électrique sont tangents aux lignes de force.

Le potentiel électrique décroît le long d'une ligne de champ.

Les lignes de force sont perpendiculaires aux surfaces équipotentiellles. Celles-ci se resserrent lorsque l'on passe d'une région de l'espace où le champ est peu intense à une région de champ plus intense.

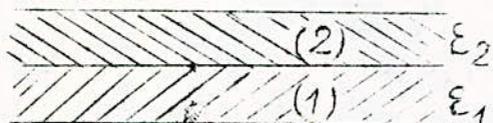
Le champ est intense dans les zones de faible permittivité.

$$\epsilon_1 E_1 = \epsilon_2 E_2 \Rightarrow E_2 = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} E_1$$

Si  $\epsilon_1 = 4$  (papier imprégné)

$$\epsilon_2 = 1 \text{ (air)}$$

$E_2 = 4 E_1$  : le champ est plus intense dans le milieu(2)



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 :

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{C}{C_0} \\ C &= \epsilon \frac{S}{e} \\ C_0 &= \epsilon_0 \frac{S}{e} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

$S$  = Surface du condensateur

$e$  = épaisseur du diélectrique

$\epsilon$  = permittivité absolue du diélectrique

$\epsilon_0$  = permittivité absolue du vide.

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9} \text{ Farads /mètre dans le S.I.}$$

La permittivité de l'air est pratiquement la même que celle du vide.

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

Exemple : Air .....  $\epsilon_r \approx 1$   
papier imprégné ...  $3 \leq \epsilon_r \leq 5$

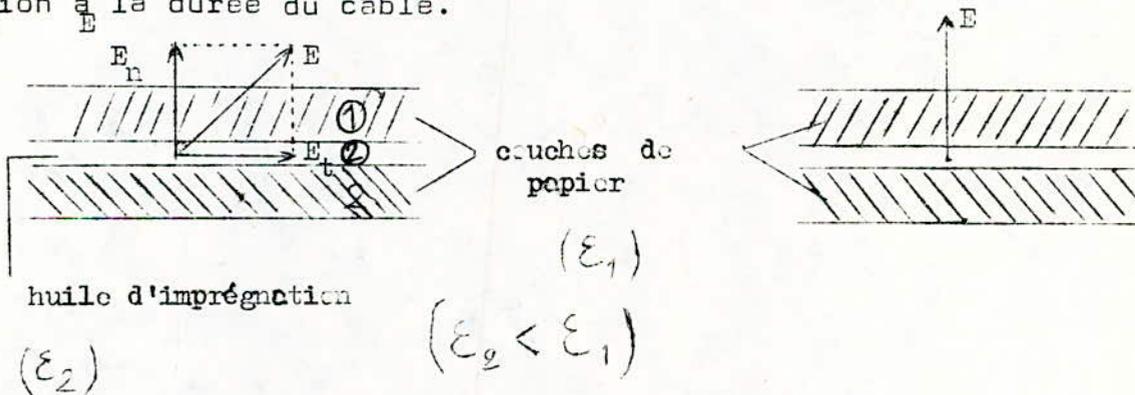
## 2°) Champ radial.

Le câble isolé au papier imprégné du type "à ceinture" (champ non radial) est, de par sa conception, mal adapté pour assurer une exploitation sûre à des tensions de service supérieures à 15 KV.

Les principaux éléments préjudiciables au bon fonctionnement électrique de ces câbles sont :

- l'Influence d'un champ électrique tournant comportant des composantes tangentielles parallèles aux couches de papier.
- l'effet défavorable des bourrages qui sont des éléments vulnérables de l'isolation.

Pour pallier à ces inconvénients on entoure l'isolant de chaque conducteur d'un écran métallique pour réaliser un champ radial. Les câbles à champ radial permettent d'éviter de faire travailler l'isolant sous des composantes du champ parallèles aux couches de papier, c'est-à-dire dans un sens où la rigidité diélectrique est la plus faible. D'autre part, il n'y a plus de champ dans la zone occupée par les bourrages et l'hétérogénéité de ces bourrages ou la présence de quelques bulles d'air dans cette zone n'apportent aucune modification à la durée du câble.

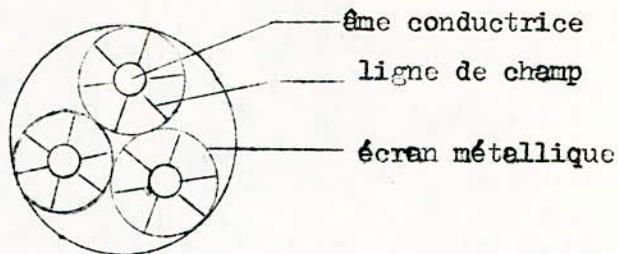


Champ non radial

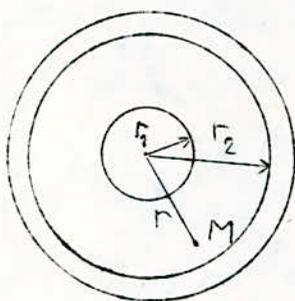
Champ radial

3°) Gradient de potentiel dans un câble à champ radial.

l'étude des contraintes électriques dans un câble multipolaire à champ radial se ramène à l'étude de ces contraintes dans l'une des phases à cause de la non influence électrique mutuelle des conducteurs constituant le câble.



Soit le conducteur suivant :



$r_1$  = rayon sur âme  
 $r_2$  = rayon sur 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:

$$G = \frac{V}{r \log_e \frac{r_2}{r_1}}$$

où  $r$  est le rayon au point  $M$  considéré.  
 $r_1 < r < r_2$

On voit que ce gradient est représenté par une fonction hyperbolique ( fig. 10 page 30 ) dont la valeur maximale a lieu pour  $r = r_1$ .

$$G_m = \frac{V}{r_1 \log_e \frac{r_2}{r_1}}$$

Les premières couches de papier appliquées sur l'âme doivent donc résister à ce gradient maximal pour assurer la bonne tenue en service du câble.

Le champ maximal doit être inférieur au champ admissible pour le type d'isolant envisagé.

Le champ admissible est déterminé par l'expérience : on trace la "courbe de vie" du câble, courbe qui représente le gradient de potentiel sous lequel se produit la rupture en fonction de la durée d'application de la tension correspondant à ce gradient de potentiel.

Le gradient admissible dans l'isolant sous la tension de service doit être inférieur à l'ordonnée  $G_1$  de l'asymptote de la "courbe de vie" fig. II page 30 .

Pour les câbles isolés au papier imprégné avec des matières non migrantes, le champ admissible est de l'ordre de 40 KV/cm soit environ 1/5 du champ  $G_1$ .

4°) Influence du rayon de l'âme sur l'épaisseur de l'isolant.

On peut choisir un rayon  $r_1$  pour que le rayon  $r_2$  soit minimal pour la même valeur du champ admissible:

$$G = \frac{V}{r_1 \log_e \left( \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad r_2 = r_1 e^{V/r_1 G}$$

$$\frac{dr_2}{dr_1} = 0 \implies \frac{V}{r_1 G} = 1 \implies r_2 = r_1 e$$

$$\frac{r_2}{r_1} = e \quad ; \quad G = \frac{V}{r_1}$$

Le rayon  $r_2$  est donc minimal pour  $r_1 = \frac{V}{G}$  et l'épaisseur d'isolant correspondante est  $r_2 - r_1 = 1,718 r_1$  . On a ainsi le câble le plus économique.

Exemple:  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } V = 17,5 \text{ KV} \quad G = 40 \text{ KV/cm} \\ r_1 = \frac{17,5}{40} = 0,4375 \text{ cm} \quad d_1 = 8,75 \text{ mm} \quad S_1 = 60 \text{ mm}^2. \end{array} \right.$

Dans le cas où la section de cuivre imposée correspond à un conducteur d'un rayon supérieur à celui qui est donné par les formules précédentes, on calcule le rayon intérieur de l'écran métallique à l'aide de la formule :

$$G = \frac{V}{r_1 \log_e \left( \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad G \text{ étant le gradient admissible.}$$

fig. 10 : Gradient de potentiel dans l'isolant d'un câble.

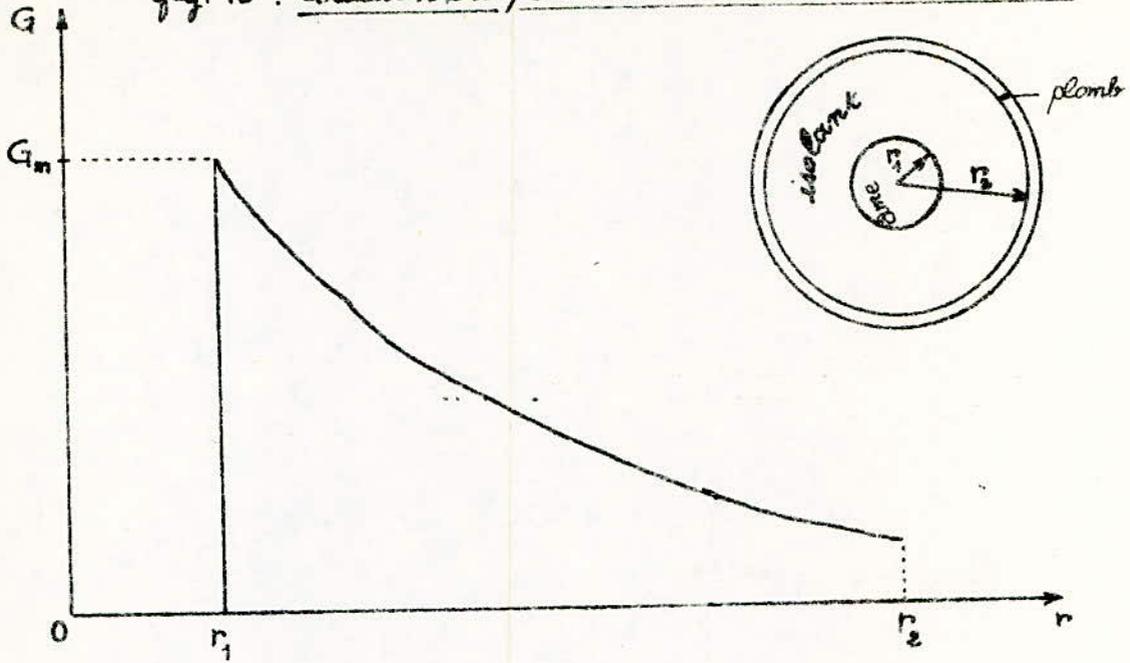
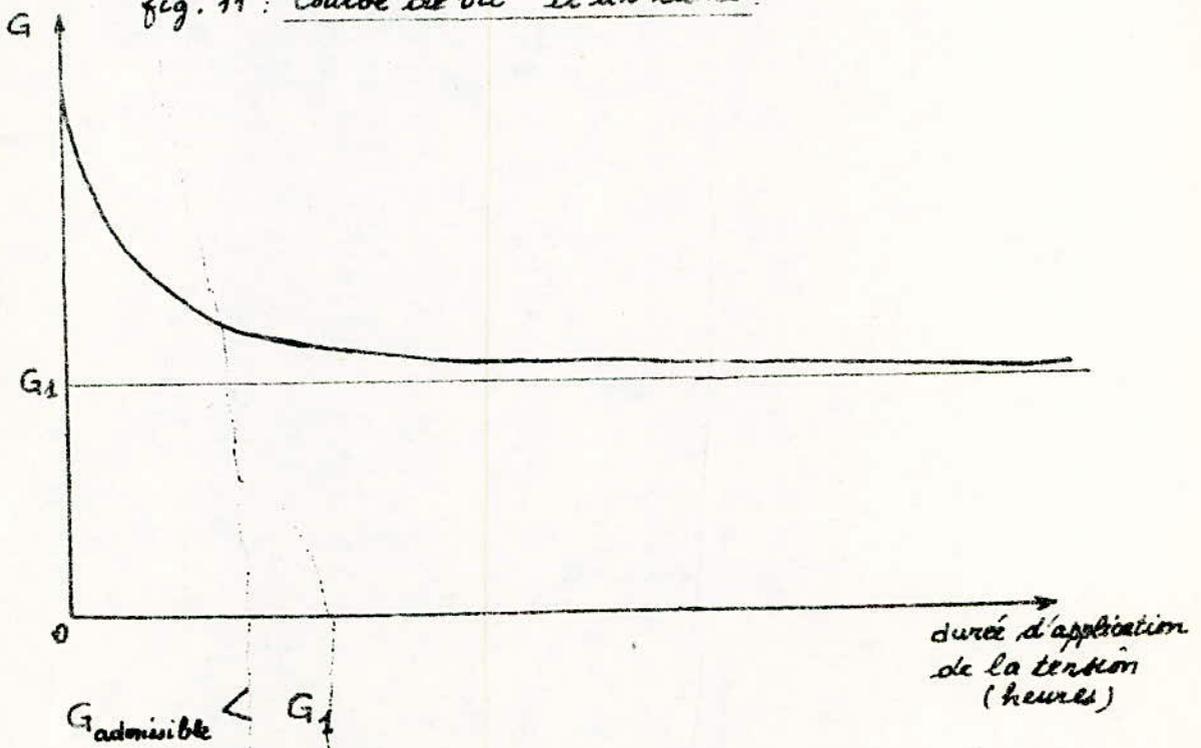


fig. 11 : "Courbe de vie" d'un câble.



L'épaisseur d'isolant  $r_2 - r_1$  est plus faible que celle du câble optimal, mais le rayon intérieur de l'écran métallique est plus grand que celui du câble optimal.

Dans le cas où la section de cuivre nécessaire est plus faible que celle du câble optimal, on peut augmenter artificiellement le rayon du conducteur en câblant les fils de cuivre sur une âme centrale inerte. Dans ce cas on peut aussi employer l'aluminium comme métal conducteur.

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

#### IV -ESSAIS ET MESURES SUR LE CABLE.

Nos essais seront effectués, selon la norme NFC 33-100, sur un câble qui a été mis à notre disposition par le laboratoire de la Câblerie Sonelec.

##### I<sup>9</sup> Caractéristiques et dimensions du câble (Norme NFC 33-100)

- Câble à champ radial isolé au papier imprégné de matière non migrante.
- Tension nominale du réseau :  $U = 30 \text{ KV}$ .
- Tension spécifiée :  $V = 17,5 \text{ KV}$ .
- Ame rigide, circulaire, non rétreinte, en cuivre.
- Température maximale sur l'âme =  $65^\circ\text{C}$  en permanence,  $150^\circ\text{C}$  en court-circuit.
- Nombre de brins = 19
- diamètre d'un brin =  $2,14 \text{ mm}$
- diamètre de l'âme =  $10,6 \text{ mm}$
- section nominale de l'âme =  $70 \text{ mm}^2$
- épaisseur de l'isolant  $\approx 6,5 \text{ mm}$
- champ maximal (à la surface de l'âme):

$$G = \frac{V}{\frac{r_1}{r_1} \log_e \frac{r_2}{r_1}} = \frac{1,75}{0,53 \log_e \frac{1,18}{0,53}} = 41,25 \text{ KV/Cm.}$$

La fig. I2 de la page 36 nous donne toutes les dimensions du câble.

##### 2<sup>o</sup>) Mesure de la résistance linéique d'un conducteur selon la norme NF C32 D10.

La mesure est effectuée à l'aide d'un pont de Wheastone sur un échantillon de 100 m de longueur, à la température ambiante  $t = 14^\circ\text{C}$ .

$$R = 25 \cdot 10^{-3} \Omega / 100 \text{ m} \quad R_{14} = 25 \cdot 10^{-2} \Omega / \text{Km.}$$

$$\text{à } 20^{\circ}\text{c} \quad R_{20} = \frac{R_t}{1 + a_{20} (t - 20)}$$

$R_{20}$  = Résistance linéique à la température de  $20^{\circ}\text{c}$  prise comme référence.

$a_{20}$  = Coefficient de variation, avec la température, de la résistance du cuivre, à masse constante et à dilatation libre.

$$( a_{20} = 0,00393 ) .$$

$R_t$  = Résistance linéique à la température de mesure  $t$ .

$$R_{20} = \frac{25 \cdot 10^{-2}}{1 + 0,00393 (14-20)} = 0,256 \Omega/\text{Km}$$

Cette valeur est conforme à la norme qui tolère une résistance maximale à  $20^{\circ}\text{c}$  de  $0,262 \Omega/\text{Km}$ .

### 3°) Mesure des pertes diélectriques.

a°) Rappels théoriques : angle de pertes  $\delta$  et facteur de dissipation  $\text{tg}\delta$ .

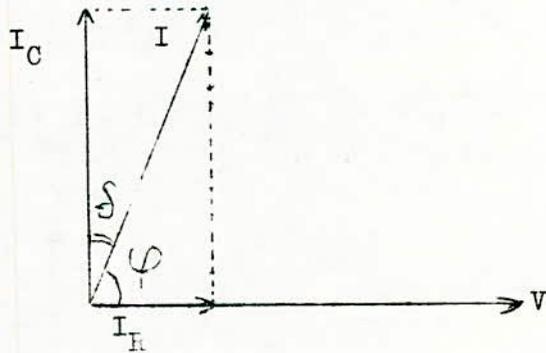
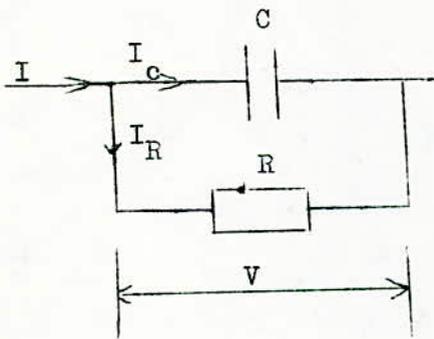
Aucun isolant n'est parfait. Lorsqu'il est soumis à un champ électrique continu, seul le phénomène de conduction a lieu et, par conséquent, la qualité du corp est bien exprimée par sa résistivité. Mais sous le champ alternatif tout isolant est traversé par des courants de conduction et d'absorption qui donnent lieu à des pertes diélectriques. En outre, si une isolation solide n'est pas parfaitement homogène et comporte de petites inclusions d'air ou de gaz ( ce qui est presque toujours le cas ) des décharges partielles se produisent à l'intérieur de ces vacuoles, donnant lieu à une dissipation d'énergie. Toutes ces pertes se résolvent en dégagement de chaleur et, si leur niveau est trop élevé, peuvent conduire soit au claquage thermique, soit à une dégradation plus ou moins rapide, d'ordre chimique.

- Les pertes diélectriques sont, en général, moins importantes que les pertes joule dans le cuivre, mais elle présentent un grand intérêt, par suite de la façon dont le câble a été fabriqué et avec sa durée probable en service.

Du point de vue de son comportement électrique, tout isolant placé entre deux pièces conductrices sous tension alternative sinusoïdale est équivalent à un condensateur parfait ( sans pertes) en parallèle avec une résistance. Le courant total traversant l'ensemble est déphasé, en avance sur la tension, d'un angle  $\varphi < \pi/2$ . Son complément, l'angle  $\delta$ , est appelé angle des pertes. Il est d'autant plus grand que les pertes sont élevées.

La tangente de cet angle ( $\text{tg} \delta$ ) est appelée facteur de dissipation. Il se mesure au pont de Schering.

$$\text{tg} \delta = \frac{\text{courant actif}}{\text{courant réactif}}$$



$$I = \frac{V}{Z} ; I_C = VC\omega ; I_R = \frac{V}{R}$$

$$y = \frac{1}{Z} ; b = C\omega ; g = \frac{1}{R}$$

Puissance dissipée :

$$P = VI \cos \varphi = V (V.y) \frac{g}{y} = V^2 . g = V^2 . b . \text{tg} \delta$$

$$P = V^2 \cdot C \omega \operatorname{tg} \delta$$

$$P \left[ \frac{\text{W}}{\text{Cm}} \right]$$

$$\omega = 2 \pi f$$

$$C \left[ \frac{\text{F}}{\text{Cm}} \right]$$

$$V \left[ \text{volts} \right]$$

$$\operatorname{tg} \delta = \text{facteur de dissipation}$$

b°) Mesures de la capacité C et  $\operatorname{tg} \delta$  du câble.

Elles s'effectuent à l'aide d'un pont de Schering dont le principe est donné par la fig. I3 page 36 .

Variation de  $\operatorname{tg} \delta$  et C du câble isolé au papier imprégné, en fonction de la tension appliquée entre âme et gaine de plomb, à température ambiante :

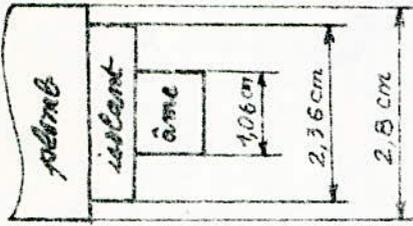
V = 17,5 KV : Tension spécifiée du câble.

Tension appliquée ( KV )	$\operatorname{tg} \delta$	C ( $\mu\text{F}$ /KM)
0,5 . V	0,00386	0,2914
0,75 . V	0,00489	0,2916
1 . V	0,00597	0,2919
1,5 . V	0,00776	0,2946
2 . V	0,00935	0,2953
2,5 ..V	0,01106	0,2982
3 . V	0,01238	0,2989

Voir courbe fig. I4 page 37 .

Cet essai satisfait à la norme NF C33-100.

conducteur sous plomb.



câble triplomb.

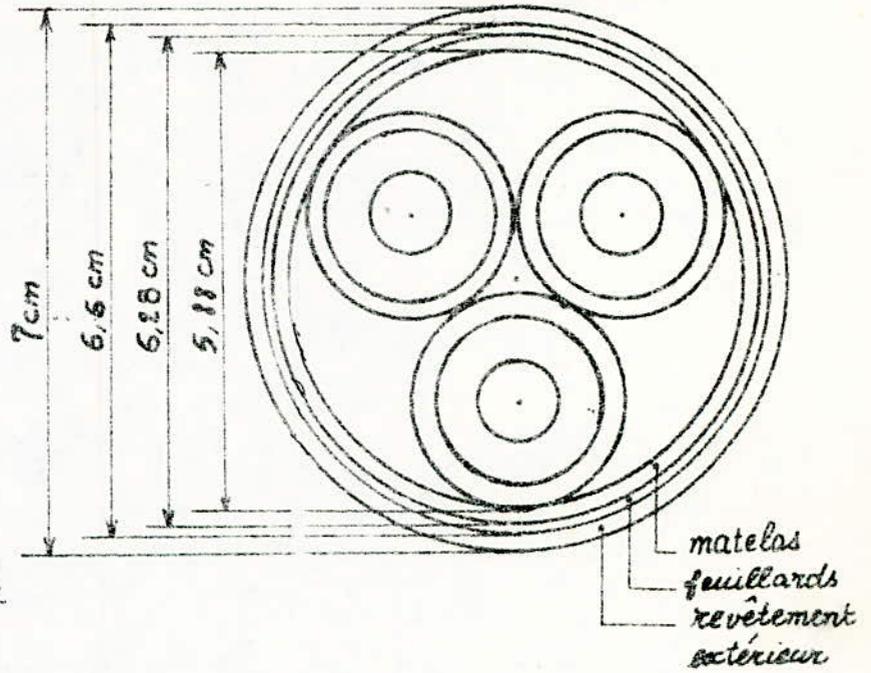
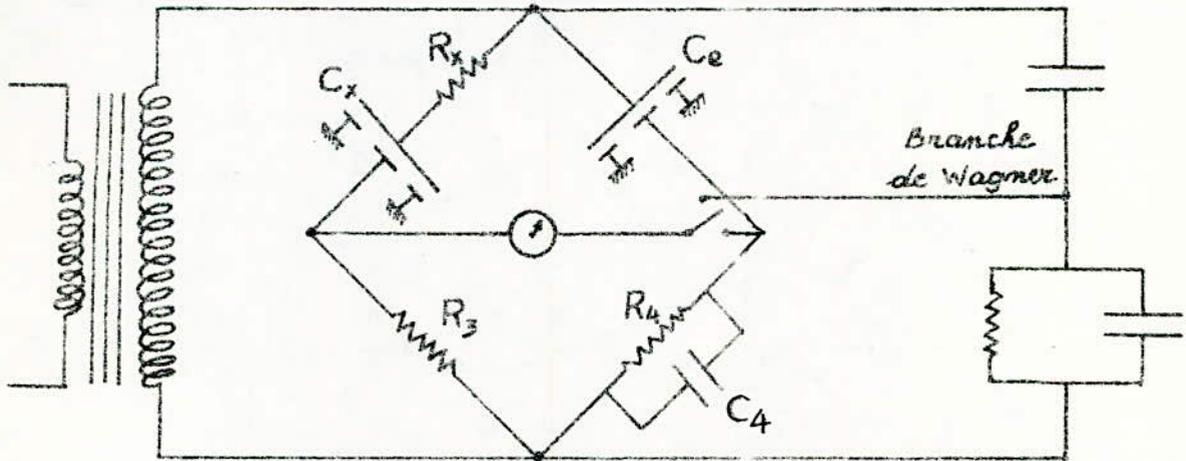


fig. 12 : dimensions du câble

fig. 13 : Pont de Schering et branche de Wagner.



$C_e$  : capacité étalon

$C_x$  : capacité du câble

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

$\text{tg} \delta = \omega R_4 C_4$

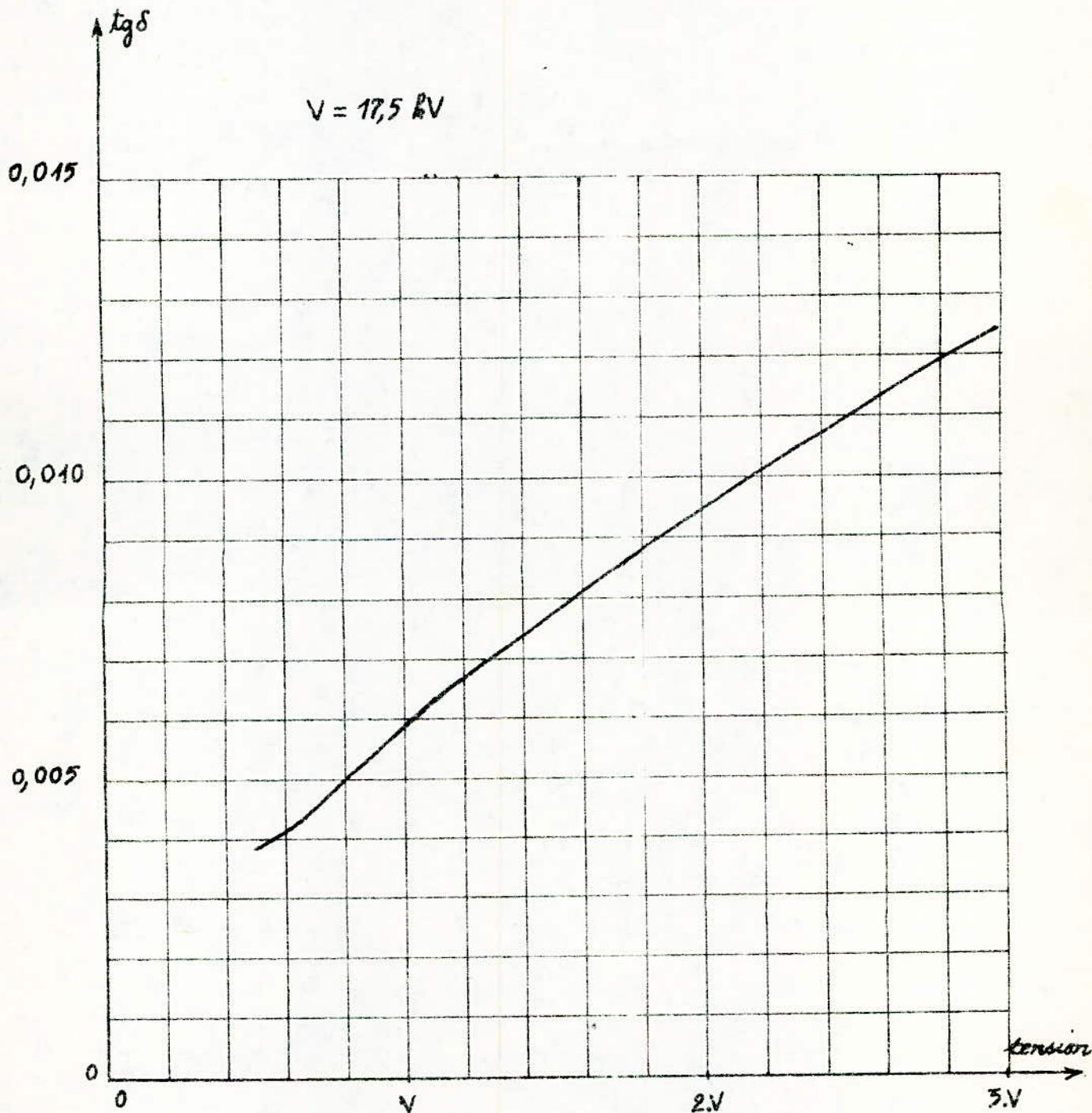


Fig. 14: Variation du facteur de dissipation ( $\text{tg}\delta$ ) en fonction de la tension.  
Taux d'humidité du papier imprégné, mesuré au laboratoire de chimie : 1,4 %

Afin de mettre en évidence l'importance de l'imprégnation, nous avons mesuré la variation de  $tg\delta$  en fonction de la tension avant imprégnation :

$$V = 17,5 \text{ KV.}$$

Tension appliquée ( KV )	tg	C ( $\mu\text{F}/\text{KM}$ )
0,25. V	0,0170	0,200
0,5 . V	0,0171	0,200
0,75. V	0,0188	0,200
I . V	0,0264	0,215
I,25. V	0,0346	0,215
I,5 . V	0,0433	0,215
I,75. V	Perforation de l'isolant après 5s detenue	

Voir courbe fig. I5 page 39 .

L'allure de la courbe  $tg\delta = f(V)$  avant imprégnation nous montre que les pertes augmentent excessivement à partir de 0,75. V. Ceci est dû à l'existence d'un nombre important de couches d'air à faible permittivité qui facilitent beaucoup le phénomène de décharges partielles qui se traduisent par une dissipation d'énergie sous forme de chaleur.

La fig. I5 nous montre que l'ionisation gazeuse se produit bien avant la tension de service et elle augmente régulièrement avec le gradient appliqué. Le taux d'ionisation est lié à la proportion de vide de l'isolant.

Pour les câbles ayant subi une longue période de vieillissement l'ionisation commence à une tension supérieure à la tension spécifiée fig. I6 page 40 .

Cet arrêt d'ionisation semble être dû à :

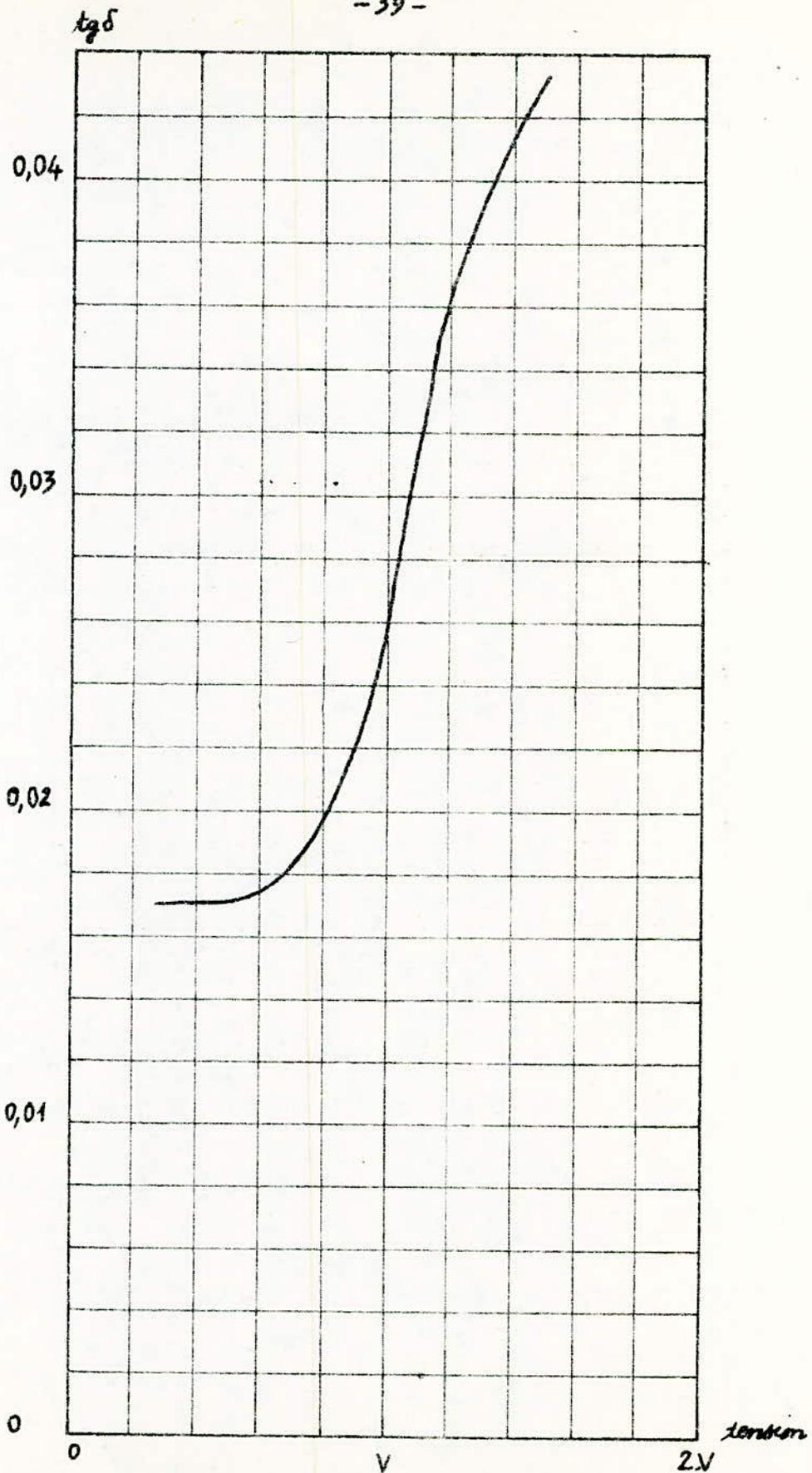


fig. 15 : Variation de  $\text{tg } \delta$  en fonction de la tension avant imprégnation  
Taux d'humidité du papier : 7,9 %

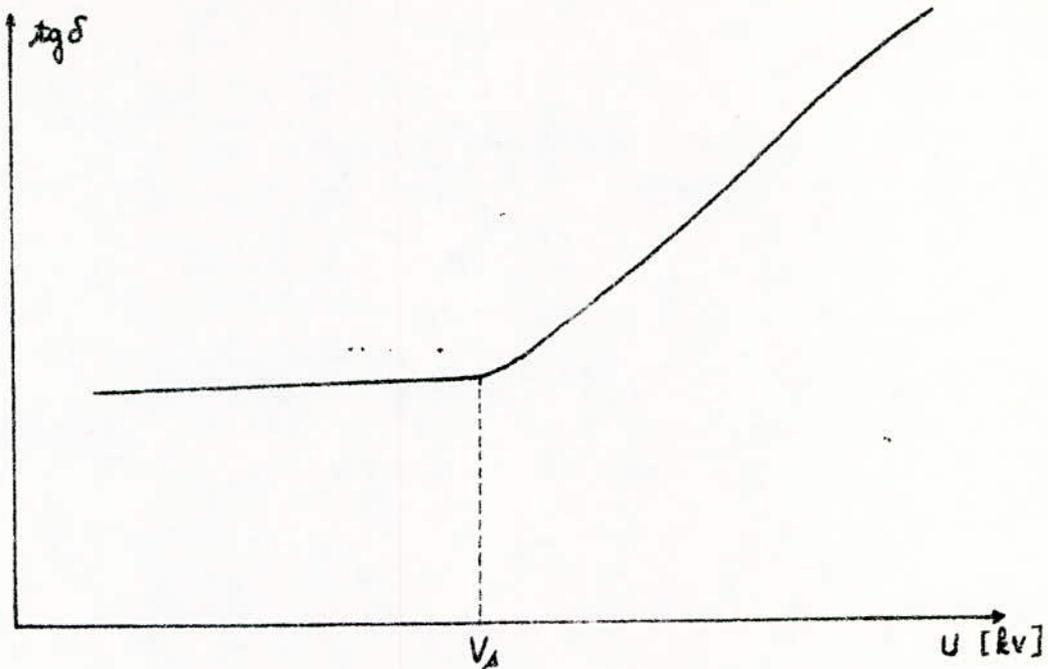
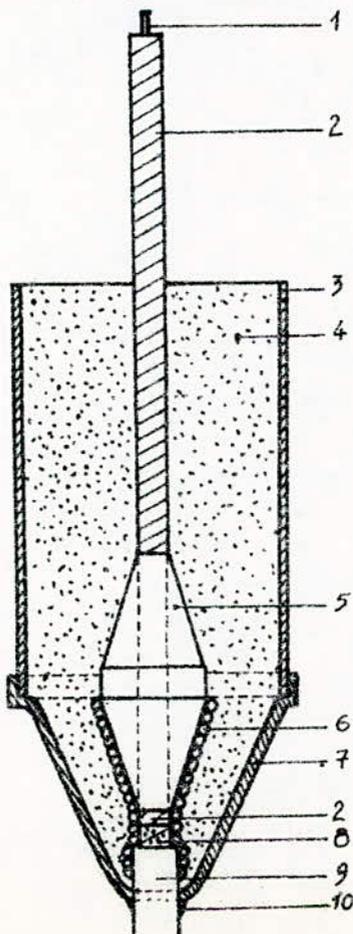


fig. 16 : Allure de la courbe  $\text{tg } \delta = f(U)$  d'un câble ayant subi une longue période de vieillissement.  $V_A$  = tension de seuil d'apparition des décharges partielles.  $V_A > V$  ( $V$  = tension spécifiée).



- 1 âme conductrice
- 2 isolant du câble
- 3 carton isolant (faute d'isolateur)
- 4 matière de remplissage (huile d'impregnation, faute de matière appropriée pour cet usage)
- 5 isolant reconstitué par rubanage à la main. L'épaisseur de reconstitution doit être de 2 à 3 fois l'épaisseur d'isolant du câble.
- 6 déflecteur métallisé
- 7 cône
- 8 métallisation du câble
- 9 plomb du câble
- 10 soudure entre 7 et 9

fig. 18 : Schéma de l'extrémité d'un câble à soumettre à l'essai de claquage.

- La formation de cire dans les déjoints soumis à un gradient élevé, ce qui supprimerait les vides ionisables.

- l'établissement d'une légère pression gazeuse engendrée par les produits, formés sous l'~~effet~~ des décharges partielles et qui, précisément, contribue à éteindre l'ionisation, en accord avec la loi de Paschen.

Variation de  $\text{tg}\delta$  du câble isolé au papier imprégné, en fonction de la température sur âme, sous la tension 0,75.V ( V étant la tension spécifiée = 17,5 KV pour notre câble) selon la norme NFC 33 -100 :

Température sur âme (°c)	$\text{tg}\delta$
20	0,0048
30	0,0043
40	0,0034
50	0,0034
60	0,0029
65	0,0027
70	0,0029
75	0,0033

voir courbe fig. I7 page 42 .

Ces variation se traduisent par une courbe qui présente un minimum à une température qui est fonction de la viscosité des constituants de la matière d'imprégnation.

Pour notre câble la température correspondant au minimum est d'environ 65°c.

Dans la première partie de la courbe, l'augmentation de la température provoque la diminution de la viscosité de l'huile qui remplit alors les vides existant dans l'isolant, ce qui réduit le phénomène des décharges partielles, et par conséquent les pertes diélectriques.

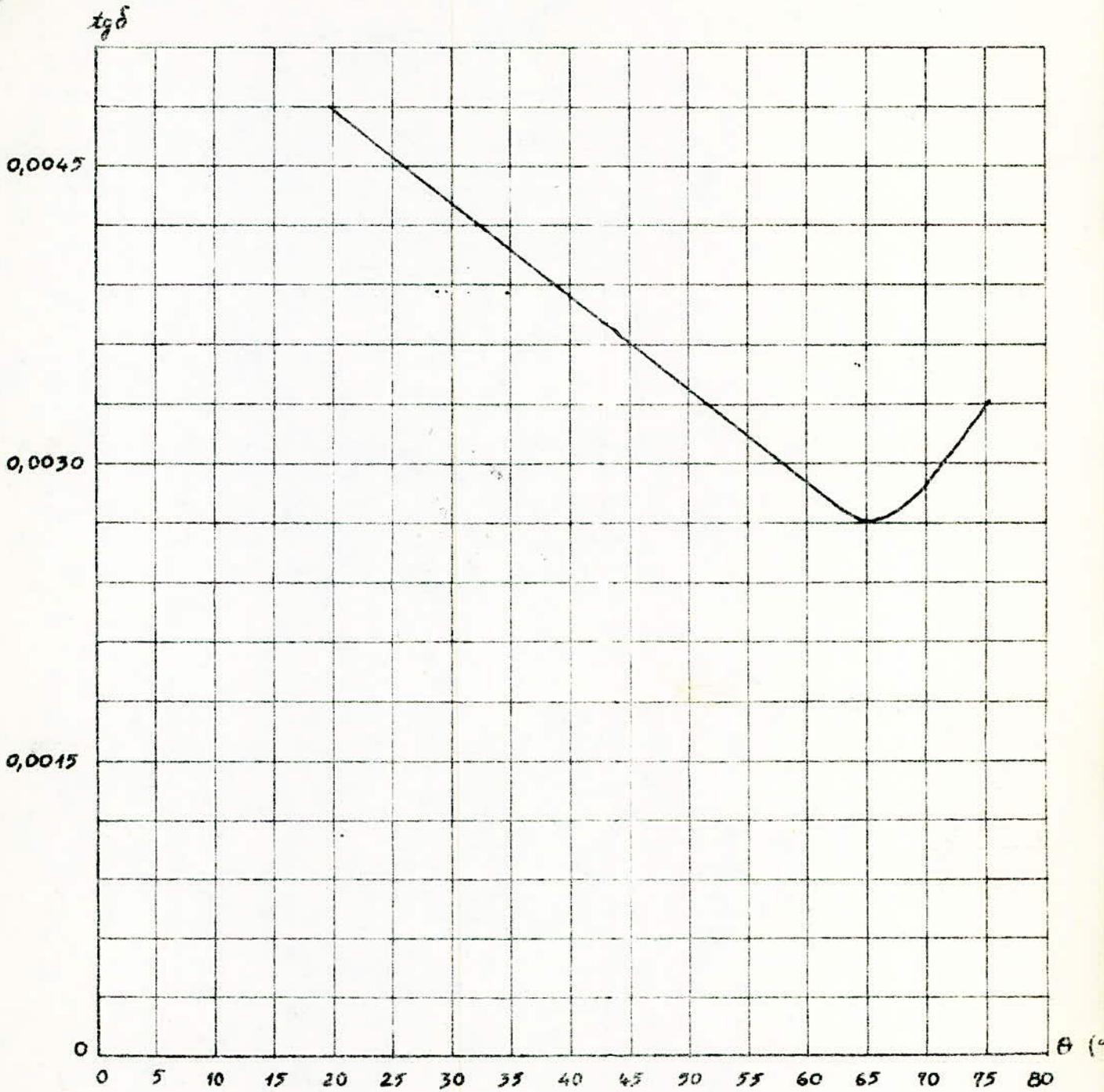


fig. 17 : Variation du facteur de dissipation ( $\text{tg}\delta$ ) du câble isolé au papier imprégné, en fonction de la température sur âme, sous la tension 0,75. V ( $V = 19,5 \text{ kV}$  : tension spécifiée du câble) selon la norme NFC 33 - 100 .

A partir de 65°C, l'huile devenant fluide tend à se concentrer dans les régions basses de l'isolant, laissant ainsi des vides dans les régions supérieures, ce qui favorise de nouveau le phénomène de décharges partielles, donc l'augmentation des pertes. Cette augmentation ne peut avoir lieu pour notre câble fonctionnant à une température ne dépassant pas 65°C.

#### 4°) Essai de pliage.

L'essai est effectué sur un échantillon de 5 m de câble sous plomb. L'échantillon est enroulé sur un tourêt de diamètre  $D = 25 d$  ( $d$  étant le diamètre du câble sous plomb) conformément à la norme NFC 33-100. Il est ensuite déroulé, redressé puis enroulé de telle sorte que la fibre comprimée dans le premier cas devienne la fibre tendue dans le second. Ce cycle d'opération est répété de façon à avoir trois pliages dans un sens et trois pliages dans l'autre.

Le câble étant appelé à subir des pliages lors de la pose, cet essai sert à vérifier que l'enveloppe de plomb résiste aux contraintes mécaniques. En effet, après cet essai, elle ne doit présenter ni fente, ni fissure qui permettrait la pénétration d'humidité.

#### 5°) Essai diélectrique.

Toujours selon la norme NFC 33-100, l'échantillon précédent est soumis à une tension (3,5.V, V étant la tension spécifiée), appliquée entre l'âme et le tube de plomb. La durée d'application est de 4h consécutives. Pendant toute cette durée, il ne s'est produit aucun claquage sur notre échantillon. Ceci démontre la bonne tenue de l'isolant aux contraintes mécaniques qu'il a subies durant l'essai de pliage.

#### 6°) Vérification de la rigidité diélectrique sous tension de courte durée.

Cette vérification s'effectue sur toute la longueur de livraison. Pour les câbles à champ radial la tension (3.V, V étant la tension spécifiée) est appliquée entre l'âme et la gaine de plomb pendant la durée de 20 mn.

Cet essai est satisfaisant s'il ne se produit aucun claquage durant cet intervalle de temps.

7°) Essai de claquage.

Cet essai sert à déterminer le coefficient de sécurité du câble. On capote les deux extrémités de l'échantillon, comme indiqué sur la fig. 18 page 40, pour empêcher la décharge de sauter entre l'âme et le plomb en contournant l'isolant. On applique alors entre l'âme et le plomb une tension alternative progressivement croissante jusqu'à ce que, la perforation se produise, en dehors des capotages des extrémités.

Le rapport de la tension de perforation  $V_p$  à la tension de service  $V$  donne le coefficient de sécurité.

$$k = \frac{V_p}{V} \quad V = 17,5 \text{ KV pour notre câble.}$$

Nous avons effectué trois essais sur trois échantillons =

	Tension de claquage $V_p$ (kV)	coefficient de sécurité $k$
1er essai	126	7,2
2° essai	100	5,7
3° essai	125	7,1

Vu tous les préparatifs que nécessite cet essai, nous n'avons pu en faire plusieurs pour trouver un coefficient  $k$  moyen, néanmoins nous en avons un ordre de grandeur.

## V - CALCUL DU COURANT ADMISSIBLE DANS LE CÂBLE.

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

### A - COURANT ADMISSIBLE EN REGIME PERMANENT (FACTEUR DE CHARGE 100 %).

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.

Le calcul de l'échauffement en régime permanent d'un câble enterré s'effectue à partir de la connaissance des pertes engendrées dans chacun des éléments, des résistances thermiques des divers constituants du câbles et du sol, et de la température ambiante du sol.

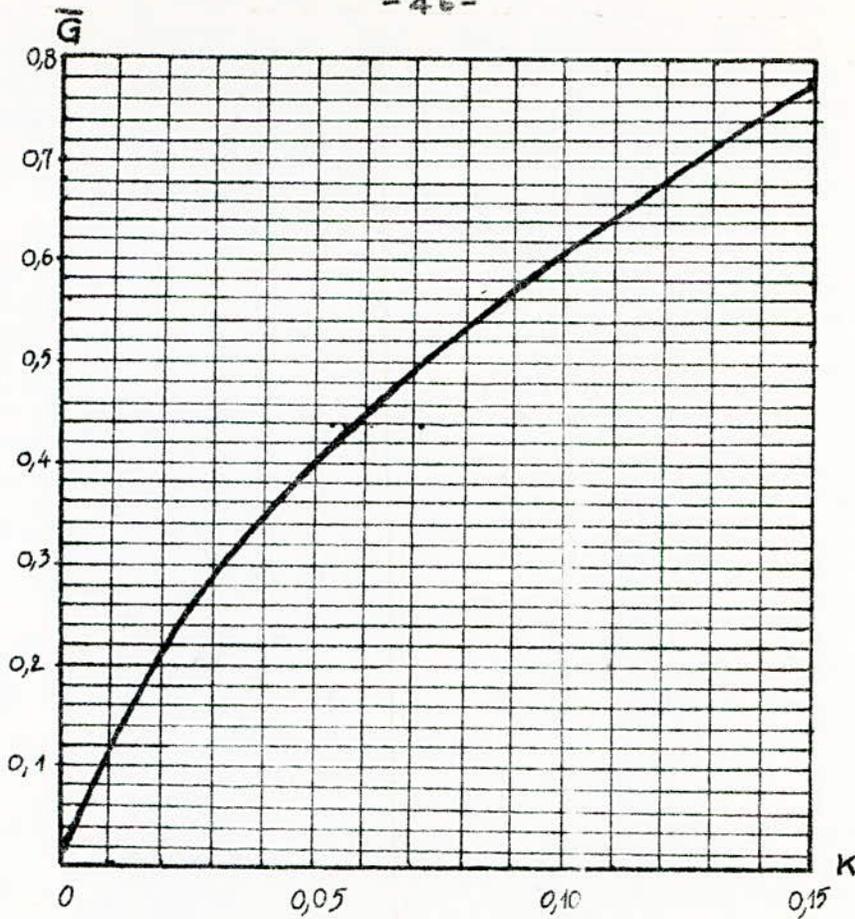
La température maximale admissible ( température sur l'âme) est le résultat d'expériences effectuées dans différents pays.

L'Echauffement du câble résulte des pertes :

- Lineiques dans les parties métalliques, liées au courant, dites Joule, et dans les parties soumises à la tension, dites diélectriques.
- Joule dans le conducteur, elles sont égales à  $RI^2$  où R est la résistance lineique électrique en courant alternatif, compte tenu de l'effet de peau et de l'effet de proximité.

Cet échauffement est la somme d'échauffements partiels, entre conducteurs et gaines métalliques, gaines métalliques et surface extérieure du câble, surface extérieure du câble et surface du sol supposée isotherme.

L'application d'un échelon de pertes constantes dans le câble ( régime continu de charge, maintenu indéfiniment) entraîne un régime thermique asymptotique fig. I9 page 46 .



$K$  = épaisseur de bourrage entre les enveloppes et l'armure rapportée au diamètre extérieur de l'enveloppe.

fig. 20: Facteur géométrique  $\bar{G}$  pour la résistance thermique des bourrages et revêtements des câbles triplombs dans le cas où les gaines se touchent.

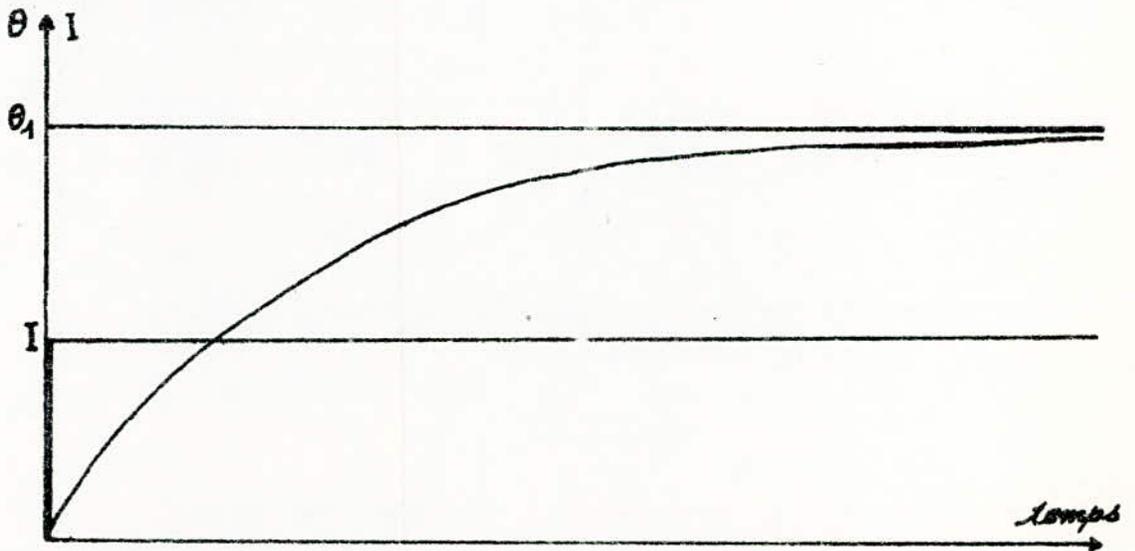


fig. 19 : Régime thermique dans un câble parcouru par un courant constant.  
 $I$  = courant admissible en régime permanent.

L'intensité maximale admissible en régime permanent dans un câble est la valeur I de l'intensité qui provoque à l'état d'équilibre thermique, l'échauffement de l'âme des conducteurs à la valeur maximale permise  $\theta_1$ .

Dans notre cas  $\theta_1 = 65^\circ \text{C}$  : température maximale admissible dans les câbles à matière non migrante, de tension spécifiée 17,5 KV ( norme NF C33-100).

Connaissant  $\theta_1$  on détermine I.

La publication 287 de la CEI (Comité Electrotechnique International) recommande une méthode complète de calcul de la capacité de transport des câbles d'énergie selon le critère thermique.

C'est par cette méthode que nous déterminerons le courant admissible dans notre câble.

Evaluation de l'intensité du courant alternatif admissible dans le câble:

Nous pouvons déduire cette intensité de l'expression donnant l'échauffement du conducteur au dessus de la température ambiante :

$$\Delta\theta = (I^2 R + 0,5 W_d) T_1 + \left[ I^2 R(1+\lambda_1) + W_d \right] n T_2 + \left[ I^2 R(1+\lambda_1+\lambda_2) + W_d \right] n (T_3 + T_4)$$

$$d'où \quad I = \left[ \frac{\Delta\theta - W_d \left[ 0,5 T_1 + n (T_2 + T_3 + T_4) \right]}{R \left[ T_1 + n T_2 (1+\lambda_1) + n(1+\lambda_1+\lambda_2) (T_3 + T_4) \right]} \right]^{1/2}$$

où :

I = intensité du courant circulant dans un conducteur .... A

$\Delta\theta$  = échauffement du conducteur au-dessus de la température ambiante . ..... ° C

La température du sol est prise au maximum, égale à 20°C.

La température maximale de fonctionnement

du câble est égale à 65°C (NFC 33-100) d'où  $\Delta\theta = 65 - 20 = 45\text{ }^\circ\text{C}$ .

R = Résistance en courant alternatif, par unité de longueur, du conducteur à sa température maximale. ....  $\Omega / \text{cm}$

$W_d$  = Pertes diélectriques, par unité de longueur de l'isolant entourant le conducteur. ....  $\text{W} / \text{cm}$

$T_1$  = Résistance thermique, par unité de longueur, entre un conducteur et la gaine. ....  $^\circ\text{C} \cdot \text{cm} / \text{W}$

$T_2$  = Résistance thermique, par unité de longueur, entre la gaine et l'armure. ....  $^\circ\text{C} \cdot \text{cm} / \text{W}$

$T_3$  = Résistance thermique, par unité de longueur, du revêtement extérieur du câble. ....  $^\circ\text{C} \cdot \text{cm} / \text{W}$

$T_4$  = Résistance thermique, par unité de longueur, entre la surface du câble et le milieu environnant ....  $^\circ\text{C} \cdot \text{cm} / \text{W}$

n = Nombre de conducteurs chargés dans le câble (conducteurs de même section et transitant la même charge)

n = 3 pour un tripolaire.

$\lambda_1$  = Rapport des pertes dans l'écran métallique aux pertes totales dans tous les conducteurs.

$\lambda_2$  = Rapport des pertes dans l'armure aux pertes totales dans tous les conducteurs.

Dans ce qui suit nous calculerons chaque terme de l'expression donnant le courant alternatif admissible.

### 1°) Calcul des pertes.

#### a°) Résistance en courant alternatif du conducteur R.

La résistance linéique du conducteur en courant alternatif et à la température maximale de service ( 65°C)

est donnée par la formule suivante :

$$R = R' (1 + y_s + y_p)$$

où

R = Résistance en courant alternatif du conducteur à la température maximale de service,  $\Omega / \text{cm}$ .

R' = Résistance en courant continu du conducteur à la température maximale de service,  $\Omega / \text{cm}$ .

$y_s$  = Facteur d'effet de peau.

$y_p$  = Facteur d'effet de proximité

Résistance en courant continu du conducteur R'.

$$R' = R_0 \left[ 1 + a_{20} (\Theta - 20) \right]$$

$R_0$  = Résistance en courant continu du conducteur à 20°C,  $\Omega / \text{cm}$ ,  $R_0$  est donnée par la norme CEI publication 228 ;

$$R_0 = 0,268 \Omega / \text{Km} \quad \text{ou} \quad R_0 = 0,268 \cdot 10^{-5} \Omega / \text{cm}.$$

$a_{20}$  = Coefficient de variation à 20°C de la résistivité en fonction de la température, par deg C, à masse constante, soit : 0,00393 pour le cuivre.

$\Theta$  = Température maximale de service :  $\Theta = 65^\circ \text{C}$ .

$$R' = 0,268 \cdot 10^{-5} \left[ 1 + 0,00393 (65 - 20) \right] = 0,315 \cdot 10^{-5} \Omega / \text{cm}.$$

Facteur d'effet de peau  $y_s$ .

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8 x_s^4}$$

$$x_s^2 = \frac{8 \pi f}{R'} \cdot 10^{-9} k_s$$

f = fréquence du courant d'alimentation f = 50 Hz.

$k_s$  = coefficient ( $k_s = 1$  pour le conducteur en cuivre rond câblé)

$$x_s^2 = \frac{8.3,14.50}{0,315.10^{-5}} \cdot 10^{-9} \cdot 1 = 0,3987$$

$$y_s = \frac{(0,3987)^2}{192 + 0,8 (0,3987)^2} = 8274.10^{-7}$$

$$y_s = 8274.10^{-7}$$

Facteur d'effet de proximité  $y_p$

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8 x_p^4} \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \left[ 0,312 \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8 x_p^4} + 0,27} \right]$$

où:

$$x_p^2 = \frac{8 \sqrt{f}}{R'} \cdot 10^{-9} k_p$$

$d_c$  = diamètre du conducteur en cm ( $d_c = 1,06$  cm)

s = distance entre axes des conducteurs en cm ( $s = 2,8$  cm)

$k_p$  = coefficient ( $k_p = 0,8$  pour le conducteur en cuivre rond câblé)

$$x_p^2 = \frac{8.3,14.50}{0,315.10^{-5}} \cdot 10^{-9} \cdot 0,8 = 0,3189$$

$$y_p = \frac{(0,3189)^2}{192 + 0,8(0,3189)^2} \left( \frac{1,06}{2,8} \right)^2$$

$$\left[ 0,312 \left( \frac{1,06}{2,8} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{(0,3189)^2}{192+0,8(0,3189)^2} + 0,27} \right] =$$

$$y_p = 3344 \cdot 10^{-7}$$

Finalement

$$R = R' (1 + y_s + y_p) = 0,315 \cdot 10^{-5} (1 + 8274 \cdot 10^{-7} + 3344 \cdot 10^{-7})$$

$$R = 0,315 \cdot 10^{-5} \Omega / \text{cm}.$$

REMARQUE :  $R = R'$  les effets de peau et de proximité sont négligeables pour les câbles à faible section.

b°) Pertes diélectriques  $W_d$ .

Les pertes diélectriques linéiques pour chaque phase sont données par =

$$W_d = \omega C V^2 \text{tg} \delta \cdot 10^{-6} \text{ W/cm}$$

où

$$\omega = 2 \pi f \text{ en } 1/\text{s}$$

$C$  = Capacité par unité de longueur en  $\mu\text{F}/\text{cm}$

$V$  = tension par rapport à la terre ( $V=17500$  volts pour notre câble).

Capacité C :

$$C = \frac{0,0241 \epsilon}{\log_{10} \left( \frac{D_i}{d_c} \right)} \cdot 10^{-5} \mu\text{F}/\text{cm}$$

$\epsilon$  = permittivité relative de l'isolant ( $\epsilon = 4$  pour le papier imprégné de matière non migrante)

$D_i$  = diamètre extérieur de l'isolant ( $D_i = 2,32$  cm)

$d_c$  = diamètre du conducteur comprenant la présence d'un écran, s'il y a lieu. ( $d_c = 1,06$  cm)

$$C = \frac{0,0241.4}{\log_{10} \left( \frac{2,32}{1,06} \right)} \cdot 10^{-5} = 0,283.10^{-5} \quad \text{F/cm}$$

$$C = 0,283.10^{-5} \quad \text{F/cm}$$

$\text{tg } \delta$  = On prend une valeur prudente relative au maximum de température admissible et applicable à la plus haute tension normalement spécifiée pour le câble.

$$\text{tg } \delta = 0,01$$

$$W_d = \omega C V^2 \text{tg } \delta \cdot 10^{-6} \quad \text{w/cm}$$

$$W_d = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,283.10^{-5} (17500)^2 \cdot 0,01.10^{-6} = 2,72.10^{-3} \quad \text{W/cm}$$

$$W_d = 2,72.10^{-3} \quad \text{W/cm}$$

### C°) Pertes dans les gaines $\lambda_1$ .

Les pertes dans les gaines ( $\lambda_1$ ) sont dues au passage de courant de circulation ( $\lambda'_1$ ) et aux courants de Foucault ( $\lambda''_1$ ) soit :

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1$$

Les formules ci-dessous donnent l'expression de ces pertes rapportées aux pertes totales dans les conducteurs. Pour un câble tripolaire dont chaque phase possède sa propre gaine de plomb, le facteur de pertes est donné par =

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \cdot \frac{1,7}{1 + \left( \frac{R_s}{R} \right)^2}$$

où

$$X = 4,6 (\omega) \log_{10} \frac{2s}{d} \cdot 10^{-9} \Omega/\text{cm}$$

s = distance entre axes des conducteurs ( s = 2,8 cm)

d = diamètre moyen de la gaine ( d = 2,58 cm)

$$X = 4,6 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot \log_{10} \left( \frac{5,6}{2,58} \right) \cdot 10^{-9} = 486,14 \cdot 10^{-9} \Omega/\text{cm}$$

R<sub>s</sub> = résistance linéique de la gaine au maximum de température admissible en  $\Omega/\text{cm}$

$$R_s = R_{20} \left[ 1 + a_{20} (65-20) \right]$$

R<sub>20</sub> = 0,26 · 10<sup>-4</sup>  $\Omega/\text{cm}$ , valeur mesurée sur un échantillon.

$$a_{20} = 4 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$$

$$R_s = 0,26 \cdot 10^{-4} \left[ 1 + 4 \cdot 10^{-3} (65-20) \right] = 0,3068 \cdot 10^{-4} \Omega/\text{cm}$$

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1,7}{1 + \left( \frac{R_s}{X} \right)^2} = \frac{0,3068 \cdot 10^{-4}}{0,315 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{1,7}{1 + \left( \frac{0,3068 \cdot 10^{-4}}{486,14 \cdot 10^{-9}} \right)^2}$$

$$\lambda'_1 = 4,156 \cdot 10^{-3}$$

pour un câble triplomb  $\lambda''_1 = 0$

$$\text{d'où } \lambda_1 = 4,156 \cdot 10^{-3}$$

d°) Pertes dans les armures  $\lambda_2$ .

Les formules utilisées expriment la puissance dissipée dans l'armure métallique du câble sous la forme d'une fraction  $\lambda_2$  de la puissance perdue dans tous les conducteurs.

Pertes par hystérésis

$$\lambda_2' = \frac{s^2 \cdot k^2 \cdot 10^{-9}}{R \cdot d_A \cdot e}$$

où :

s = distance entre axes des conducteurs ( s = 2,8 cm)

e = épaisseur équivalente de l'armure en cm

$$e = \frac{A}{\pi d_A}$$

A = section de l'armure en cm<sup>2</sup> ( A = 2,525 cm<sup>2</sup> pour notre câble)

d<sub>A</sub> = diamètre moyen de l'armure ( d<sub>A</sub> = 6,3 cm)

$$e = \frac{2,525}{3,14 \cdot 6,3} = 0,13 \text{ cm}$$

le facteur k est donné par :  $k = \frac{1}{1 + \frac{d_A}{\mu e}}$

où :

$\mu$  = perméabilité relative du ruban d'acier, habituellement prise égale à 300.

$$k = \frac{1}{1 + \frac{6,3}{300 \cdot 0,13}} = 0,86$$

$$\lambda_2' = \frac{(2,8)^2 \cdot (0,86)^2 \cdot 10^{-9}}{0,315 \cdot 10^{-5} \cdot 6,3 \cdot 0,13} = 22,47 \cdot 10^{-4}$$

Pertes par courant de Foucault:

$$\lambda_2'' = \frac{2,25 \cdot s^2 \cdot k^2 \cdot e \cdot 10^{-8}}{R \cdot d_A}$$

$$\lambda_2'' = \frac{2,25 \cdot (2,8)^2 \cdot (0,86)^2 \cdot 0,13 \cdot 10^{-8}}{0,315 \cdot 10^{-5} \cdot 6,3} = 0,85 \cdot 10^{-3}$$

Le facteur de pertes total dans l'armure est donné par la somme des facteurs correspondants aux pertes par hystérésis et courant de Foucault, soit :  $\lambda_2' + \lambda_2''$

$$\lambda_2' + \lambda_2'' = 2,247 \cdot 10^{-3} + 0,85 \cdot 10^{-3} = 3,10 \cdot 10^{-3}$$

$$\lambda_2' + \lambda_2'' = 3,10 \cdot 10^{-3}$$

Pour les câbles triplomb armés, l'effet d'écran résultant des courants dans les gaines réduit les pertes dans l'armure. La valeur  $(\lambda_2' + \lambda_2'')$  calculée ci-dessus doit être multipliée par le facteur  $(1 - \lambda_1')$ .

d'où :

$$\lambda_2 = (\lambda_2' + \lambda_2'') (1 - \lambda_1') = 3,10 \cdot 10^{-3} (1 - 4,156 \cdot 10^{-3}) = 3,09 \cdot 10^{-3}$$

$$\lambda_2 = 3,09 \cdot 10^{-3}$$

## 2°) Calcul des résistances thermiques.

### a°) Résistances thermiques des constituants du câble, $T_1, T_2, T_3$ .

Nous calculerons les résistances thermiques linéiques des différentes parties du câble,  $T_1, T_2, T_3$ . Les résistances thermiques des matériaux utilisés comme isolant et revêtement sont données par la norme CEI 287.

#### a-1) Résistance thermique entre conducteur et gaine $T_1$ .

$$T_1 = 0,366 \rho_1 \log_{10} \left( \frac{D_i}{d_c} \right)$$

$\rho_1$  = résistivité thermique de l'isolant en °C.cm/W

$D_i$  = diamètre extérieur de l'isolant

$d_c$  = diamètre de l'âme

$$T_1 = 0,366 \cdot 600 \cdot \log_{10} \left( \frac{2,36}{1,06} \right) = 76,33 \text{ °C.cm/W}$$

a-2) résistance thermique  $T_2$ .

La résistance thermique des bourrages et revêtements situés sous l'armure est donnée par :

$$T_2 = \frac{\rho_2}{6 \pi} \cdot \bar{G}$$

où

$\rho_2$  = résistivité thermique du revêtement et bourrages  
( $\rho_2 = 600^\circ\text{C cm/W}$ ).

$\bar{G}$  = facteur géométrique donné par la fig.20 page 46 .

Epaisseur du revêtement entre les enveloppes et l'armure = 2 mm  
diamètre extérieur de l'enveloppe = 28 mm

$\frac{2}{28} = 0,07$  la courbe de la fig 20 page 46 nous donne

$$\bar{G} = 0,49$$

$$T_2 = \frac{600}{6.3,14} \cdot 0,49 = 15,61^\circ\text{C cm/W}$$

$$T_2 = 15,61^\circ\text{C cm/W}$$

a-3) Résistance thermique  $T_3$  du revêtement extérieur :

$$T_3 = 0,366 \rho_3 \log_{10} \left( \frac{D_e}{D_a} \right)$$

où

$\rho_3$  = résistivité du revêtement ( $\rho_3 = 600^\circ\text{C cm/W}$ )

$D_e$  = diamètre extérieur du revêtement extérieur ( $D_e = 7 \text{ cm}$ )

$D_a$  = diamètre intérieur du revêtement extérieur ( $D_a = 6,6 \text{ cm}$ )

$$T_3 = 0,366.600.\log_{10} \left( \frac{7}{6,6} \right) = 12,92^\circ\text{C cm/W}$$

b°) Résistance thermique extérieure  $T_4$ .

On suppose que le câble est enterré, seul ou éloigné d'au moins 1 m de tout autre câble, à 80 cm de profondeur.

$$T_4 = 0,366 \rho_4 \log_{10} \left( u + \sqrt{u^2 - 1} \right)$$

$\rho_4$  = résistivité thermique du sol : elle dépend de nombreux facteurs, en particulier de la résistivité propre des matériaux constitutifs et surtout de l'humidité du terrain. Celle-ci est fonction :

- de la constitution du terrain
- du niveau de la nappe phréatique
- de la saison et des conditions locales de précipitation
- du type et de la densité de la végétation
- des caractéristiques de la surface du sol.

On admet que le sol présente une résistivité thermique de 85 °c cm/W, valeur qui constitue une moyenne parmi les valeurs que l'on trouve sur le parcours de canalisations enterrées.

$$u = \frac{L}{r_e} \quad \text{où}$$

L = distance de la surface du sol à l'axe du câble (L=80 cm)

$r_e$  = rayon extérieur du câble ( $r_e = 3,5$  cm)

$$u = \frac{80}{3,5} = 22,86$$

$$T_4 = 0,366 \cdot 85 \cdot \log_{10} \left( 22,86 + \sqrt{(22,86)^2 - 1} \right)$$

$$T_4 = 51,64 \text{ °c cm/W}$$

En remplaçant chaque terme par sa valeur numérique dans l'expression ci-dessous, on trouve l'intensité du courant alternatif admissible dans le câble:

$$I = \left[ \frac{\Delta\theta - W_d \left[ 0,5 T_1 + n (T_2 + T_3 + T_4) \right]}{R \left[ T_1 + n T_2 (\lambda_1) + n (1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + T_4) \right]} \right]^{1/2}$$

$$\left[ \frac{45 - 2,72 \cdot 10^{-3} \left[ 0,5 \cdot 76,33 + 3(15,61 + 12,92 + 51,64) \right]}{0,315 \cdot 10^{-5} \left[ 76,33 + 3 \cdot 15,61(1 + 4,15 \cdot 10^{-3}) + 3(1 + 4,15 \cdot 10^{-3} + 3,09 \cdot 10^{-3}) \right]} \right]^{1/2}$$

$$I = 210 \text{ A}$$

Cette valeur satisfait à la norme NFC33-100

Puissance transmissible sur le câble :

$$P = 3 V I = 3 \cdot 17500 \cdot 210 = 11025000 \text{ VA}$$

$$P = 11025 \text{ KVA}$$

**B - COURANT ADMISSIBLE EN REGIME DE COURT-CIRCUIT.**

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

On suppose que le câble est initialement chaud (65°C), que la température des conducteurs en fin de surcharge ne dépasse pas 150°C et que l'échauffement est adiabatique.

On peut alors écrire :

$$\frac{I_{cc}}{S} \cdot \sqrt{t} = Kc \left[ A s^{1/2} / mm^2 \right]$$

$$\text{avec } K_c = \left[ \frac{\delta}{\rho_{20} \cdot e_{20}} \text{Log}_e \left[ \frac{1 + a_{20} (\Theta_f - 20)}{1 + a_{20} (\Theta_a - 20)} \right] \right]^{\frac{1}{2}}$$

où  
 $I_{cc}$  (A) : intensité admissible, en régime de court-circuit, dans le conducteur.

$t$  (s) : durée du court-circuit ( on suppose que  $t = 1s$  )

$S$  ( $\text{mm}^2$ ) : section du conducteur (  $S = 70 \text{ mm}^2$  )

$\delta$  ( $\text{J}/^\circ\text{C} \cdot \text{mm}^3$ ) : chaleur volumique du métal du conducteur ( pour le cuivre  $\delta = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ J}/^\circ\text{C} \cdot \text{mm}^3$  )

$\rho_{20}$  ( $\Omega \cdot \text{mm}$ ) : résistivité électrique du conducteur à  $20^\circ\text{C}$  ( pour le cuivre  $\rho_{20} = 1,7241 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{mm}$  )

$a_{20}$  ( $^\circ\text{C}^{-1}$ ) : coefficient de variation de  $\rho$  avec la température ( pour le cuivre  $a_{20} = 3,93 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  )

$\Theta_f$  ( $^\circ\text{C}$ ) : température du conducteur à la fin du court-circuit ( $\Theta_f = 150^\circ\text{C}$  norme NF C33-100 )

$\Theta_a$  ( $^\circ\text{C}$ ) : température du conducteur au début du court-circuit ( $\Theta_a = 65^\circ\text{C}$  )

$$I_{cc} = \frac{K_c \cdot S}{\sqrt{t}}$$

$$K_c = \left[ \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{1,7241 \cdot 10^{-5} \cdot 3,93 \cdot 10^{-3}} \text{Log}_e \left[ \frac{1 + 3,93 \cdot 10^{-3} (150 - 20)}{1 + 3,93 \cdot 10^{-3} (65 - 20)} \right] \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$K_c = 1,1394 \cdot 10^2 \text{ A} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}} / \text{mm}^2$$

$$I_{cc} = 7975 \text{ A}$$

Densité admissible :

$$\sigma_{cc} = \frac{I_{cc}}{S} = \frac{7975}{70} \approx 114 \text{ A/mm}^2 \text{ cette valeur satisfait à la norme NFC33.100}$$

Calcul du prix de revient à l'usine d'un Km de câble armé isolé au papier imprégné ( CAPI) à champ radial tension spécifiée = 17500 V. Section : 3 x 70 mm<sup>2</sup>.

Coût des matières utilisées.

Désignation matières premières.	Epais. (mm)	diam. (mm)	poids (kg/km câble)	prix unit. (Da/kg)	Montant (DA/km de câble)
Papier semi-conducteur	0,2	11,1	10,12	10,92	110,51
Enveloppe papier Kraft 100 gr	6,5	24,1	873,95	3,75	3277,31
2 papiers Kraft numérotés			35,2	5,57	196,06
papier métallisé	0,15	24,4	43,56	18,03	785,39
Assemblage		52,5			
bourrage filinjutete			533,5	4,70	2507,45
ruban textile en guirlandage	0,25	53	20,13	44,24	890,55
Matière d'imprégnation			1525,15	6,03	9196,65
Tube de plomb	2,3	57,6	5008,3	5,25	26293,57
Matelas filinjute imprégné	2	61,6	255,2	4,70	1199,44
2 feuillards acier 50 x 0,8	1,8	65,2	212 3	2,63	5583,49
Matelas filinjute imprégné	2	69,2	288,2	4,70	1354,54
Bitume			1086,8	0,86	934,65
Craie			190,3	0,87	165,56
Coût des matières premières ...					52.495,17
Coût du cuivre (19x2,14) :.....		10,7	1972,2	12,13	23.922,79

Prix du cuivre = cours cuivre + transformation ( laminoir, tréfileuses, câbleuses).

Poids ( kg/km de câble) = poids de matière première utilisée dans le câble + 10 % de ce poids représentant les déchets de fabrication.

Calcul des frais de transformation des matières premières.

Désignation machines	vitesse	Nbre d'heures	coef. mach. e <sub>i</sub>
Rubaneuse	80 m/h	75 h	63,75
Assembleuse	100 m/h	10 h	12,60
Imprégnation		101 h	15,15
Presse à plomb		9h 45 mn	13,56
Armeuse	80 m/h	12h 30 mn	20,12
$\Sigma e_i$ .....			125,18

Coût de base appliqué aux coefficients machines =  $M_0 = 106,64$

Montant des frais de transformation des matières premières :

$$m_0 \cdot \Sigma e_i = 106,64 \cdot 125,18 = 13349,19 \text{ DA.}$$

Le coût des matières premières est majoré de 8,4 % représentant les frais d'importation, d'essais de réception et de stockage :

Prix de revient des matières premières = coût des matières premières X 1,084.  $52\ 495,17 \cdot 1,084 = 56\ 904,76 \text{ DA.}$

Prix de revient matières premières ..... 56 904,76

Coût du cuivre ..... 23 922,79

Coût main d'oeuvre ..... 13 349,19

Total ... 94 176,74 DA.

Ce total est majoré de 11,5 % représentant les charges indirectes .

Prix de revient à l'usine d'un km de câble ( CAPI) =

$$94\ 176,74 \cdot 1,115 = 105.007,07 \text{ DA.}$$

P.R.U. d'un km de câble C.A.P.I. = 105.007,07 DA.
---

Les câbles isolés aux matières synthétiques ( PVC, EPDM, PRC) suivent un processus de fabrication différent de celui des câbles isolés au papier imprégné. Il est intéressant de faire une étude économique comparative des deux types de câbles. Pour cela on calcul aussi le prix de revient d'un câble isolé à l'EPDM ( éthylène - propylène, diène - monomère) de même caractéristiques électriques que le câble isolé au papier imprégné.

Calcul du prix de revient à l'usine d'un km de câble EPDM armé, à champ radial, tension spécifiée = 17500 V.

Section : 3 x 70 mm<sup>2</sup>.

Coût des matières premières.

Designation matières premières	Épais. (mm)	diam (mm)	poids (kg/km) câble	prix unit. (DA/kg)	montant (DA/km de câble)
2 rubans nylon Sc 2 : L = 20	0,5	11,7	19,5	71,28	1389,96
Enveloppe en LBMT 55	8	27,7	26,35	3,65	9617,75
Ruban nylon Sc2 L=30	0,25	28,2	23,6	73,95	1745,22
Ruban cuivre 30x0,1	0,25	28,7	338,2	14,02	4741,56
Assemblage		61,7			
Boudin central en LBO 75.		4,3	28,8	1,76	50,69
Gaine de bourrage en LBO 75.	2,2	66,1	2893,2	1,76	5092,03
Ruban textile (ou coton gommé)	0,25	66,6	31,7	44,24	1402,41
3 papiers crêpés bitumés	0,8	68,2	182,4	4,91	895,58
2 feuillets acier 50 x 0,8.	1,8	71,8	2327,9	2,07	4839,45
Gaine en PVC F.3	3,1	78	1225	3,58	4385,50
Coût des matières premières ...					34.160,16
Coût du cuivre (19x2,14):		10,7	1972,2	12,13	23.922,79

Poids ( kg/km de câble) = poids de matière première utilisée dans le câble + 20 % de ce poids représentant les déchets de fabrication.

Calcul des frais de transformation des matières premières:

Désignation machines	poids (kg/km de câble)	coût (DA/kg)	montant (DA/km de câble)
F LBMT 55	2635	0,92	2424,20
F LBO 75	28,8	0,92	26,50
F LBO 75	2893,2	0,92	2661,74
F 3	1225	0,47	575,75
Coût main d'oeuvre mélange (1) .....			5688,19

Désignation machines	vitesse	Nbre d'heures	Coef. machine $e_i$
Rubaneuse (3km)	80m/h	37h 30 mn	27,38
boudineuse c/c 120	140kg/h	19h	25,62
réchauffeur		19h	11,40
presse à plomb		20h	27,80
vulcanisation (3 km)		4h 30 mn	3,60
Dépouilleuse ( 3 km)	500m/h	6h	6,96
Rubaneuse	80m/h	12h 30mn	9,13
Boudineuse c/c 90		1h	0,34
Assembleuse	100m/h	10h	12,60
Réchauffeur	80m/h	20h 45mn	12,45
Rubaneuse	80m/h	12h 30mn	9,13
Armeuse	80m/h	12h 30mn	20,12
Boudineuse	90kg/h	13h 45mn	21,07
Boudineuse c/c 120	140kg/h	20h 45mn	28,63
$\Sigma e_i$ .....			216,23

Coût de base appliqué aux coefficients machines =

$$m_0 = 106,64$$

$$\text{Coût main d'oeuvre (2)} : m_0 \times \sum a_i = 106,64 \cdot 216,23 = 23058,77 \text{ DA}$$

Prix de revient des matières premières  $\neq$  coût des matières premières  $\times 1,084$

$$34\ 160,16 \cdot 1,084 = 37\ 029,61 \text{ DA.}$$

Prix de revient des matières premières .....	37 029,61
Coût du cuivre .....	23 922,79
Coût main d'oeuvre (1)+(2) .....	28 746,96
	<hr/>
total ...	89 699,36 DA

Ce total est majoré de 11,5 % ( charges indirectes) =

prix de revient à l'usine d'un km de câble sec (EPDM) =

$$89\ 699,36 \cdot 1,115 = 100014,79 \text{ DA.}$$

P.R.U. d'un km de câble sec (EPDM) = 100014,79 DA

Les résultats précédents nous montrent que le câble sec revient moins cher à l'usine.

- CONCLUSION -

Notre but durant ce travail n'a pas été le calcul d'un câble ou sa modification, mais l'étude de la technologie de sa fabrication.

Les essais effectués au laboratoire de la Cablerie ont montré que le câble 30 KV isolé au papier imprégné, fabriqué par SONELEC, satisfait à toutes les normes en vigueur. Ses performances seraient améliorées avec une meilleure surveillance de l'opération de rubannage ( bon recouvrement des dé-joints) et le filtrage de l'huile d'imprégnation avant sa réutilisation.

Le papier <sup>imprégné de</sup> ~~au~~ matières non migrante est toujours utilisé, mais il est fortement concurrencé par les matières synthétiques.

L'Isolation aux matières synthétiques est plus homogène, son application plus rapide, elle présente moins de pertes diélectriques et vieillit moins vite que celle au papier. Elle admet des températures allant jusqu'à 90°C tandis que l'isolation au papier ne peut dépasser 65°C.

Les conditions de pose et d'exploitation semblent être à l'avantage du câble sec ( câble plus léger, souple, pouvant être posé verticalement sans risque d'écoulement, boîtes de jonction plus faciles à réaliser).

Les calculs de prix de revient nous a montré que le câble sec est plus économique.

Les câbles à isolation synthétique semblent constituer l'avenir du progrès. Dans certains pays on a réussi à appliquer l'isolation synthétique ( polyéthylène réticulé) dans les câbles à 245 KV.

Ce projet est aussi un complément appréciable pour notre formation. Les suggestions fructueuses qui nous ont été fournies, les facilités d'accès dans les différents ateliers et laboratoires ( laboratoire H.T en particulier) enrouragent énormément les rapports Université - Industrie.

Nous espérons que tout un chacun trouvera dans ce modeste travail des renseignements utiles sur le câbles 30 KV isolé au papier imprégné de matière non migrante.

- TABLE DES MATIERES -

	page
INTRODUCTION .....	1
I-ETUDE DU PROCESSUS DE FABRICATION DU CABLE .....	2
A-LAMINAGE.....	2
B-DECAPAGE.....	2
C-TREFILAGE.....	3
1°) Machine de tréfilage.....	3
a) Organes principaux d'une tréfileuse.....	3
b) Filères .....	3
2°) Principe du tréfilage.....	3
3°) Lubrification.....	4
4°) Traitements thermiques.....	4
D-CABLAGE.....	5
1°) Nombre et disposition des brins.....	5
2°) Choix du pas et sens du pas de câblage.....	5
E-ISOLATION .....	7
1°) Rubanage.....	7
a) Semi-conducteur .....	7
b) Papier isolant .....	8
c) Papier métallisé .....	8
d) Imprégnation du papier .....	8
F-REJETEMENT .....	10
1°) Mise sous gaine de plomb .....	10
2°) Câble triplomb.....	11
3°) Matelas .....	11
4°) Armure de feuilards.....	11
5°) Revêtement extérieur.....	13
II-PROPRIETES DES MATERIAUX UTILISES DANS LA FABRICATION DU CABLE.....	15
A-AME CONDUCTRICE .....	15
1°) Principales caractéristiques du cuivre.....	16
2°) Section de l'ame .....	16
B-PAPIER-SEMI- CONDUCTEUR .....	16
C-ISOLANT .....	17
1°) Propriétés du papier non imprégné .....	17
e°) Epaisseur .....	17
b°) Masse volumique et perméabilité à l'air .....	18
c°) Hygroscopicité .....	18
d°) Propriétés mécaniques .....	18
e°) Propriétés thermiques .....	19
2°) Propriétés de l'imprégnant .....	20
3°) Propriétés du papier imprégné .....	21
a°) Permittivité relative et facteur de dissipation .....	21
b°) Rigidité diélectrique .....	21
4°) Papier métallisé .....	22

	Page
5°) Revêtement .....	24
a°) Gaine de plomb .....	24
b°) Armure en feuillets .....	24
c°) Jute goudronné .....	24
III- ANALYSE THEORIQUE DES CONTRAINTES ELECTRIQUES ET DIELECTRIQUES	
DANS LE CABLE .....	25
1°) Champ électrique- Généralités .....	25
2°) Champ radial .....	26
3°) Gradient de potentiel dans un câble à champ radial .....	27
4°) Influence du rayon de l'âme sur l'épaisseur de l'isolant .....	29
IV-ESSAIS ET MESURES SUR LE CABLE .....	32
1°) Caractéristiques et dimensions du câble .....	32
2°) Mesure de la résistance linéique d'un conducteur .....	32
3°) Mesure des pertes diélectriques.....	33
a°) Rappels théoriques .....	33
b°) Mesure de la capacité C et tg $\delta$ du câble .....	35
4°) Essai de pliage .....	43
5°) Essai diélectrique .....	43
6°) Vérification de la rigidité diélectrique sous tension de courte durée .....	43
7°) Essai de chauffage .....	44
V-CALCUL DU COURANT ADMISSIBLE DANS LE CABLE .....	45
A-COURANT ADMISSIBLE EN REGIME PERMANENT (FACTEUR DE CHARGE 100% )...	45
1°) Calcul des pertes .....	48
a°) Résistance en courant alternatif du conducteur R .....	48
b°) Pertes diélectriques W .....	51
c°) Pertes dans les gaines $d_1$ .....	52
d°) Pertes dans les armures $\lambda_2$ .....	53
2°) Calcul des résistances thermiques .....	55
a°) Résistances thermiques des constituants du câble $T_1, T_2, T_3$ .....	55
a-1) Résistance thermique entre conducteur et gaine $T_1$ .....	55
a-2) Résistance thermique $T_2$ .....	56
a-3) Résistance thermique $T_3$ du revêtement extérieur .....	56
b°) Résistance thermique extérieure $T_4$ .....	57
B-COURANT ADMISSIBLE EN REGIME DE COURT-CIRCUIT .....	58
CALCUL DU PRIX DE REVIENT A L'USINE D'UN KM DE CABLE ISOLE AU PAPIER IMPREGNE .....	61
CALCUL DU PRIX DE REVIENT A L'USINE D'UN KM DE CABLE SEC (EPDM) .....	63
CONCLUSION .....	66

## BIBLIOGRAPHIE.

- Installations électriques à haute et basse tension tome 1

A.Mauduit ( DUNOD)

- Techniques de l'Ingénieur.
- Normes U.T.E. et C.E.I.

