

وزارة الجامعات  
Ministère aux Universités

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

## PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE ET CONCEPTION  
D'UN CABLE DE 30kV ISOLE AU PRS

Proposé par :

A. BOUBAKEUR

Etudié par :

M. HASNI  
M. ACHOUR

Dirigé par :

A. BOUBAKEUR

PROMOTION

JUIN 91

وزارة الجامعات  
Ministère aux Universités

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

## PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE ET CONCEPTION  
D'UN CABLE DE 30kV ISOLE AU PRS

Proposé par :

A. BOUBAKEUR

Etudié par :

M. HASNI

M. ACHOUR

Dirigé par :

A. BOUBAKEUR

PROMOTION

JUIN 91

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

إِنَّ الْحَمْدَ لِلَّهِ نَحْمَدُهُ وَنُسْتَعِينُهُ وَنَسْتَغْفِرُهُ وَنَسْتَهْدِيهِ وَنُصَلِّي  
وَنُصَلِّ عَلَى نَبِيِّ الرَّحْمَةِ وَصَحَابَتِهِ أَجْمَعِينَ.

لأن فضل العلم في الإسلام فضل عظيم إذ قرن الله شهادة  
العلماء بشهادة الملائكة له بالوحدانية فقال تعالى:

يَسْهَدُ اللَّهُ أَنَّهُ لَا إِلَهَ إِلَّا هُوَ الْمَلِكُ الْقَائِمُ أُولُو الْعِلْمِ  
آل عمران ١٨

وقال نبي الرحمة:  
«اطْلُبُوا الْعِلْمَ مِنَ الْمَهْدِ إِلَى اللَّحْدِ»

«وَقَلَّ بِي زِدُّ بِي عِلْمًا»

DEDICACES

A Mes parents qui ont tout fait pour que je réussisse

A Mes frères et soeurs

A Toute ma grande famille.

A tous mes amis.

HASNI MOURAD

A Mes parents

A Mes frères et soeurs

A Toute ma famille

A tous mes amis

A Tous ceux qui prônent la solution ISLAMIQUE

ACHOUR MAHMOUD

---

## REMERCIEMENTS

---

Nous tenons à exprimer notre vive reconnaissance à toutes les personnes qui, humainement ou matériellement, nous ont aidé à réaliser ce travail .

En particulier :

- Monsieur A. BOUBAKEUR, pour les précieux conseils ainsi que les fructueuses suggestions qu'il nous a fournis tout au long de notre travail.

- Monsieur MUSTAPHA HAMIA pour le soins avec lequel il s'est occupé de nous à l'ENICAB .

- Monsieur MOUHOUB pour l'aide qu'il nous a fournit lors de la réalisation des differents essais au laboratoire de haute tension.

- Tous le personnel de l'ENICAB pour les facilités et l'aide qu'ils nous ont fournit tout au long de notre stage.

- Que chacun veuille trouver ici l'expression de notre profonde gratitude.

A.M ET H.M

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

CHAPITRE I

I./- UTILISATION DES POLYMERES DANS LES CABLES DE HAUTE TENSION.

I.1/ CARACTERISTIQUES DES POLYMERES UTILISES EN HAUTE TENSION

I.1.1/PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DES POLYMERES.....2

I.1.2/PROPRIETES ELECTRIQUES DES POLYMERES.....4

I.1.3/VIEILLISSEMENT.....6

I.2/ POLYMERES UTILISES DANS LES CABLES DE HAUTE TENSION

I.2.1/LE POLYETHYLENE.....7

I.2.2/LE POLYCHLORURE DE VINYLE (PVC).....8

I.2.3/L'ETHYLENE PROPYLENE-DIENE MONOMERE (EPDM).....9

I.2.4/LE POLYETHYLENE RETICULE CHIMIQUEMENT (PRC).....10

I.3/ LE POLYETHYLENE RETICULE AU SILANE (PRS)

I.3.1/DIFFERENTS PROCEDES DE RETICULATION.....13

I.3.2/CHIMIE DU PROCEDE SIOPLAS.....15

I.3.3/PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DU PRS.....16

I.3.4/COMPORTEMENT A LA CHALEUR.....17

CHAPITRE II

II./- CONCEPTION DU CABLE ISOLE AU PRS.

II.1/ ANALYSE THEORIQUE DES CONTRAINTES DIELECTRIQUES DANS LE CABLE

II.1.1/GENERALITES SUR LE CHAMP ELECTRIQUE.....18

II.1.2/MECANISMES DE RUPTURE DIELECTRIQUE DES  
 ISOLANTS SOLIDES.....20

II.1.3/SCHÉMA EQUIVALENT D'UN DIELECTRIQUE.....22

II.1.4/CHOIX DE LA TENSION DU CABLE.....24

II.2/.DIMENSIONNEMENT DU CABLE ISOLE AU PRS.

II.2.1/AME CONDUCTRICE.....26  
 II.2.2/COUCHE SEMI-CONDUCTRICE.....27  
 II.2.3/ISOLANT.....28  
 II.3.4/ECRAN METALLIQUE.....31  
 II.3.5/GAINE DE PROTECTION.....33

II.3/.PROCEDE DE FABRICATION DU CABLE.

II.3.1/ REALISATION DE L'AME.....36  
 II.3.2/ RUBANAGE DES ECRANS SEMI-CONDUCTEURS.....39  
 II.3.3/ EXTRUSION ET RETICULATION DE L'ISOLANT.....39  
 II.3.4/ RUBANAGE DE L'ECRAN METALLIQUE.....41  
 II.3.5/ EXTRUSION DE LA GAINE DE PROTECTION.....41

CHAPITRE III

III./-ESSAIS ET MESURES NORMALISES SUR CABLE.

GENERALITES

III.1/.ESSAIS DE SERIE.

III.1.1/ MESURE DE LA RESISTANCE LINEIQUE.....45  
 III.1.2/ VERIFICATION DE LA RIGIDITE DIELECTRIQUE DE COURTE  
 DUREE A FREQUENCE INDUSTRIELLE.....46  
 III.1.3/ MESURE DE LA RESISTANCE D'ISOLEMENT A TEMPERATURE  
 AMBIANTE.....46  
 III.1.4/ MESURE DE LA CONSTANTE DIELECTRIQUE  $\epsilon_r$ .....47  
 III.1.5/ ESSAIS MECANIQUES.....49

III.2/.ESSAIS DE TYPE

III.2.1/ESSAI D'ENROULEMENT .....51  
 III.2.2/MESURE DU FACTEUR DE PERTES DIELECTRIQUE  $\text{tg}\delta$  ET DE LA  
 CAPACITE C EN FONCTION DE LA TENSION.....52

III.2.3/MESURE DU FACTEUR DE PERTES DIELECTRIQUES $tg\delta$ EN FONCTION DE LA TEMPERATURE.....	55
III.2.4/ESSAI DU CYCLE DE CHAUFFAGE.....	58
III.2.5/ESSAI DE TENUE AUX ONDES DE CHOC SUIVI D'UN ESSAI DE TENSION A FREQUENCE INDUSTRIELLE.....	58
III.2.6/ESSAI DE RIGIDITE DIELECTRIQUE.....	59
III.2.7/MESURE DE LA RESISTANCE D'ISOLEMENT A LA TEMPERATURE MAXIMALE DE SERVICE $90^{\circ}C$ .....	60
III.2.8/CALCUL DU COURANT ADMISSIBLE DANS LE CABLE EN REGIME PERMANENT ET EN REGIME DE COURT-CIRCUIT.....	61

CHAPITRE IV

IV.-ETUDE COMPARATIVE DES PERFORMANCES DU PRS

IV.1/ <u>COMPARAISON GENERALE ENTRE LES ISOLANTS SECS ET LE PAPIER          IMPREGNE.....</u>	63
IV.2/ <u>COMPARAISON ENTRE LE CABLE ISOLE AU PRS ET LES CABLES          ISOLEES AU PRC ET LE PAPIER IMPREGNE.</u>	
IV.2.1/ ETUDE ECONOMIQUE SOMMAIRE.....	64
IV.2.2/ COMPARAISON DES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES.....	65

CONCLUSION:.....67

RIBLIOGRAPHIE......69

ANNEXE I

Evaluation de l'intensité du courant nominal alternatif  
 admissible dans le câble. ....71

ANNEXE II

Evaluation de l'intensité du courant de court-circuit  
 alternatif admissible dans le câble... ....81

## INTRODUCTION

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. Cependant, le développement des zones urbanisées conduit à une introduction de plus en plus large des câbles souterrains de moyenne tension, constitués par des conducteurs isolés sur toute leur longueur et réunis dans une enveloppe commune convenablement protégée [1].

Dans la plupart des pays, les câbles de 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'application.

La conductivité  $\sigma$ , la permittivité  $\epsilon$ , le facteur de pertes  $\text{tg}\delta$  en régime variable et le champs maximum admissible  $E_c$  sont les quatres grandeurs au moyen desquelles l'ingénieur electricien caractérise le plus souvent un diélectrique [2].

Dans ce but, notre étude portera sur un câble 30kV isolé au PRS fabriqué par la cablerie ENICAB de Gué de Constantine. Nous procéderons donc, d'abord à l'étude de certaines propriétés importantes des polymères, en particulier celles du PVC, du PE, de l'EPDM et du PRC, puis nous identifierons l'isolant qui fait l'objet de notre étude c'est à dire le PRS. Nous analyserons ensuite les différents constituants du câble isolé au PRS ainsi que son dimensionnement. Nous décrirons le procédé de fabrication adopté et enfin nous présenterons les différents essais effectués, et conclurons quand à la bonne ou mauvaise tenu du PRS en tant qu'isolant d'un câble de Moyenne Tension.

## UTILISATION DES POLYMERES DANS

## LES CABLES DE HAUTE TENSION

I.1/ CARACTERISTIQUES DES POLYMERES UTILISES EN HAUTE TENSION

Les matériaux diélectriques utilisés aujourd'hui sont extrêmement nombreux et variés; différents critères peuvent être envisagés pour les classer, tel que leur état : solide, liquide ou gazeux, leur origine : naturelle ou artificielle...etc.

Quelque soit le critère retenu, les diélectriques organiques de synthèse occupent une place très importante dans l'industrie.

En effet, chacun peut constater qu'au cours de ces dernières années les applications des polymères se sont fortement développées et étendues à tous les domaines, particulièrement électrique [2].

Il est largement admis que ces matériaux ont désormais acquis leur <<lettres de noblesse>> [4].

I.1.1/ PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DES POLYMERESa) DEFINITION

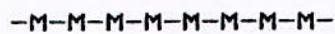
Certaines molécules simples ont la propriété, sous des conditions physico-chimiques appropriées, de s'unir les unes aux autres pour former des molécules plus grandes constituant une répétition dans l'espace de la molécule initiale. On appelle polymérisation ce type de réaction, et polymère la substance qui en résulte. Par le terme de monomère, on désigne la molécule de départ. Un polymère formé d'un seul type de monomère est appelé homopolymère; s'il comprend deux monomères différents ou d'avantage c'est un copolymère. Un homopolymère peut présenter trois structures différentes (fig(1)),

par contre les structures d'un copolymère sont plus nombreuses plus complexes [2].

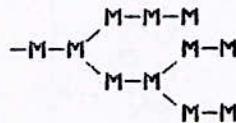
La structure moléculaire des polymères influe de façon décisive sur leurs propriétés mécaniques et électriques .

---

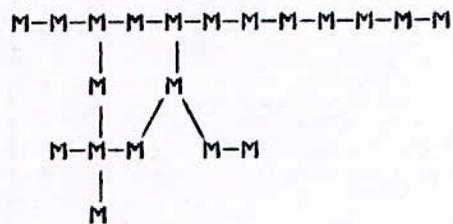
LINEAIRE



RAMIFIEE



RETICULEE



---

Fig(1) : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES STRUCTURES  
D'UN HOMOPOLYMERE

## b) COMPORTEMENT CHIMIQUE DES POLYMERES

Au contact des liquides ou des gaz le comportement des polymères varie suivant leur nature et leur composition, il peut y avoir diffusion, absorption avec gonflement ou gélatinisation, dissolution ou destruction, selon l'agressivité des produits en présence, ceci peut donc causer d'importantes contraintes qui peuvent être catastrophiques pour le matériau [3] et [4].

## c) PROPRIETES MECANIKES

L'importance des polymères utilisés en électrotechnique dépend en premier lieu de leurs propriétés mécaniques excellentes, leur aptitude aux déformations et leur grande sensibilité aux variations de la température.

Ils se distinguent donc par:

- leur masse volumique relativement faible.
- leur pouvoir d'isolement calorifique élevé.
- leur souplesse et leur grande élasticité.
- leur résistance élevée aux agressions atmosphériques.
- leur importante résistance aux efforts de compression et de traction.
- leur bonne résistance à l'usure.

## I.1.2/ PROPRIETES ELECTRIQUES DES POLYMERES

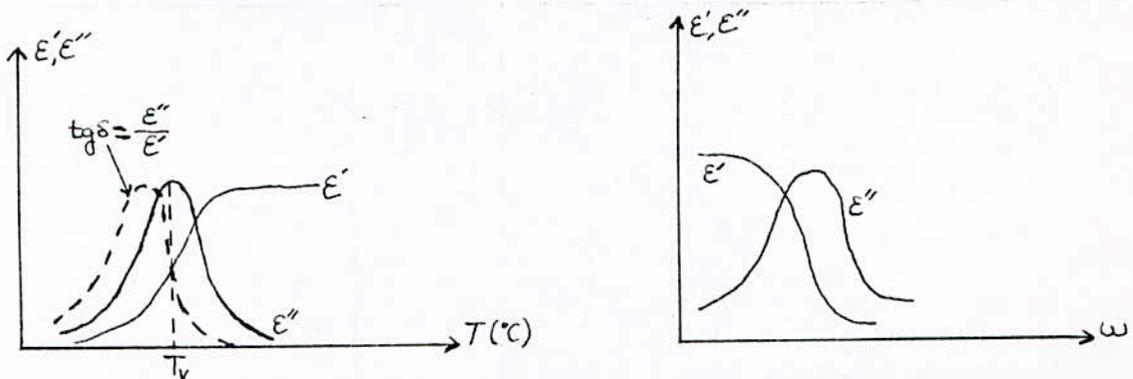
La plupart des propriétés électriques sont d'une façon ou d'une autre liées aux structures moléculaires du polymère. Il faut cependant tenir compte, lors de l'étude de ces propriétés, de la présence de charges et d'adjuvants, de l'absorption éventuelle d'humidité et enfin de la morphologie du polymère [3] et [4].

### a) RIGIDITE DIELECTRIQUE

On trouve généralement pour les polymères des valeurs comprises entre 150 et 500 (kV/cm). Cette rigidité diélectrique est influencée par différents paramètres dont les plus importants sont:

- La structure du polymère
- Le temps d'exposition à la haute tension
- La morphologie: présence de vides, bulles...etc

### b) ABSORPTION DIELECTRIQUE



Fig(2) : VARIATION DE  $\epsilon$  ET DE  $tg\delta$  EN FONCTION DE LA TEMPERATURE ET DE LA FREQUENCE

On sait que:  $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$  et  $tg\delta = \epsilon''/\epsilon'$

D'après figure (2) , on voit bien que  $\epsilon$  augmente brutalement lorsque la température  $t$  augmente ou la fréquence  $f$  décroît. Au voisinage de la transition vitreuse (passage de l'état solide à l'état caoutchoutique),  $\epsilon$  présente un maximum [3] .

### c) PROPRIETES ELECTRIQUES SUPERFICIELLES

La résistivité superficielle est fortement influencée par l'humidité. Elle caractérise la "peau" du matériau.

La résistance à la décharge superficielle est importante dans les applications où une décharge électrique peut endommager le matériau, et en le, carbonisant, le rendre conducteur [3].

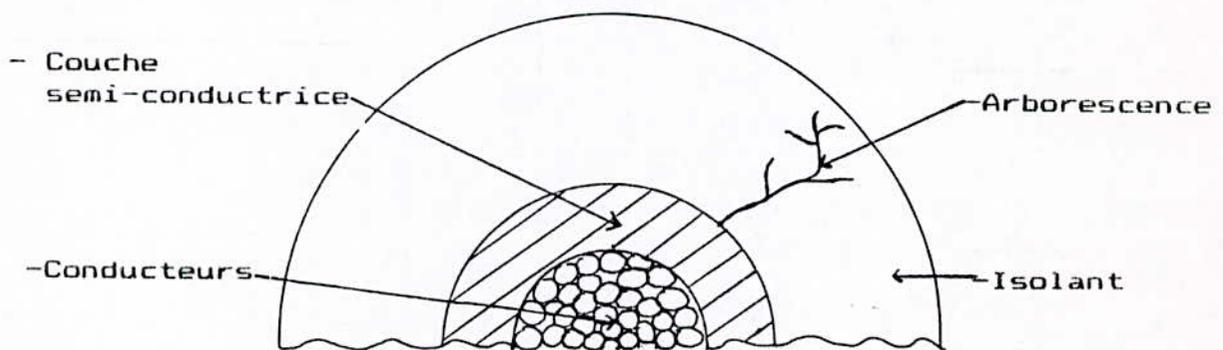
#### d) RESISTIVITE TRANSVERSALE

La résistivité transversale ( $\rho$ ) d'un matériau, est le quotient du gradient de Potentiel par la densité de courant qui le traverse. Elle caractérise le pouvoir isolant du matériau [4].

Pour la majorité des polymères, la valeur de la résistivité transversale est supérieure à  $10^{12}$   $\Omega$ .cm à la température ambiante.

#### I.1.3 / VIEILLISSEMENT

De nombreux phénomènes sont susceptibles d'altérer un diélectrique au cours du temps (vieillissement), provoquant en particulier une diminution de la rigidité diélectrique. Ils sont responsables de la majorité des claquages intervenant des mois, voir des années après la mise sous Tension. De telles réductions de la rigidité diélectrique se manifestent par exemple quand le polymère présente des défauts d'homogénéité, cavités, inclusion de particules étrangères...etc. Des décharges particulières prenant naissance au voisinage de ces défauts, dès que le champs est suffisant, peuvent (par érosion, fusion localisée ou autre processus) créer dans le polymère, des réseaux de canaux plus ou moins conducteurs, appelés arborescences (Fig(3)), qui croissent au cours du temps provoquant un claquage dès que leur taille est suffisante [2].



Fig(3): ARBORESCENCE DANS L'ISOLANT D'UN CABLE

La présence d'humidité dans certains polymères favorise l'apparition et la croissance des arborescences.

Les contraintes mécaniques, faisant apparaître des fissures de dimensions microscopiques dans certains isolants, diminuent également leur rigidité de façon importante [2] .

## I.2/POLYMERES UTILISES DANS LES CABLES DE HAUTE TENSION

Dans cette partie, nous allons exposer succinctement les caractéristiques de certains câbles isolés aux polymères tels que: le PE, le PVC, l'EPDM et le PRC .

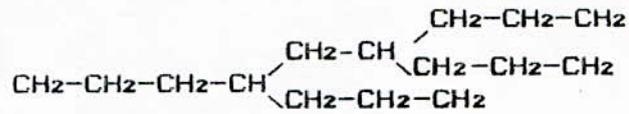
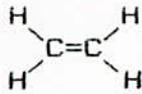
### I.2.1/LE POLYETHYLENE (PE)

Le polyéthylène est formé par la polymérisation de l'éthylène  $C_2H_4$  (fig 4 ). La molécule de polyéthylène se présente sous la forme d'une chaîne d'atomes de carbone, dont les valences libres sont occupées par des atomes d'hydrogène. De même la molécule de polyéthylène peut présenter des ramifications (fig 5 ). Les ramifications provoquent une diminution de la densité du matériau et de sa cristallinité.

Le polyéthylène s'obtient sous forme de granulés ou de poudre, il est mis en forme par extrusion, injection, soufflage...etc. Il se travaille entre  $180^{\circ}C$  et  $250^{\circ}C$  .

Du point de vue électrique le polyéthylène possède une bonne résistance au cheminement des décharges superficielles. La rigidité diélectrique en champ alternatif peut-être augmentée par adjonction d'additifs aromatiques qui améliorent également la résistance aux décharges partielles.

Le PE est très utilisé comme isolant dans les câbles à haute fréquence, et les câbles à haute tension jusqu'à 220 kV [2] ET [5].



Fig(4):MOLECULE D'ETHYLENE Fig(5):MOLECULE DE POLYETHYLENE RAMIFIEE

\* PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES ET ELECTRIQUES DU PE

- Très bonne stabilité chimique.
- Pratiquement insoluble pour des températures inférieures à 60 °C.
- Brûle même en l'absence de la flamme initiatrice et goutte.
- Excellent isolant électrique pour des conditions d'ambiances variées.
- Faible facteur de pertes diélectriques.
- Faible résistivité et rigidité diélectrique élevée.
- Bonnes propriétés de frottement.
- Assez perméable aux hydrocarbures (essences...etc ).

I.2.2/ LE POLYCHLORURE DE VINYLE (PVC)

La molécule de PVC ou polychlorure de vinyle est obtenue par polymérisation du monomère chlorure de vinyle. Le PVC pur est instable à la chaleur et à la lumière. Le stéarate de plomb est un stabilisant fréquemment utilisé pour améliorer la résistance à ces agents.

Disponible sous forme de poudre ou de granulés, le PVC se travaille par extrusion , injection ou calandrage à des températures qui dépendent des additifs et du mode de mise en forme.

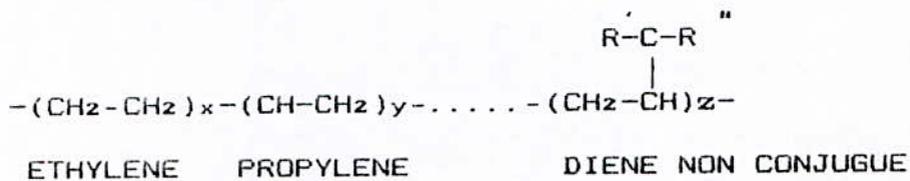
Il est généralement utilisé pour le gainage et isolant de câbles d'énergie jusqu'à une tension de 10kV environ [2],[3] et [4].

\* PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES ET ELECTRIQUES DU PVC

- Grande inertie chimique.
- Excellente rigidité jusqu'à sa température de transition vitreuse.
- Excellente résistance à l'abrasion.
- Insensible à la plupart des corps agressifs minéraux.
- bonnes propriétés isolantes, mais pertes diélectriques assez importantes .
- Le PVC se décompose en dégageant de l'acide chlorhydrique. Placé dans une flamme, il brûle mais ne propage pas lui-même la flamme.

I.2.3/ L'ETHYLENE PROPYLENE-DIENE MONOMERE (EPDM)

L'EPDM ou l'éthylène propylène-diène monomère est constitué d'un terpolymère d'éthylène propylène-diène non conjugué dont la structure est: Fig(6)



Fig(6) : STRUCTURE DE L'EPDM

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 acides, les alcools...etc [1].

\* PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'EPDM

Parmi les principales caractéristiques de l'EPDM on a :

- Bonne tenue au vieillissement à la chaleur

- Bonne résistance à l'action de la vapeur
- Bonne résistance à l'ozone et aux intempéries
- souplesse à basse température
- Bonne résistance aux radiations et aux cheminements
- Bonne propriétés électriques
- facilité de mise en oeuvre

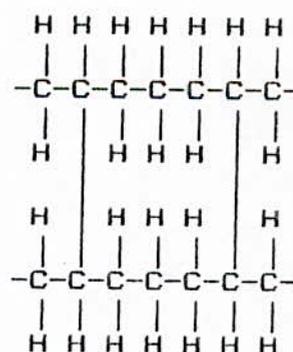
-Dans un incendie l'EPDM brûle facilement et propage la flamme, mais ne produit pas de gouttes enflammées. Il ne dégage pas de gaz corrosifs ou toxiques à l'exception de CO et CO<sub>2</sub> et parfois d'une faible quantité de SO<sub>2</sub> provenant de certains agents de vulcanisation

#### I.2.4/LE POLYETHYLENE RETICULE CHIMIQUEMENT (PRC)

La matière de base du PRC est obtenue à partir du PE basse densité: PEbd par adjonction préalable à la masse du polymère d'un agent de réticulation sous forme d'un peroxyde organique . Les chaines macromoléculaires ainsi obtenues sont par endroits reliées entre elles par des liaisons chimiques transversales. La formule du PRC est représentée à la Fig(7)

Cette réticulation chimique du PE a lieu à une température supérieure à 130°C et sous pression.

La chaleur permet la décomposition du peroxyde qui devient alors actif tandis que la pression empêche les résidues gazeux provoqués par la réaction de former des bulles dans



Fig(7): Le PRC

l'isolant. Le PRC est employé pour l'isolation des câbles en basse, moyenne et haute tension [5] et [7] ..

\* PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES ET ELECTRIQUES DU PRC

- Bonne tenue à la chaleur (température de service de l'ordre de 90°C).
- Bonne tenue au court-circuit (bon comportement jusqu'à 250°C).
- Rigidité diélectrique et tenue aux ondes de choc supérieures à celles des autres isolants élastomères utilisés en moyenne tension.
- Possibilité de résistance à la propagation de la flamme.
- faible dégagement de fumée et de gaz toxiques [5].

\* TABLEAU DES PROPRIETES DIELECTRIQUES

Le tableau 1 ci-dessous regroupe les propriétés les plus importantes des 4 polymères cités ci-dessus [2] et [3] .

PROPRIETES	PE	EPDM	PRC	PVC
Masse volumique (g/Cm <sup>3</sup> )	0,935-0,950	1,1 - 1,2	0,92	1,3 - 1,7
Allongement à la rupture (%)	200 - 500	300 - 500	300 - 400	200 - 500
Température de fusion (°C)	120 - 135	168 - 169	*	140 - 170
Résistivité transversale	>10 <sup>16</sup> (Ω.m)	2.10 <sup>15</sup> (Ω.m)	>10 <sup>16</sup> (Ω.m)	10 <sup>11</sup> (Ω.m)
constante diélectrique	2,3	3	2,3	3 à 5
Fact.de pertes diélectriques	2.10 <sup>-4</sup>	6.10 <sup>-9</sup>	0,3.10 <sup>-9</sup>	0,3 à 0.15
Agents agressifs	Solvants chlorés et aromatiques oxydants...etc .			Sensible aux agents atmosphérique
Avantages	excellentes p.mécaniques  bon frottement	bonne tenue au vieillissement  bonne résistance à l'attaque de l'O <sub>2</sub> et l'ozone	mise en oeuvre aisée  excellentes p.d'isolation électrique	souple  utilisable à basse température
Inconvénients	mise en oeuvre difficile	collage difficile sensible aux rayons U.V	collage difficile mauvaise tenue à la chaleur	tenu chimique relativement faible

ne fond pas : se carbonise, sans fluage, au dessus de 250°C .

TABLEAU I

PRINCIPALES PROPRIETES DIELECTRIQUES DE CERTAINS POLYMERES.

### I.3/ LE POLYETHYLENE RETICULE AU SILANE

Le polyéthylène par ses propriétés électriques est l'un des matériaux isolants les plus utilisés dans l'industrie du câble. Comme le PVC il se ramolie et flue à température élevée. La réticulation permet d'éviter cela par la conversion d'un matériau initialement thermoplastique en un matériau durcissant à chaud sans modification des propriétés électriques (la réticulation peut être imaginée comme une soudure des macromolécules entre-elles par des liaisons de covalence). En effet cette réaction chimique (réticulation) fait appelle à des peroxydes organiques pour créer, sur l'ossature du polymère des emplacements actifs, permettant de former des liens entre les chaînes moléculaires [8] .

#### I.3.1/ DIFFERENTS PROCEDES DE RETICULATIONS

##### a) RETICULATION AUX PEROXYDES

Cette technique est plus complexe que celle de l'isolation thermoplastique car la réaction de réticulation avec le peroxyde requiert une énergie thermique qui est apportée par une haute pression de vapeur (20 à 25 atm).

##### b) RETICULATION AUX RADIATIONS

Cette technique, qui réticule le PE à l'aide d'un bombardement par les électrons accélérés est plus adoptée aux fines épaisseurs (fils téléphoniques). De plus, les coûts d'investissement pour l'équipement et les mesures de protection sont élevés.

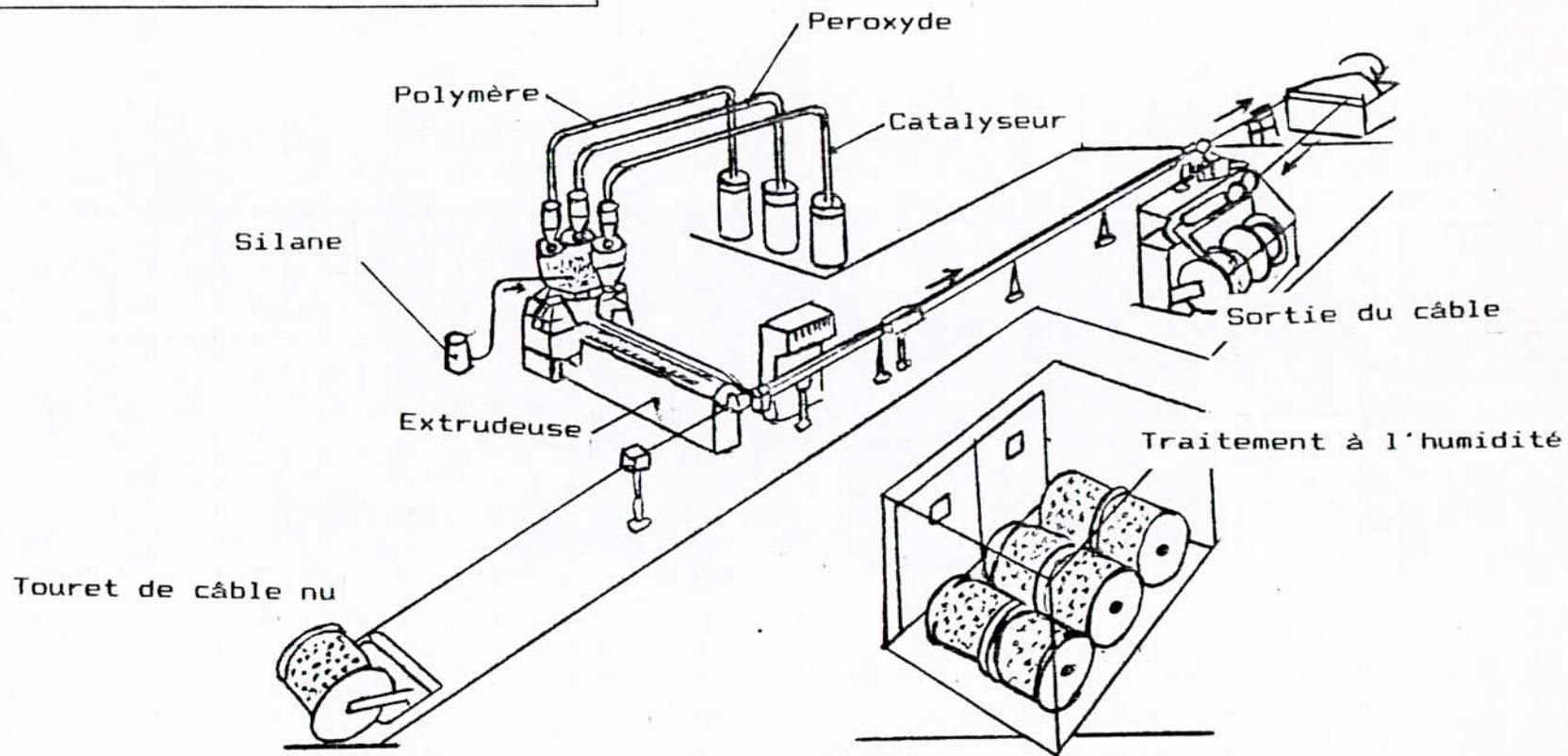
##### c) RETICULATION AU SILANE

Cette technique de réticulation a été développée par DOW CORNING en 1967 . Elle est connue commercialement sous le nom de "SIOPLAS" [7]. Dans ce cas la réticulation s'effectue par les moyens d'une réaction irréversible activée par la vapeur d'eau (Voir procédé de fab. Fig 8)

Fig(8):

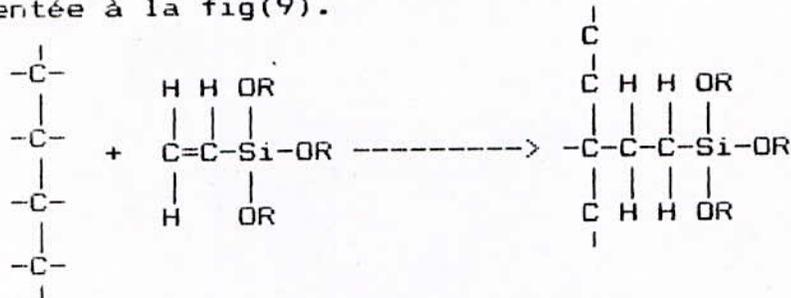
EXEMPLE DE PRODUCTION D'UN CABLE  
ISOLE AU SILANE

14



### 1.3.2/ CHIMIE DU PROCÉDE SIOPLAS

les organosilanes (R-Si-R) polyfonctionnels contenant des groupes vinyles (-C=C-) et des alcoxy (-OR) facilement hydrolysables sont chimiquement greffés sur la chaîne de polyéthylène suivant la réaction présentée à la fig(9).



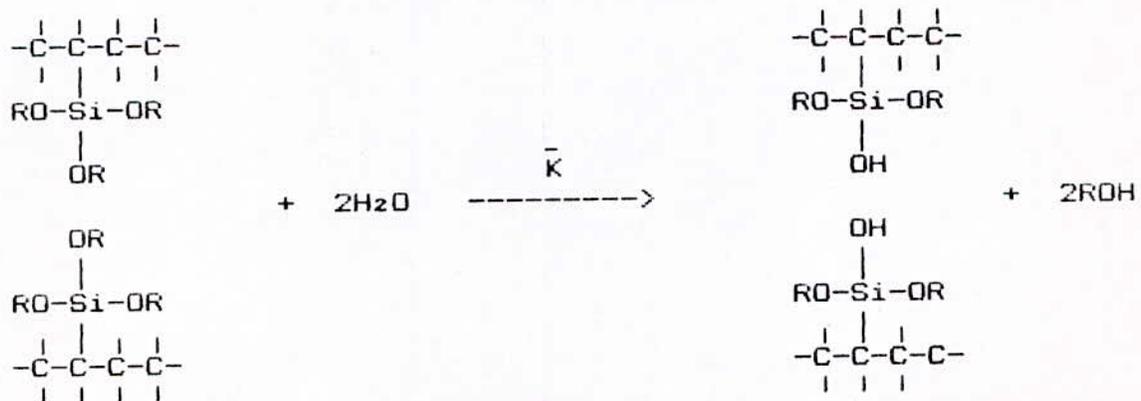
Fig(9) : REACTION DE GREFFAGE

Après greffage, le polyéthylène est encore thermoplastique et peut être travaillé de la même façon que le matériau ordinaire.

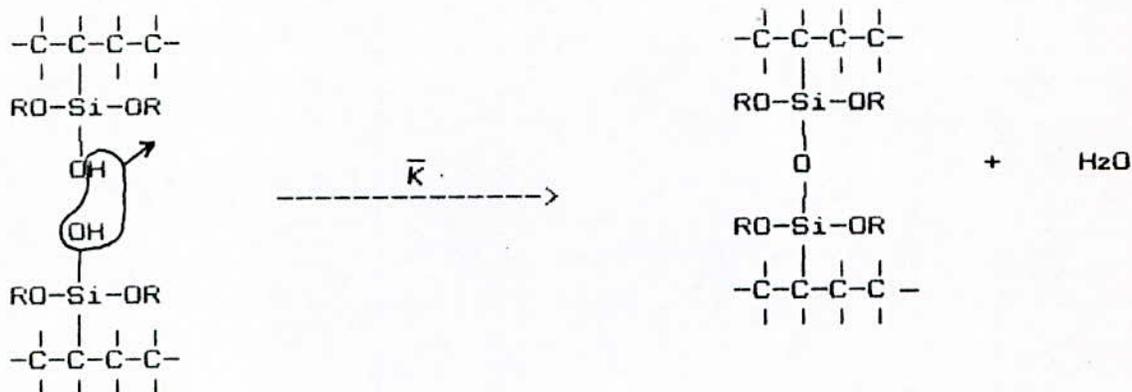
la réticulation de ce matériau greffé est par la suite engagée par une exposition à l'eau qui cause l'hydrolyse (voir fig(10)) et la condensation des groupes alcoxy en formant des ponts siloxanes (Si-O-Si) (voir fig(11)) [8].

Cette réaction est normalement accélérée par l'incorporation d'un catalyseur à base d'étain, par exemple le:

- Butyldilaurate d'étain:  $(C_4H_9O)_2-Sn-[CH_3(CH_2)_2Coo]_2$



Fig(10) : REACTION D'HYDROLYSE(silanolisation)



Fig(11) : REACTION DE CONDENSATION

### I.3.3/ PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DU PRS

La réticulation du polyéthylène provoque une modification structurale profonde des chaînes moléculaires dont les principales conséquences sont les suivantes:

- La matière présente une résistance au fluage à chaud très satisfaisante (250 °C).
- La réticulation fait disparaître complètement la fâcheuse tendance de la résine mère à la fissuration.
- La réticulation ne modifie pas sensiblement la bonne tenue au froid du polyéthylène et renforce son inertie chimique.
- Excellente résistance à l'ozone.
- Bonne résistance à l'abrasion.
- La réticulation permet en plus d'incorporer des charges minérales et organiques très utiles pour améliorer la tenue mécanique aux intempéries et surtout le comportement au feu [6]..

#### I.3.4/ COMPORTEMENT A LA CHALEUR

Quand on chauffe le PRS, il commence d'abord par se ramollir comme un thermoplastique. Lorsque la température de fin de fusion cristalline est atteinte il ne perd pas sa résistance mécanique et ne fond pas comme un thermoplastique, car les chaînes macromoléculaires sont tenues entre elles par des liaisons chimiques transversales. Le PRS ressemble alors à un élastomère vulcanisé, il n'est donc plus thermoplastique.

---

## CONCEPTION DU CABLE ISOLE AU PRS

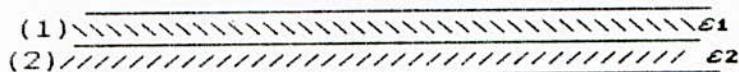
---

### II.1/ANALYSE THEORIQUE DES CONTRAINTES DIELECTRIQUES DANS LE CABLE

#### II.1.1/GENERALITES SUR LE CHAMP ELECTRIQUE

Dans toutes les actions faisant apparaître une charge électrique quelconque d'un certain signe, une charge électrique égale mais de signe contraire est créée simultanément. Ces deux charges sont toujours réunies par des lignes de force (lignes de champ). On peut considérer la terre comme un condensateur 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. Il y'a lieu de rappeler ici que tout corps, conducteur ou isolant, introduit dans un champ électrique uniforme, devient un doublet porteur de charges égales et de signes contraires et demeure immobile dans ce champ, il est sollicité par des forces égales et opposées. Par contre, si le champ n'est pas uniforme, ces forces sont inégales et leur résultante provoque le déplacement de la particule dans le champ [9] .

Dans un système à isolation stratifiée, le champ est plus intense dans les zones de faible permittivité. En effet, soit deux matériaux 1 et 2 de permittivité différentes  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$ .



Soit  $\epsilon_1 > \epsilon_2$

En considérant les conditions de passage entre les deux milieux

On a:  $\epsilon_1 \cdot E_1 = \epsilon_2 \cdot E_2 \implies E_2 = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} E_1$

Comme  $\epsilon_1 > \epsilon_2 > 1$  Alors  $E_2 > E_1$  Donc le champ est plus intense dans le matériau de faible permittivité.

EXEMPLE: si  $\epsilon_1 = 2,3$  (polyéthylène)  
 $\epsilon_2 = 1$  (pour l'air)  
alors  $E_2 = 2,3 E_1$  Donc:

Le champ est 2.3 fois plus grand dans l'air que dans le matériau constitué par le polyéthylène.

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  $\epsilon_r$  pour caractériser un matériau quelconque  $\epsilon_r$  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 [12]:

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

- où S: Surface du condensateur
- e: Epaisseur du diélectrique
- $\epsilon$ : permittivité absolue du diélectrique
- $\epsilon_0$ : Permittivité absolue du vide ( $\epsilon_0 = 1/36\pi \cdot 10^{-9}$  F/m)

La permittivité relative  $\epsilon_r$  de la plupart des matériaux isolants se situe entre 2 et 10 [8] .

## II.1.2/- MECANISMES DE RUPTURE DIELECTRIQUE DES ISOLANTS SOLIDES

### GENERALITES

Au contraire des corps conducteurs, caractérisés à l'échelle microscopique par une très grande mobilité des électrons occupant les couches périphériques des atomes, les diélectriques sont constitués d'atomes pour lesquels les forces de liaisons dues à la structure du milieu rendent difficile le déplacement des porteurs de charges [10] et [11] .

Les deux principaux mécanismes de rupture diélectrique des isolants solides sont :

- a)- Le mécanisme de rupture intrinsèque (rupture électrique).
- b)- Le mécanisme thermique

Les autres mécanismes sont:

- c)- La rupture par streamers.
- d)- La rupture électromécanique.
- e)- La rupture par arboréscence (avec effet de bord).
- f)- La rupture par érosion (décharges partielles).
- g)- Le vieillissement thermique plus vieillissement électrochimique.
- h)- Le vieillissement par décharges superficielles et par décharges partielles .

### A/-MECANISME INTRINSEQUE (ELECTRIQUE)

La rupture intrinsèque est de nature électronique et a lieu à des temps de l'ordre de  $10^{-8}$  secondes.

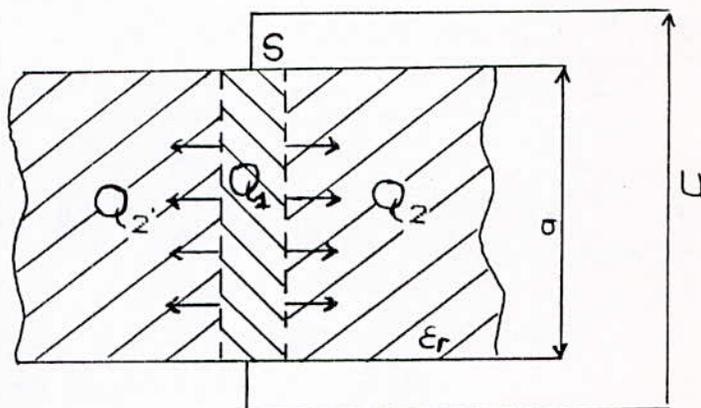
La rupture intrinsèque est atteinte quand les électrons acquièrent suffisamment d'énergie dans le champ appliqué, afin de traverser la bande interdite de l'isolant (passage de la bande de valence à la bande de conduction).

L'énergie nécessaire à ce transfert d'électrons varie d'un matériau à l'autre selon le degré d'homogénéité de celui-ci et le degré de sa pureté .

## B/-MECANISME THERMIQUE

### 1/-RUPTURE LOCALE (K.W WAGNER)

D'après WAGNER, la rupture thermique a lieu après la création d'un canal le long duquel la conductivité du diélectrique devient beaucoup plus intense que dans le reste du volume du diélectrique.



Soit  $Q_1$  la quantité de chaleur dans le canal :

$$Q_1 = 0.24.I^2.R = 0.24.U^2.\gamma.S/a$$

où  $\gamma = \gamma_{t_0}.\exp(\alpha(\theta-\theta_0))$  Si la tension est continue

$\gamma = 1.8.10^{-12}.\epsilon_r.f.tg\delta_0.\exp(\alpha(\theta-\theta_0))$  si la tension est

alternative.

Avec S:section du canal.

a: épaisseur du diélectrique.

$\gamma$ : conductivité moyenne du canal à la température  $\theta$ .

$\gamma_{t_0}$ : conductivité en dehors du canal à  $t_0=\theta_0$ .

$\alpha$ : coefficient de température.

$\theta$ : température du diélectrique dans le canal.

$\theta_0$ : température du diélectrique en dehors du canal.

Si  $Q_2$  est la quantité de chaleur dissipée :

$Q_2 = \lambda_{iso}.\alpha(\theta-\theta_0).a$  où  $\lambda_{iso}$  : Facteur de conduction thermique.

La rupture est atteinte lorsque :  $\frac{dQ_1}{d\theta} = \frac{dQ_2}{d\theta}$

En posant  $\gamma_0 = \gamma_1 \exp(\alpha \cdot \theta)$  où  $\gamma_1$ : conductivité à  $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$

la tension de rupture est donnée par :

$$U_d = a \cdot \sqrt{\frac{\lambda_{iso}}{0,24 \cdot S \cdot \alpha \cdot \gamma_1}} \cdot \exp\left(-\frac{\alpha \cdot \theta_0}{2}\right)$$

## 2/ RUPTURE GLOBALE

Dans ce cas la chaleur étant répartie uniformément dans le diélectrique. La tension critique de rupture thermique est donnée par:

$$U_c = 1.875 \sqrt{\frac{\lambda}{p_0 \cdot \alpha \cdot \exp.(\theta - \theta_0)}}$$

$$\text{avec } p_0 = \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \text{tg}\delta_0$$

### II.1.3/ SCHEMA EQUIVALENT D'UN DIELECTRIQUE

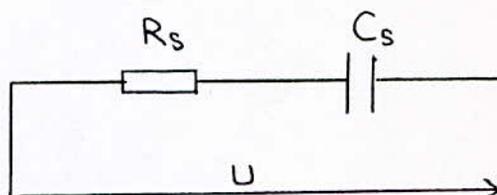
Suivant les cas, un diélectrique avec pertes peut toujours être représenté ou modélisé par une association série ou parallèle d'une résistance et d'une capacité [12].

#### a) schéma équivalent série

L'impédance équivalente du système

$$\text{vaut: } \bar{Z}_s = R_s + \frac{1}{j \cdot C_s \cdot \omega} \quad (\text{II.1})$$

Or, on sait que le facteur de pertes diélectriques est donnée par la tangente de l'angle de perte  $\delta$ , qui est égale au rapport, entre la partie réelle et la partie imaginaire de l'impédance équivalente du diélectrique Donc :  $\text{tg}\delta = \omega \cdot R_s \cdot C_s$  (II.2)



En introduisant (II.2) dans (II.1). On exprime l'impédance équivalente en fonction du facteur de pertes diélectriques.

$$\bar{Z}_s = (j\text{tg}\delta + 1)/j\omega C_s = \frac{1 + \text{tg}^2\delta}{j\omega C_s(1 - j\text{tg}\delta)}$$

b) schéma équivalent parallèle

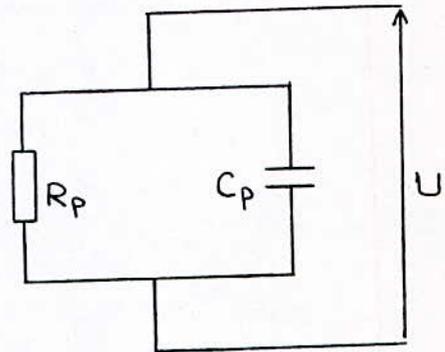
On a :

$$\bar{Z}_p = \frac{1}{\frac{1}{R_p} + j\omega C_p}$$

En tenant compte de la définition du facteur de pertes diélectriques

il vient que :

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



IDENTIFICATION:

En identifiant les impédances série et parallèle on trouve:

$$R_p = \frac{1 + \text{tg}^2\delta}{\omega \cdot C_s \cdot \text{tg}\delta} = \frac{R_s(1 + \text{tg}^2\delta)}{\text{tg}^2\delta} \quad (\text{II.3}) \quad \text{et} \quad C_p = \frac{C_s}{1 + \text{tg}^2\delta} \quad (\text{II.4})$$

En prenant la relation (II.2) et en identifiant (II.3) et (II.4) on a :

$$\text{tg}\delta = \omega \cdot R_s \cdot C_s = \omega \cdot \frac{R_p \cdot \text{tg}^2\delta}{1 + \text{tg}^2\delta} \cdot C_p(1 + \text{tg}^2\delta)$$

D'où :

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

### c) - PERTES DIELECTRIQUES

Sous un champ alternatif, tout isolant est traversé par des courants de conduction et d'absorption qui donnent lieu à des pertes diélectrique. Ces pertes engendrent un dégagement de chaleur, et si leur niveau est trop élevé, elles peuvent conduire soit au claquage thermique, soit à une dégradation d'ordre chimique plus ou moins rapide. Ces pertes sont en général, moins importantes que les pertes joules dans le cuivre, mais elles présentent un grand intérêt pour la vérification de la qualité de l'isolant du câble [12].

Le facteur de pertes diélectriques, nous permet de calculer les pertes d'énergie dans les diélectriques soumis à de moyennes et hautes tensions.

Dans le cas du schéma équivalent parallèle on a :

$$P = U^2/R_p = \omega \cdot C_p \cdot U^2 \cdot \text{tg} \delta$$

Dans le cas du schéma équivalent serie on obtient :

$$P = U^2/R_p = \frac{U^2}{\frac{1 + \text{tg}^2 \delta}{\omega \cdot C_s \cdot \text{tg} \delta}} = \omega \cdot C_s \cdot U^2 \frac{\text{tg} \delta}{1 + \text{tg}^2 \delta} \approx \omega \cdot C_s \cdot U^2 \cdot \text{tg} \delta$$

### II.1.4/- CHOIX DE LA TENSION

La tension spécifiée d'un câble est un ensemble de deux valeurs de tensions  $U_0$  et  $U$  exprimées en kV sous la forme  $U_0/U$  [5] où :

-  $U_0$  est la tension entre l'âme d'un conducteur et un potentiel de référence (l'écran métallique s'il existe) ou en l'absence d'écran la "terre".

-  $U$  est la tension entre les âmes de deux conducteurs de phase.

Le choix de la tension spécifiée  $U_0/U$  dépend de différents paramètres dont :

a)- La tension nominale du réseau.

b)- Le type de câble retenu.

c)- Les surtensions.

a)- Tension nominale du réseau

La tension  $U$  du câble doit être au moins égale à la tension nominale du réseau sur lequel il sera installé [5].

b)- Type de câble retenu

Câble à champ radial ou non ( $U_0/U = \sqrt{3}$  ou  $U_0/U = 1$ ) [5].

c)- Surtensions

Le choix de la tension spécifiée doit aussi tenir compte des surtensions susceptibles d'affecter l'installation et dont l'origine peut être due à:

-Un phénomène atmosphérique.

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

-Des manoeuvres d'appareillages [5].

## II.2/- DIMENSIONNEMENT DU CÂBLE ISOLE AU PRS

L'une des opérations les plus importantes du processus de fabrication d'un câble, est de loin, le choix des différents matériaux qui le constituent. En effet c'est du choix de ces matériaux que dépendra les qualités mécaniques, électriques et surtout diélectriques du câble.

## II.2.1/- AME CONDUCTRICE

Le cuivre utilisé en électrotechnique est de haute pureté, généralement pas en dessous de 99,9%, de ce fait cette catégorie de matériau présente la conductivité maximale, et ceci après l'argent. 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 [1].

Le cuivre électrotechnique recuit qui constitue l'âme du conducteur doit satisfaire aux spécifications internationales données par la norme NFC 30-010 [14] .

### \*LES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DU CUIVRE UTILISE

#### POUR LA REALISATION DE NOTRE CABLE SONT:

-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 (%).....	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).....	17.10 <sup>-6</sup>

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

L'âme conductrice de notre câble, est constitué 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 total de l'âme ainsi réalisée est :  $D = 5d$

avec  $d$  : diamètre d'un brin ( dans notre cas  $d = 2.14$  mm ).

$D$  : diamètre de l'âme ( , , , , ,  $D = 10.7$  mm ).

et la surface  $S = 70$  mm<sup>2</sup>.

## II.2.2/- COUCHE SEMI-CONDUCTRICE

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 du champ on utilise un écran semi-conducteur destiné à créer une surface équipotentielle autour de l'âme et ceci en rendant conductrices les surfaces internes et externes du diélectrique. Ce matériau semi-conducteur, appartenant en général à la même famille que l'isolant et de résistivité intermédiaire, adhère à la surface isolante, et se déforme avec elle, au cours des enroulages et déroulages des câbles.

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 [1] et [15].

Les autres avantages du semi-conducteur extrudé sur l'âme sont :

- a)-Formation d'une barrière pour les impuretés de l'âme en cuivre qui ne peuvent ainsi souiller l'isolant.
- b)-Homogénéisation de la forme du conducteur donc du champ électrique.
- c)-Barrière thermique entre le conducteur et l'isolant, car lors d'un échauffement provoqué par un court-circuit, le semi-conducteur absorbe en premier la chaleur dégagée par le conducteur [6].

### \* CHOIX DU SEMI-CONDUCTEUR

Le choix d'un semi-conducteur (sa résistance et son épaisseur) ainsi que son mode de pose (rubané ou extrudé) est d'une grande importance.

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

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

Ces conditions seront mieux remplies avec l'utilisation d'un semi-conducteur extrudé simultanément avec l'isolant, comme cela est recommandé par toutes les normes.

Pour le câble réalisé dans le cadre de notre étude, l'ENICAB a utilisé comme semi-conducteur un ruban en toile textile, en suivant les recommandations de la norme CEI 502 [13], le câble serait mieux résistant aux décharges électrique, si le semi-conducteur utilisé était extrudé simultanément avec l'isolant et de même famille que celui-ci ( PRS plus 30 à 35% de noir de carbone ) [15].

### II.2.3/- ISOLANT

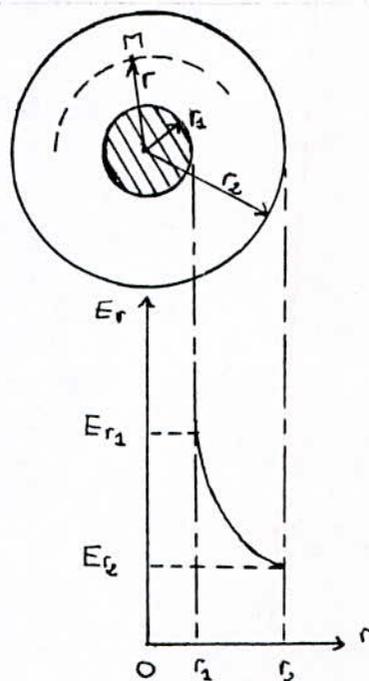
L'isolation est la partie la plus déterminante et la plus délicate dans la construction d'un câble. Du choix de l'isolant et des soins apportés dans cette opération, dépendront les caractéristiques diélectrique du câble.

En effet aucun diélectrique ne résiste à une tension illimitée . Pour certaines valeurs de la différence de potentiel, il se produit, de façon brusque et irréversible, un véritable changement d'état, c'est le claquage de l'isolant . Donc, le choix de la nature de l'isolant et son épaisseur sont d'une importance capitale pour la bonne tenue du câble.

\* DETERMINATION DE L'ÉPAISSEUR DE L'ISOLANT

La tension appliquée au câble, ou différence de potentiel entre l'âme conductrice et l'écran métallique, est limitée par la valeur maximale admissible du champ électrique, au point où cette valeur est la plus élevée [9].

Considérant un câble constitué d'une âme conductrice circulaire de rayon  $r_1$ , d'un isolant donné, d'épaisseur égale à  $r_2 - r_1$ .  $r_2$  étant le rayon extérieur du conducteur (écran). Comme représenté à la figure (12).



Si on applique une tension  $V$  entre l'âme et l'écran métallique, le gradient de potentiel est représenté par une fonction hyperbolique dont la valeur maximale a lieu pour  $r=r_1$

Fig(12): VARIATION DU GRADIENT DE POTENTIEL DANS L'ISOLANT

$$E_{\max} = \frac{V}{r_1 \cdot \ln(r_2/r_1)}$$

Donc la partie collée au conducteur doit résister à cette valeur maximale pour assurer la bonne tenue en service du câble.

L'épaisseur de l'enveloppe isolante est donnée, par la norme CEI 502 [15], en fonction de la section nominale de l'âme et la tension assignée du câble.

Dans notre cas : la section nominale du câble étant de  $70\text{mm}^2$  et la tension assignée 18/30 kV, on recommande théoriquement pour notre câble les dimensions suivantes :

$$r_1 = 5,35 \text{ mm.}$$

$$\text{et } r_2 = 8,2 + 5,35 = 13,35 \text{ mm.}$$

Donc le champ maximum à l'interface conducteur-isolant est de :

$$E_{\max} = 3.68 \text{ kV/mm}$$

Le champ maximum étant égal à 3.68 kV/mm, cette valeur est nettement inférieure à la valeur du champ à partir duquel le phénomène d'arborescence prend naissance et qui est égale à 4 kV/mm environ.

La section du câble choisie est donc suffisante pour assurer une bonne tenue du câble.

\* INFLUENCE DU CHOIX DU RAYON DE L'AME SUR L'ÉPAISSEUR DE L'ISOLANT

On sait que :

$$E_{\max} = \frac{U}{r_1 \cdot \ln(r_2/r_1)}$$

Pour  $U = \text{constante}$  et un rayon

$r$  donné, la valeur optimale

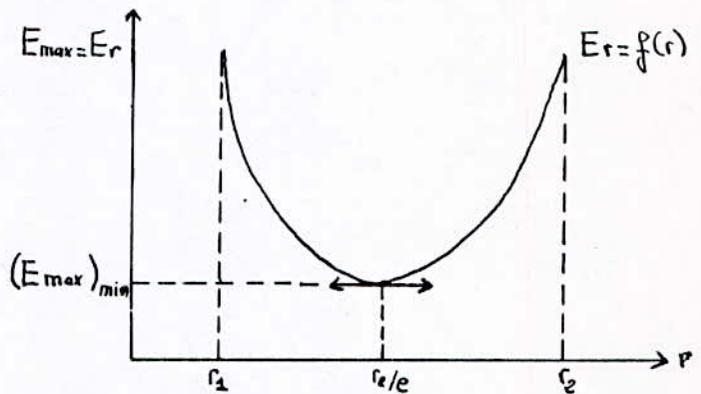
de  $r$  pour que  $E_{\max}$  soit minimale

est :  $r_1 = r_2/e$

et ainsi :

$$(E_{\max})_{\min} = U/r_1$$

$$\cong 2,72 \cdot U/r_2$$



Fig(13): VARIATION DU GRADIENT DE ~~DE~~ POTENTIEL

EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DE L'ISOLANT

De la figure (13) ci-dessus on remarque que :

Pour  $r < r_2/e \implies E_r$  diminue quand  $r$  augmente .

Pour  $r > r_2/e \implies E_r$  augmente quand  $r$  augmente.

En prenant  $r_2 = r_1 \cdot e$  l'épaisseur de l'isolant correspondant serait :

$$a = r_2 - r_1 = 1,72 \cdot r_1 \quad \text{donc } a = 1,72 \cdot r_1$$

On a ainsi le câble le plus économique [9].

## REMARQUE

Dans notre cas on a :  $a = r_2 - r_1 = 8,4 \text{ mm}$  avec  $r_1 = 5,35 \text{ mm}$

donc  $a/r_1 \approx 1,57 \implies a = 1,57r_1$ .

Les dimensions de notre câble sont proches de celle du câble le plus économique.

## II.2.4/- ECRAN METALLIQUE

Les normes imposent l'utilisation d'un écran semi-conducteur sur l'enveloppe isolante des câbles isolés au polyéthylène réticulé dont la tension assignée est supérieure à 1,8/3,8 kV.

Cet écran sur l'enveloppe isolante doit répondre aux caractéristiques suivantes [15] :

- a)- Il doit être constitué par une partie semi-conductrice non métallique associée à une partie métallique
- b)- La partie non métallique doit être appliquée directement sur l'enveloppe isolante de chaque conducteur et être constituée soit par un ruban semi-conducteur, soit par une couche d'un mélange semi-conducteur extrudé, ou par la combinaison de ces éléments. Cet écran est indispensable afin de supprimer une ionisation possible à la 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, le courant de défaut, peut prendre une valeur très élevée dépendant :

- De la puissance de la source.
- Des caractéristiques de l'installation (courant de démarrage,...)

- Du point de défaut.
- Du réglage des dispositifs de protections.

Il faut donc s'assurer que, sous l'effet de cette intensité, les températures maximales admissibles par les différents constituants du câble, ne soient pas dépassées et, en particulier, la température admissible de l'isolant. En cas de défaut et vue l'importance de la surface de contact de l'écran métallique avec les milieux adjacents, la chaleur ne reste pas concentré uniquement 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 surdimensionnement inutile des écrans.

Pour notre câble, nous déterminons l'intensité du courant admissible en régime de court-circuit en fonction des dimensions de l'écran utilisé et ceci par la méthode de calcul proposée par la norme EDF HN 33-S-22 [19].

Les dimensions de l'écran utilisé sont les suivantes :

- Epaisseur de l'écran :  $e = 0.1$  mm.
- Largeur de l'écran :  $L = 30$  mm.
- facteur de recouvrement :  $\lambda = 25\%$ .
- Rayon de courbure :  $r = 11.1$  mm

Pour la détermination du courant admissible on considère l'hypothèse 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  $120^{\circ}\text{C}$ ".

Avec les données ci-dessus et l'hypothèse émise on trouve que la densité de courant vaut  $J = 218 \text{ A/m}^2$  or  $I = J.S.K_0 = 1526 \text{ A}$

Donc, l'intensité de courant admissible en surcharge de très courte durée est de 1526 A  $\approx$  1.5 kA.

#### II.2.5/- GAINÉ DE PROTECTION

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

La qualité du matériau constituant la gaine doit convenir à l'utilisation du câble et supporter sa température de service. Cette gaine doit présenter les caractéristiques suivantes:

- Bonne résistance au vieillissement.
- Bonne tenue mécanique.
- Bonne résistance aux intempéries.

Les gaines de protection peuvent être en PVC, PE ou en polychloroprène

Notre échantillon de câble est muni d'une gaine de protection en polychlorure de vinyle (PVC). Le choix de l'épaisseur de la gaine se fait suivant la norme CEI 540 [16] en fonction du diamètre du câble.

Pour notre cas le diamètre avant gainage étant de  $D = 27.7$  mm, l'épaisseur de la gaine est de 2.4 mm.

## II.3/- PROCEDE DE FABRICATION DU CABLE

### \* GENERALITES

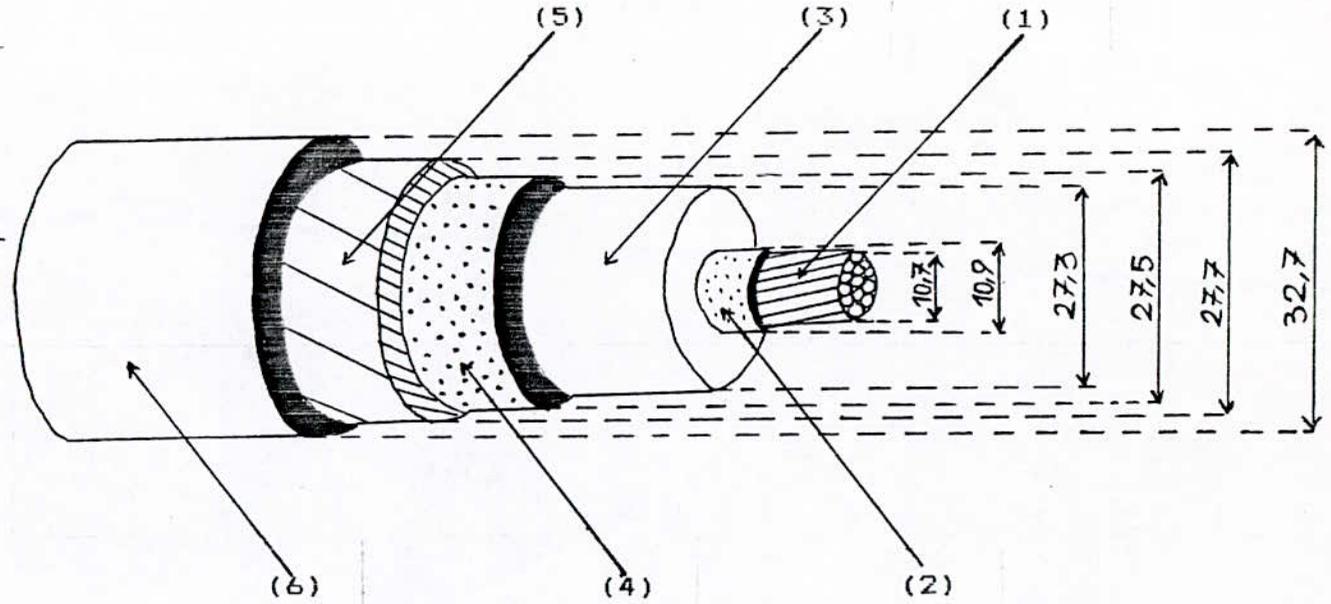
La réalisation d'un câble se fait généralement en deux étapes :

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

Pour notre cas la structure globale de notre câble (fig 14) est :

- Une âme conductrice en fils de cuivre, constituée par 19 brins en forme de secteurs.
- Un écran semi-conducteur (en toile textile) dont le rôle comme on l'a déjà vu est non seulement de supprimer l'effet de brins, mais également d'empêcher toute ionisation à la surface de l'isolant, cet écran sert également d'isolant thermique en cas de court-circuit.
- Une enveloppe isolante en PRS, réalisée en une seule couche.
- Un écran semi-conducteur sur l'isolant.
- Un écran de cuivre adhérant intimement à l'écran semi-conducteur qui évite l'apparition de décharges partielles dans l'isolant et sert en plus d'écran en cas de court-circuit homopolaire.
- Une gaine en PVC noire, de résistance élevée au vieillissement et aux intempéries assurant ainsi la protection du câble.

- (1):Ame conductrice  
 (2):Ecran semi-conducteur  
 sur âme  
 (3):Isolant  
 (4) Ecran semi-conducteur  
 sur isolant  
 (5):Ecran de cuivre  
 (6):Gaine protectrice  
 en PVC



Fig(14):

DIFFERENTS CONSTITUANTS DU CABLE

## II.3.1/- REALISATION DE L'AME

### a)- LE TREFILAGE

Dans le passé l'ENICAB importait le cuivre sous forme de lingots, ce qui l'obligeait à passer par plusieurs procédés (laminage, décapage...etc) Afin d'obtenir du fils machine de diamètre  $\phi = 8\text{mm}$ , mais depuis quelques années l'entreprise s'est tournée vers

l'importation direct du fil machine et ceci sous forme de tourets de cuivre de diamètre  $\phi = 8\text{mm}$ .Celui-ci passe ensuite par plusieurs trefileuses afin d'obtenir du fil prêt pour le cablage voir fig (15)

Le trefilage consiste à réduire le fil machine ( $\phi = 8\text{mm}$ ) en fil de plus en plus fin, destiné au cablage.C'est un procédé qui utilise la plasticité des métaux pour les transformer en fil , grâce à un effort de traction continu.En appliquant plusieurs tractions répétées à travers une serie de filières,de différents diamètres(dont l'orifice impose la forme et les dimensions au fil) , on obtient un fil de diamètre très réduit . C'est ainsi donc qu'on transforme le fil machine en fil de cablage [1] et [13].

Après le trefilage, le fil subit un recuit qui consiste à donner au fil trefilé une certaine souplesse lui permettant de subir d'autres opérations

### b)-LE CABLAGE

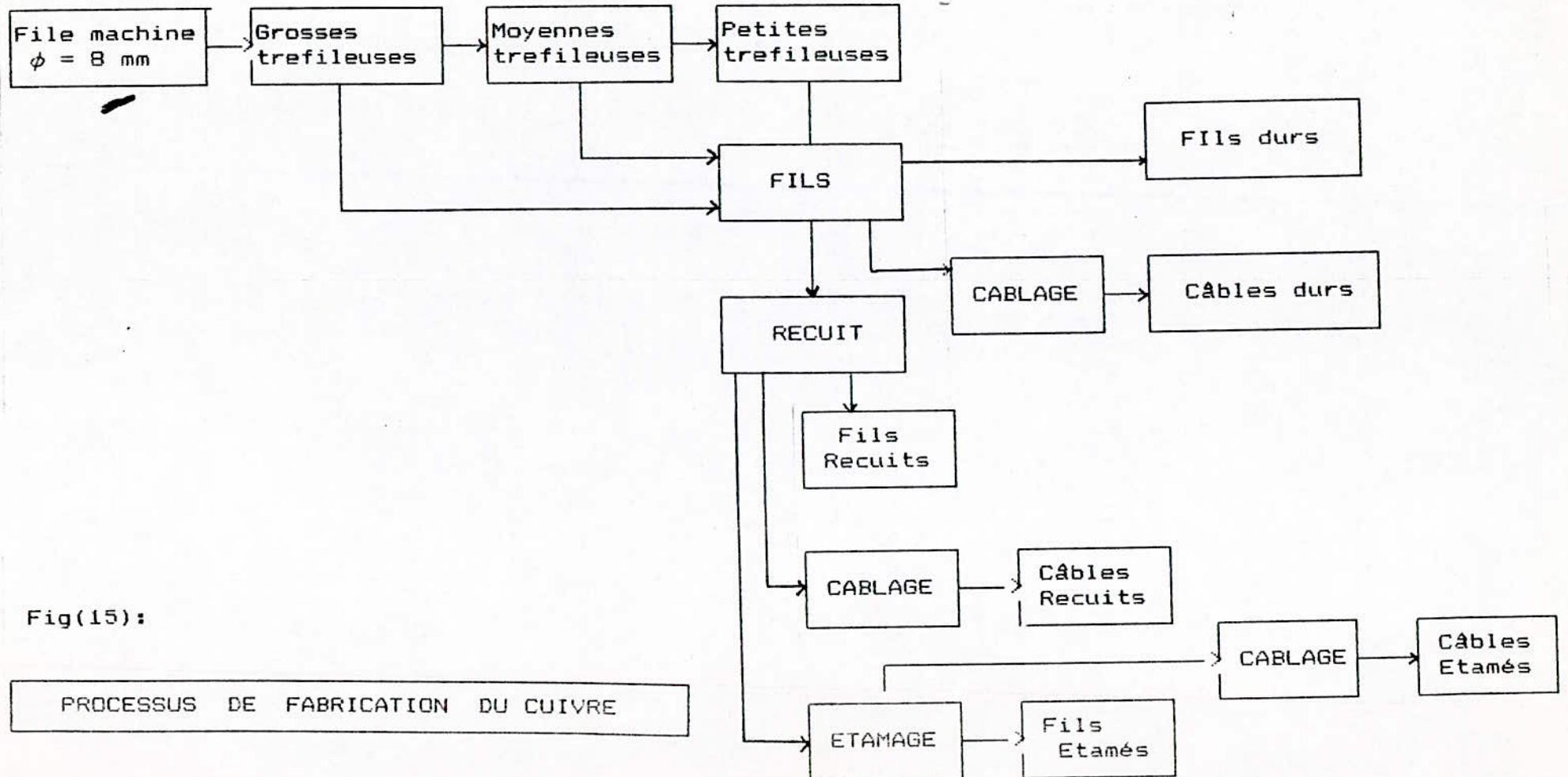
L'opération cablage consiste à assembler des fils produits par les trefileuses pour obtenir des câbles qui sont receptionnés sur des tourets Le passage dans les cableuses se en fonction de la composition du câble à produire,à savoir le nombre de brins.

Jusqu'à une section de quelques millimètres carrés,on emploie parfois des conducteurs massifs,mais le plus souvent les âmes

conductrices des câbles sont réalisées par plusieurs brins toronnés formant ainsi ce qu'on appelle un conducteur cablé. 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.

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 et ceci en disposant d'un brin central autour duquel viendront s'enrouler les autres couches de brins . 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 afin de réduire la tendance du décablage, ces pas sont d'environ 12 à 18 fois le diamètre du conducteur [1].



Fig(15):

### II.3.2/ RUBANAGE DES ECRANS SEMI-CONDUCTEURS

Cette opération consiste à recouvrir l'âme conductrice d'un ruban semi-conducteur.

Elle est réalisée sur une machine dite rubaneuse, pour notre câble le semi-conducteur utilisé est un ruban de toile textile chargé de noir de carbone.

Le rubanage des semi-conducteurs est réalisé avec le plus grand soin, car un semi-conducteur peu adhérent à l'isolant ou peu souple se décollera au cours de l'exploitation du câble. Les vides qui prendront naissance seront le siège d'ionisation, et par conséquent, de claquages [1] et [13].

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

### II.3.3/ EXTRUSION ET RETICULATION DE L'ISOLANT

L'extrusion est une technique de transformation des matières thermoplastiques qui permet d'obtenir des objets finis par un processus technologique continu [3].

Pour la réalisation de notre câble, on a d'abord mélangé, les divers constituants du PRS qu'on a introduit dans la tremie d'alimentation qui est le premier organe de l'extrudeuse (boudineuse).

L'examen de cette extrudeuse en action conduit à distinguer en suivant le trajet de la matière, quatre zones opérationnelles (fig (16)).

#### 1°) La zone d'alimentation

Représentée par la tremie et qui est alimentée à l'aide de granulés, préalablement séchés à l'étuve [4].

#### 2°) La zone de transport

Formée par le premier tiers de la vis. Les granulés sont happés, mis en mouvement et poussés vers la zone de plastification.

### 3°) La zone de plastification

Constituée par le tiers central de la vis. Là, sous l'influence conjuguée du chauffage extérieur et de la chaleur produite par le frottement interne, les granules se ramollissent et passent à l'état de fluide visqueux.

### 4°) La zone de compression

Constituée par le dernier tiers de la vis, où la poussée qu'exerce en amont l'arrivée des granules froids, le produit plastifié parvient dans la tête et se trouve forcé dans la filière. Deux facteurs principaux gouvernent l'extrusion :

- La température de la matière
- La vitesse de sortie de profilé.

La température dans la zone de compression doit être aussi élevée que possible, pour obtenir une homogénéisation et une plastification rapide, mais elle ne doit pas dépasser celle à laquelle la matière commence à se décomposer. Le PRS a l'avantage de pouvoir être extrudé à des températures allant jusqu'à 170°C - 220°C à l'inverse de PE et du PVC dont les températures d'extrusion sont de l'ordre de 160°C.

Après ces différentes opérations, le mélange sort de la boudineuse par une filière et s'écoule sur le conducteur [4].

Immédiatement après l'extrusion de l'isolant sur le conducteur, le PRS est encore thermoplastique et la réticulation est engagée par l'exposition à l'eau. La quantité stoechiométrique d'eau nécessaire à la réticulation est très faible et est beaucoup moindre que celle qui pénètre durant la réticulation à la vapeur à l'aide des peroxydes [7] et [8].

Les taux de diffusion de l'eau dans le PE déterminent le pourcentage de réticulation, puisque le taux de diffusion dépend de la

température, le temps de réticulation de la même épaisseur d'isolant décroît avec l'élévation de la température .

Ainsi plus l'épaisseur est forte , plus le temps pour une réticulation complète est long .

La séparation de la phase réticulation de l'extrusion signifie que# les lignes de production peuvent fonctionner à un rendement maximal sans restriction de séjour dans les lignes de réticulation comme c'est le cas avec les peroxydes où le le temps de séjour dans les tubes limite la vitesse [8].

#### II.3.4/ RUBANAGE DE L'ECRAN METALLIQUE

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% .

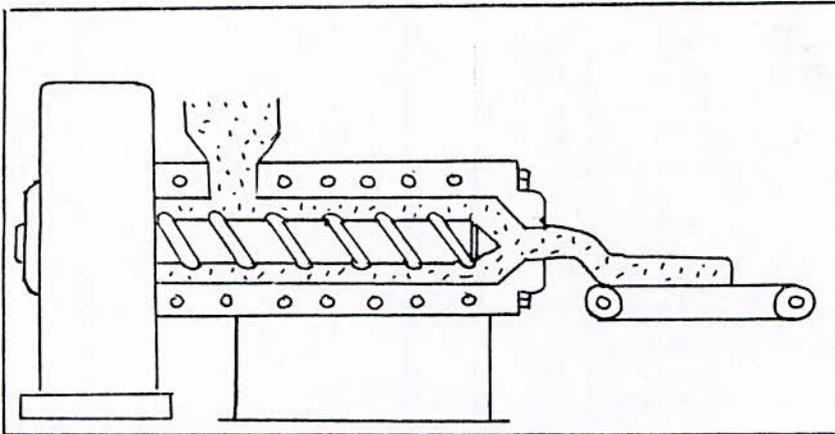
Cet écran permet de créer une surface équipotentielle autour de l'isolant. On obtient ainsi un câble à champ radial .

#### II.3.5/ EXTRUSION DE LA GAINÉ DE PROTECTION

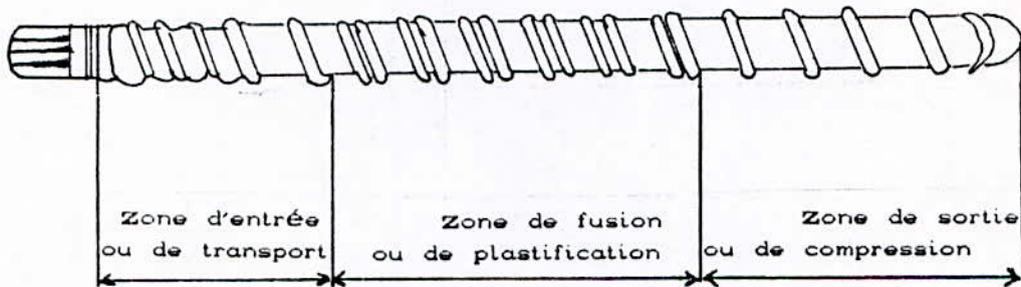
Après le rubanage de l'écran métallique, le câble est transporté dans un autre atelier où se fera l'extrusion de la gainé de protection en PVC.

Le PVC à une élasticité relativement faible. Mais se ramolissant à des températures élevées, il peut être directement extrudé sur le conducteur. L'extrusion de la gainé est réalisée à l'aide d'une boudineuse dans laquelle le PVC est introduit sous la forme de granulés qui seront fondus et malaxés sous une température de 160°C

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



a : SCHEMA GLOBAL D'UNE EXTRUDEUSE



b : EXEMPLE DE VIS UTILISEE DANS LES EXTRUDEUSES

Fig(16) :

EXTRUSION

\* DIMENSIONS ET CARACTERISTIQUES DE NOTRE CABLE PRS

- Câble à champ radial .
- Tension nominale :  $U = 30 \text{ kV}$  .
- Tension spécifiée :  $U_0 = 18 \text{ kV}$  .
- Températures maximales sur l'âme :  $\begin{cases} -90^\circ\text{C} \text{ en régime permanent} \\ -250^\circ\text{C} \text{ en régime de c-circuit} \end{cases}$
- Nombre de brins : 19.
- Diamètre d'un brin :  $d = 2,14\text{mm}$ .
- Diamètre de l'âme :  $D = 10,7\text{mm}$  .
- Section nominale de l'âme :  $S = 70\text{mm}^2$  .
- Epaisseur de l'isolant :  $e = 8,2\text{mm}$  .
- Champ maximal ( à la surface de l'âme :  $E = 3,62 \text{ kV/mm}$  ) .

## ESSAIS ET MESURES NORMALISEES SUR CABLE

### GENERALITES

En général un bon isolant est caractérisé par une faible constante diélectrique  $\epsilon_r$  et un faible facteur de dissipation  $\text{tg}\delta$ ; par contre, la résistance d'isolement et la rigidité diélectrique doivent être aussi élevées que possible [12] .

La connaissance des caractéristiques électriques et diélectriques est primordiale pour accepter l'utilisation d'un matériau dans une isolation . Celles-ci facilitent aussi le choix entre plusieurs matériaux susceptibles de remplir les exigences imposées pour un fonctionnement donné .

Dans cette partie nous allons étudier les principales caractéristiques qui nous permettent d'identifier notre isolant et de vérifier s'il répond aux exigences de sa mise en service en Moyenne Tension .

Ces caractéristiques sont :

- Le facteur de dissipation  $\text{tg}\delta$  .
- La résistivité .
- La permittivité .
- La rigidité diélectrique .
- La résistance mécanique .

Pours réaliser nos mesures on a utilisé deux types d'essais :

- a) Essais de serie .
- b) Essais de type .

### III.1/ ESSAIS DE SERIE

Ces essais sont effectués par le fabricant sur toutes les longueurs de câble terminé, ils doivent montrer que le conducteur et l'isolateur sont en bon état .

Ces essais comprennent :

- Une mesure de la résistance linéique 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 .

#### III.1.1/ MESURE DE LA RESISTANCE LINEIQUE

la mesure est effectuée à l'aide d'un pont de WHEASTON sur une longueur de 15 mètres de notre échantillon .

Pour une température ambiante de 21°C on trouve  $R_t = 0,262 \Omega/\text{km}$  .

à 20°C on aura

$$R_{20} = \frac{0,262}{1 + a_{20}(t-20)} = \frac{0,262}{1 + 0,00393(21-20)} = 0,261 \Omega/\text{km}$$

où :

$R_{20}$  : Résistance linéique à la température  $t = 20^\circ\text{C}$  en  $\Omega/\text{km}$  .

$a_{20} = 0,00393$  est le coefficient de variation avec la température, de la résistance de cuivre, à masse constante et à dilatation libre .

$R_t$  : Résistance linéique à la température de mesure  $t$  en  $\Omega/\text{km}$

Cette valeur  $R_{20} = 0,261 \Omega/\text{km}$  est conforme aux recommandations de la norme CEI 228 [17] qui tolère une résistance linéique maximale à 20°C de  $0,268 \Omega/\text{km}$  .

### III.1.2/ VERIFICATION DE LA RIGIDITE DIELECTRIQUE DE COURTE

#### DUREE A FREQUENCE INDUSTRIELLE

Cet essai a été effectué sur toute la longueur du câble, afin de vérifier si celui-ci ne présente aucun défaut d'isolation apparent. La norme CEI 502 [15] recommande à ce que l'essai soit effectué sous une tension d'essai, à  $f = 50 \text{ Hz}$ , de  $2,5U_0$  pendant au moins 5 minutes. Pour notre cas, notre câble a été soumis à une tension  $U = 2,5U_0 = 45\text{kV}$  pendant une durée de 20 minutes.

L'essai s'est avéré satisfaisant car aucune perforation ne s'est produite durant tout l'essai.

### III.1.3/ MESURE DE LA RESISTANCE D'ISOLEMENT A TEMPERATURE AMBIANTE

#### Définition

La résistance d'isolement entre deux électrodes qui sont en contact avec un isolant est le rapport de la tension continue appliquée aux électrodes, au courant global qui les traverse à un moment après l'application de cette tension. Ce rapport dépend à la fois des résistances transversale et superficielle de l'isolant.

#### ESSAI EFFECTUE

Cet essai est réalisé à l'aide d'un Mégaohmètre autoréducteur ASEA type 3Y18, sous une Tension de mesure de  $U = 500 \text{ V}$  qu'on maintient pendant 5 minutes. On trouve :  $R_i = 2,4 \cdot 10^{13} \Omega$ .

L'intérêt que présente cette mesure de la résistance d'isolement est de permettre de contrôler le maintien de la qualité de fabrication du câble de même type et de mêmes dimensions, de même que cette résistance, comme on l'a vu nous permet de calculer la résistivité transversale du câble, et ceci à l'aide de la formule suivante :

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot L}{\ln(D/d)} \quad \text{Où :}$$

$\rho$  = Résistivité transversale.

R = Résistance d'isolement mesurée.

D = Diamètre extérieur de l'isolant.

d = Diamètre intérieur de l'isolant.

Pour notre cas on trouve  $\rho = 2,46 \cdot 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$

Cette valeur de la résistivité transversale est conforme à la norme CEI 502 [18] qui fixe comme seuil une valeur de  $10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ .

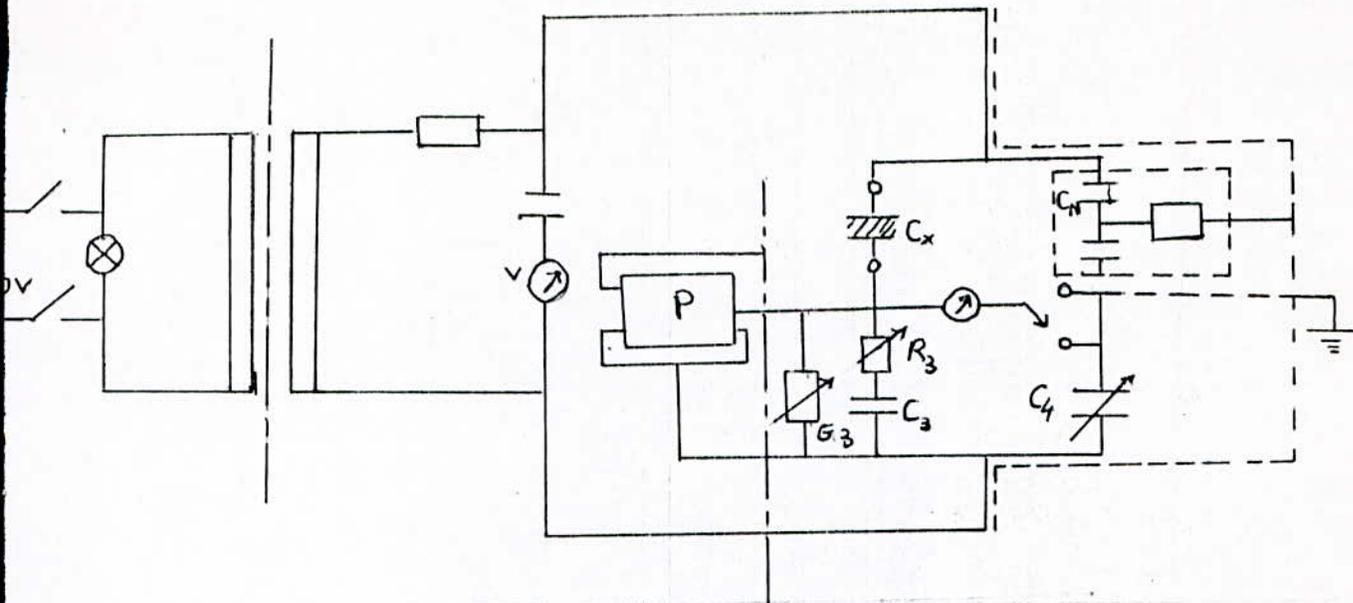
Avant d'effectuer les essais de type, une mesure de la permittivité relative de notre diélectrique, ainsi qu'un essai mécanique ont été effectués.

#### III.1.4/- MESURE DE LA PERMITTIVITE RELATIVE $\epsilon_r$

La mesure a été effectuée à l'aide d'un pont de Schering de type TETTEX AG dont dispose l'ENICAB (fig(17)). La technique de mesure se fait comme indiqué au paragraphe II.1.1.

les résultats obtenus nous donne comme moyenne  $\epsilon_r = 2,6$  et ceci à une température  $t = 20^\circ\text{C}$ .

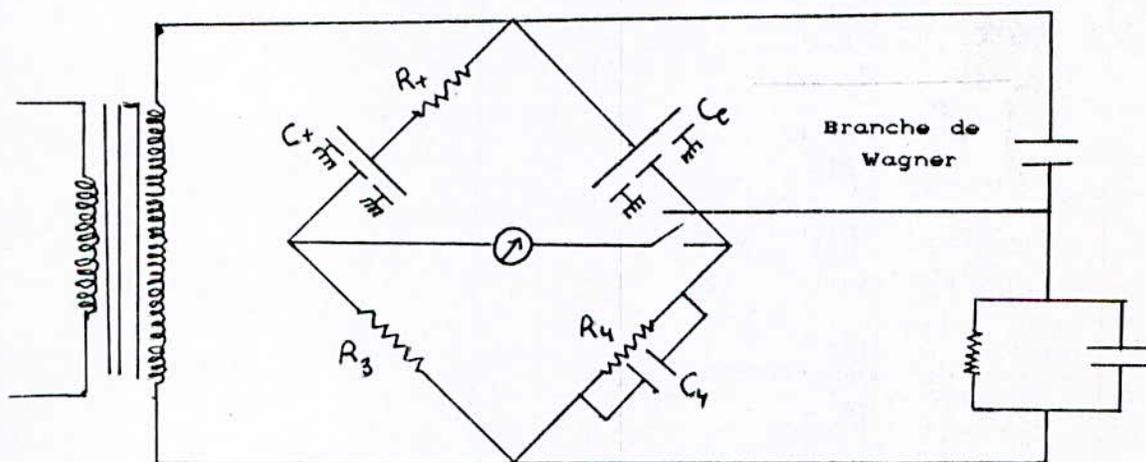
- On remarque que ( $\epsilon_r(\text{PRC}) \# 2,4$ )  $\#$  ( $\epsilon_r(\text{PRS}) \# 2,6$ ), donc le PRS présente une permittivité relative  $\epsilon_r$  très proche de celle du PRC.



Fig(17): SCHEMA DE PRINCIPE DU PONT DE SCHERING TYPE TETTEX.AG

$C_x$  : Capacité à mesuré

$C_n$  : Capacité étalon



$C_e$  : Capacité étalon

$C_x$  : Capacité du câble

à l'équilibre on a

$$C_x = \frac{C_e \cdot R_4}{R_3}$$

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

Fig(18): SCHEMA DE PRINCIPE DU PONT DE SCHERING TYPE MES.B

UTILISE POUR LA MESURE DES PERTES

### III.1.5/- ESSAIS MECANIQUES

Les caractéristiques mécaniques d'un diélectrique jouent un rôle très important dans son choix comme isolation dans un câble moyenne ou haute Tension. En effet, l'isolant doit avoir des propriétés mécaniques suffisantes pour qu'il puisse supporter sans défaillance les divers contraintes mécaniques rencontrées en service ( pliages, dilatation, chocs thermiques,...etc ).

Les essais réalisés consistent à rompre par traction à l'aide d'un dynamomètre, plusieurs éprouvettes de notre isolant. En suivant les recommandations de la norme CEI 540 [16] on a réalisé les essais suivants :

- la résistance à la traction, obtenue par le rapport de la charge à la section de l'éprouvette en Mpa.
- L'allongement à la rupture mesuré entre deux points distants initialement d'une longueur donnée exprimée en % de cette distance.

Les essais ont été effectués avant et après vieillissement des éprouvettes. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau II

	Avant réticulation		Après réticulation			
	Obtenu	à Obtenir	à l'eau pendant 2h à 90°C		et vieillissement de 168h à 135°C	
			Obtenu	à Obtenir	Obtenu	à Obtenir
Allongement à la Rupture	460%	300%	410%	200%	$\Delta A = -12,2\%$	$\pm 25\%$
Résistance à la Rupture	14,7Mpa	10 Mpa	15,3Mpa	12,5 Mpa	$\Delta R = 14,4\%$	$\pm 25\%$

TABLEAU II  
ESSAIS MECANIQUES

$\Delta A$  = différence entre valeurs médianes de l'allongement avant et après vieillissement.

$\Delta R$  = différence entre valeurs médianes de la résistance à la rupture avant et après vieillissement.

Nous remarquons que du point de vue mécanique, les valeurs obtenus sont conformes aux recommandation de la norme EDF HN 33-S-22 [19].

### III.2/- ESSAIS DE TYPE

Les essais de type doivent être effectués par le fabricant avant la commercialisation générale d'un type de câble. Ils sont obligatoirement effectués sur les prototypes et têtes de fabrication. Ces essais sont d'une nature telle qu'après leur exécution il n'est pas nécessaire de les répéter, à moins que des modifications n'aient été introduites dans le choix des matériaux ou de la construction du câble, de sorte que les caractéristiques de service puissent en être affectées.

Ces essais comprennent dans l'ordre suivant :

- 1)- Un essai d'enroulement.
- 2)- Mesure des pertes diélectriques  $\text{tg}\delta$  en fonction de la tension et mesure de la Capacité.
- 3)- Mesure des pertes diélectriques  $\text{tg}\delta$  en fonction de la température.
- 4)- Essai de cycle de chauffage.
- 5)- Essai de tenue aux ondes de choc suivi d'un essai de Tension à fréquence industrielle.

6)- Essai de rigidité diélectrique.

7)- Mesure de la résistance d'isolement à la température maximale de service.

Les essais de décharges partielles n'ont pu être effectués à défaut de matériel adéquat.

### III.2.1/- ESSAI D'ENROULEMENT

Le câble étant appelé à subir des pliages et des déformations d'ordre mécanique lors de la pose, cet essai sert à vérifier si les constituants du câble résistent aux contraintes mécaniques qui peuvent lui être appliquées.

Cet essai a été effectué en suivant les recommandations de la CEI 502 [15]

- L'échantillon de 15 mètres de long est enroulé à température ambiante autour d'un cylindre d'essai. Il est ensuite déroulé, redressé, puis enroulé à nouveau en sens inverse, ce cycle d'opérations est répété de façon à avoir 3 pliages dans un sens et 3 pliages dans l'autre.

- Le diamètre du cylindre d'essai est  $\Delta s = 17(D+d) = 737.8\text{mm}$ .

$d$  = diamètre de l'âme en mm.

Avec

$D$  = diamètre extérieur du câble en mm.

on a pris un touret normalisé de 80 cm de diamètre.

Après avoir soumis l'échantillon à l'essai d'enroulement, nous avons procédé à l'examen de l'échantillon. Les constituants ne présentaient ni fente, ni déchirure, ni rupture quelconque.

Ainsi donc l'échantillon a bien tenu aux contraintes mécaniques.

III.2.2/-MESURE DU FACTEUR DE PERTES DIELECTRIQUES  $tg\delta$  ET  
DE LA CAPACITE C EN FONCTION DE LA TENSION

Pour la mesure de ces pertes on a utilisé un pont de Schering de type MES 8 dont le schéma de principe a été déjà présenté (Fig 18 ). Cet essai permet de voir l'évolution de  $tg\delta$  et de la capacité C de l'isolant en fonction de la tension à température ambiante :

t = 20°C

U (kV) mesures	0.5U <sub>0</sub> 9	0.75U <sub>0</sub> 13.5	U <sub>0</sub> 18	1.25U <sub>0</sub> 22.5	2U <sub>0</sub> 36
$tg\delta \cdot [10^{-4}]$	8	12	16	20	32
C (nF/Km)	164	164	164	164	164

Des valeurs mesurés on constate que  $tg\delta$  à U<sub>0</sub> = 18 kV est égale à  $16 \cdot 10^{-4}$ , de même la variation de  $tg\delta$  entre 0,5U<sub>0</sub> et 2U<sub>0</sub> est  $\Delta tg\delta = 24 \cdot 10^{-4}$ .

Or la norme CEI 502 [15] nous imposent  $tg\delta_{max} = 40 \cdot 10^{-4}$  à U<sub>0</sub>  
 et  $\Delta tg\delta = 20 \cdot 10^{-4}$  entre 0,5U<sub>0</sub> et 2U<sub>0</sub>

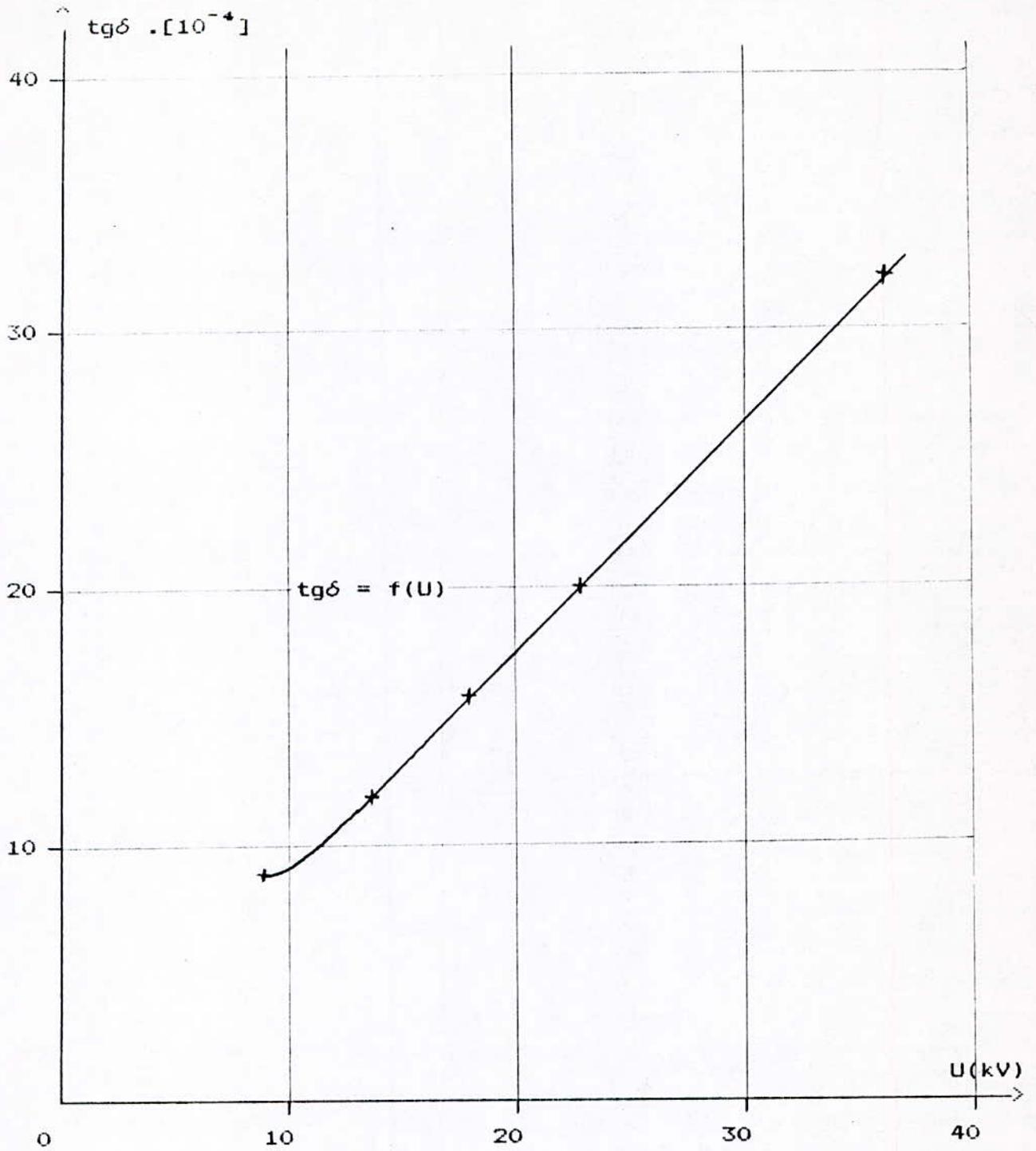
On remarque donc, que la valeur de  $tg\delta$  à U<sub>0</sub> est très faible par rapport à la valeur maximale admissible, de même la variation de  $tg\delta$  entre U<sub>0</sub> et 2U<sub>0</sub> est très proche de la valeur maximale admissible et reste acceptable.

-INTERPRETATION DES RESULTATS

D'après la courbe  $tg\delta = f(U)$  (Fig 19 ), on remarque que le facteur de dissipation  $tg\delta$  augmente proportionnellement avec la tension. Cette augmentation du facteur de pertes en fonction de la tension

s'explique par le fait que lorsque la tension augmente le champ devient plus intense , ce qui faciliterait les phénomènes d'ionisation au niveau des vacuoles de faible permittivité qui existent au niveau des couches de l'isolation. De même lorsqu'on applique un champ électrique, les électrons acquièrent de l'énergie qu'ils se partagent lors des collisions et qui doit être dissipée dans le réseau cristallin (interaction électrons-réseau) et ainsi la température des électrons sera la même que celle du réseau. De ce fait le nombre d'électrons piégés qui atteignent la bande de conduction augmente, engendrant une augmentation de la conduction de l'isolant, donc de  $\text{tg}\delta$ .

Afin de remédier à cela et donc diminuer les pertes, nous devons remplacer le fil textile utilisé comme semi-conducteur rubané dans notre câble, par un autre semi-conducteur constitué d'un composé formé par : 30% de noir de carbone et 70% de polyéthylène extrudé simultanément avec notre isolant.



Fig(19): VARIATION DE  $\text{tg}\delta$  EN FONCTION DE LA TENSION A TEMPERATURE AMBIANTE

### III.2.3/- MESURE DU FACTEUR DE PERTES DIELECTRIQUES $tg\delta$ EN FONCTION DE LA TEMPERATURE.

Cet essai nous permet de voir l'évolution du facteur de dissipation sous différentes tensions et à deux températures (température ambiante et température de service).

Pour avoir la température voulue, l'échantillon a été chauffé grâce à la circulation d'un courant continu appliqué à l'écran métallique sur l'isolant. Ainsi nous avons obtenu une température sur âme de  $90^{\circ}\text{C}$  en faisant circuler un courant de 600A dans le câble pendant un temps  $t = 4 \text{ h}$ .

Les résultats obtenus pour cette température de  $90^{\circ}\text{C}$  sont :

U(kV)	0.5U <sub>0</sub>	0.75U <sub>0</sub>	U <sub>0</sub>	1.25U <sub>0</sub>	2U <sub>0</sub>
mesures	9	13.5	18	22.5	36
$tg\delta \cdot [10^{-4}]$	8	16	23	30	50
C (nF/Km)	164	164	164	164	164

A  $90^{\circ}\text{C}$  la norme CEI 502 [15] recommande un  $tg\delta(\text{max})$  égal à  $80 \cdot 10^{-4}$  à 2 kV, or on constate que même pour une tension beaucoup plus grande,  $tg\delta$  mesuré est toujours plus faible que la valeur maximale admissible.

#### -INTERPRETATION DES RESULTATS.

De même qu'à la température ambiante,  $tg\delta$  augmente proportionnellement en fonction de la tension (fig 20). Mais les valeurs des pertes sont supérieures à celles correspondant à la température ambiante. Ceci s'explique par le fait qu'à la température

ambiante, un très petit nombre d'électrons reçoivent l'énergie nécessaire pour effectuer une transition dans la bande de conduction. Quand la température s'élève la probabilité de transition augmente. Donc la conductivité  $\gamma$  augmente ( $\gamma = \gamma_0 \exp(-W/KT)$ ), ce qui explique l'augmentation de  $\text{tg}\delta$ .

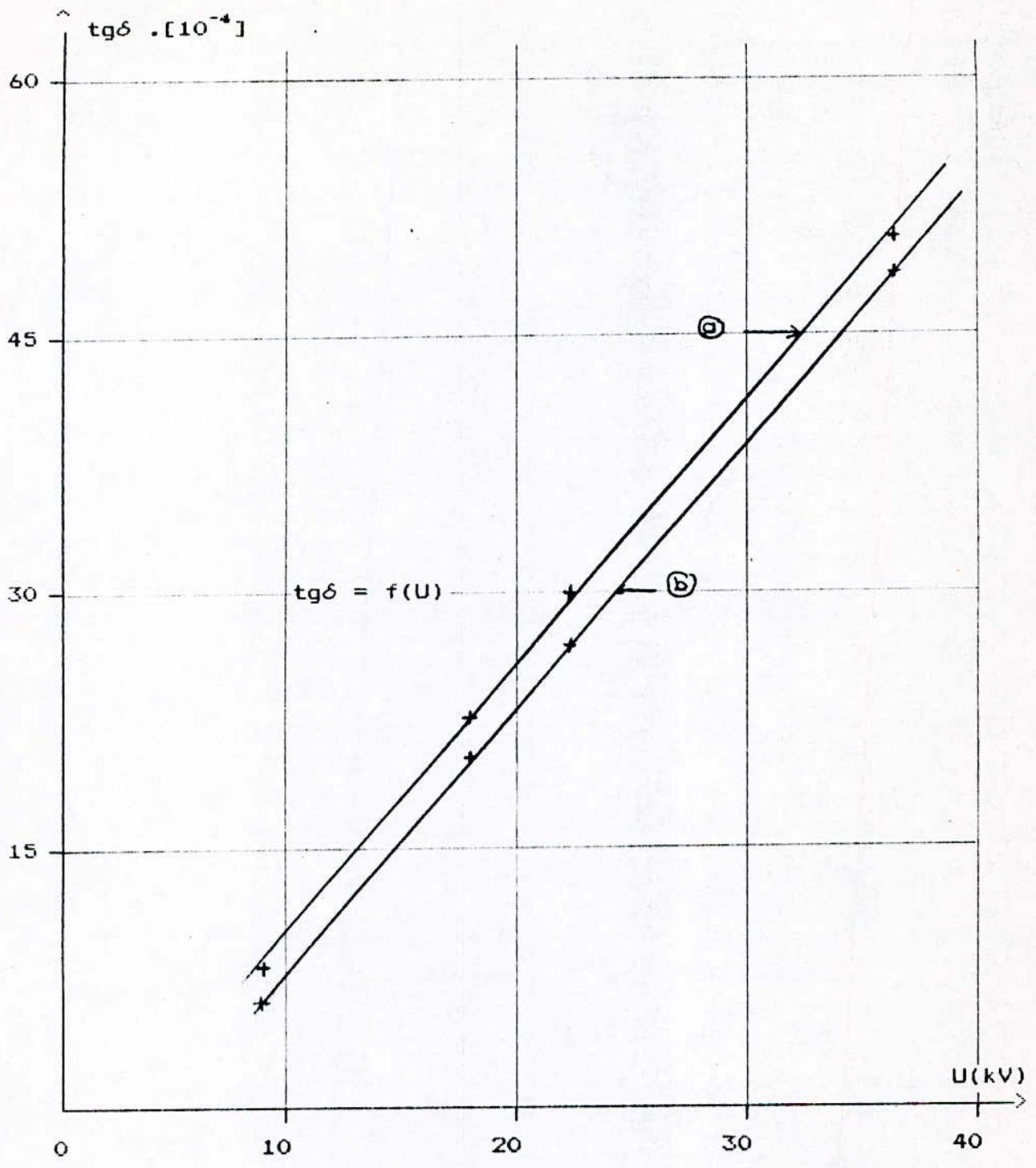
Pour ce qui concerne la capacité C on remarque qu'elle reste pratiquement constante quelle que soit la tension à laquelle le câble est soumis.

Pour voir l'évolution du facteur de dissipation  $\text{tg}\delta$  en fonction du temps d'échauffement à la température de service, on a maintenu le câble pendant 4 heures à cette température et on a relevé les valeurs suivantes :

U (kV) mesures	0.5U <sub>0</sub> 9	0.75U <sub>0</sub> 13.5	U <sub>0</sub> 18	1.25U <sub>0</sub> 22.5	2U <sub>0</sub> 36
$\text{tg}\delta \cdot [10^{-4}]$	6	14	21	28	49
C (nF/Km)	164	164	164	164	164

#### INTERPRETATION DES RESULTATS

Nous constatons qu'après avoir maintenu la température pendant un certain moment, une nette amélioration du facteur de dissipation  $\text{tg}\delta$  est observé (figure (20)), par contre la valeur de la capacité C de l'isolant reste inchangée. Enfin, on remarque que  $\text{tg}\delta$  à la température assignée 90°C est égal à  $6 \cdot 10^{-4}$  à 9 kV. Alors que les normes recommandent un facteur de dissipation maximal  $\text{tg}\delta$  de  $80 \cdot 10^{-4}$  à 2 kV. Notre câble répond donc parfaitement aux recommandations de la norme CEI 502 [15] relative au facteur de dissipation  $\text{tg}\delta$ .



Fig(20): VARIATION DE  $tg\delta$  EN FONCTION DE LA TENSION:

- (a) - A la température de service  $T = 90^{\circ}C$
- (b) - Après avoir maintenu pendant 4h cette température

### III.2.4/- ESSAI DE CYCLE DE CHAUFFAGE.

On chauffe le câble en faisant passer un courant dans l'âme conductrice jusqu'à ce qu'on atteigne une température constante supérieure de  $10^{\circ}\text{C}$  à la température assignée maximale de l'enveloppe isolante soit  $100^{\circ}\text{C}$ .

Le courant de chauffage est appliqué pendant 2 heures puis on laisse l'échantillon refroidir naturellement pendant 4 heures. Une fois cette opération terminée, on répète ce cycle deux fois encore.

Après le troisième cycle, des mesures de décharges partielles devaient être faites mais par manque de dispositif de mesure, on a soumis l'échantillon à un essai de tenue en haute tension, puis on l'a examiné, celui-ci n'a présenté ni perforation, ni déchirure, ni rupture quelconque.

Après un cycle de chauffage l'échantillon présente une tenue remarquable aux essais diélectriques.

### III.2.5/- ESSAI DE TENUE AUX ONDES DE CHOC SUIVI D'UN ESSAI DE TENSION A FREQUENCE INDUSTRIELLE.

En suivant les directives de la norme CEI 502 [15] l'essai de tenue aux ondes de choc doit être effectué de la façon suivante :

- Cet essai doit être effectué sur l'échantillon à une température du conducteur supérieure de  $5^{\circ}\text{C}$  à la température assignée maximale de service de l'enveloppe isolante, soit dans notre cas  $t = 95^{\circ}\text{C}$ .

- Le câble doit résister, sans perforation à 10 chocs positifs et 10 chocs négatifs de tension égale à 170 kV dans notre cas.

- Après avoir réalisé ces deux opérations ci-dessus le câble est soumis à un essai de tension alternative à fréquence industrielle à

la température ambiante, pendant 15 minutes .

La valeur de la tension d'essai à 50 Hz est de  $U = 2.5U_0 = 45 \text{ kV}$  comme recommandé par la norme CEI 502 [15] .

-Les essais de choc ont été effectués par la câblerie de BISKRA .  
Après avoir soumis le câble aux différentes opérations citées précédemment, aucune perforation de l'isolant ne s'est produite .

### III.2.6/ ESSAI DE RIGIDITE DIELECTRIQUE

#### a)- Essai à haute tension de 4 heures.

Cet essai nous permet de voir la bonne ou mauvaise tenue d'un câble soumis à la haute tension pendant une longue durée . Pour cela on applique graduellement à l'échantillon pendant 4 heures et à température ambiante une tension d'essai à fréquence industrielle entre l'âme conductrice et l'écran, variant de 0 à  $3U_0$ . Dans notre cas  $3U_0$  correspond à 54 kV.

Durant toute la période de l'essai aucune perforation de l'enveloppe isolante ne s'est produite.

#### b)- Etude de la rigidite diélectrique en fonction de la température

Pour voir l'influence de la température sur la rigidité diélectrique de notre câble, on a fait augmenter la température de l'âme par paliers de  $10^{\circ}\text{C}$  jusqu'à atteindre la température assignée maximale de service soit  $90^{\circ}\text{C}$ , et pour chaque palier de température on a soumis notre câble à un essai, sous tension alternative de 45 kV pendant 5 minutes.

Durant tous les essais aucune perforation de l'enveloppe isolante ne s'est produite. Notre câble tient donc parfaitement aux essais de rigidité diélectrique.

c)- Essai de claquage.

L'essai de claquage nous permet de déterminer la différence de potentiel maximum qu'un isolant peut supporter sans être perforé.

Le but de cet essai est de déterminer la tension maximale que peut supporter le câble et par là, avoir le coefficient de sécurité de celui-ci, qui est donné par le rapport entre la tension de perforation à la tension de service du câble .

Avant de réaliser notre essai nous avons pris soins de capoter les deux extrémités de l'échantillon et d'envelopper ses extrémités d'un diélectrique, de même qu'on a placé les déflecteurs au niveau de l'écran. Et ceci afin d'éviter que le décharge ne contourne l'isolant

Les essais ont été faits en appliquant entre l'âme et l'écran une tension continuellement croissante et en mesurant la valeur instantanée de la tension quand la perforation se produit. Pour les différents essais effectués nous obtenons une tension de perforation moyenne de  $U = 140 \text{ kV}$

Soit un coefficient de sécurité  $K = \frac{140}{18} \approx 7.8$

De même on déduit la valeur moyenne du champ  $E_{moy} = \frac{U_{moy}}{r_2 - r_1}$

Donc :  $E_{moy} = 17.1 \text{ kV/mm.}$

III.2.7/ MESURE DE LA RESISTANCE D'ISOLEMENT A LA TEMPERATURE MAXIMALE DE SERVICE

Cet essai a été réalisé sur notre échantillon de 15 mètres qu'on a chauffé jusqu'à une température de  $90^{\circ}\text{C}$ , grâce au passage d'un courant de 600A dans l'âme conductrice .

La méthode d'essai est identique à celle décrite pour la mesure de la résistance d'isolement à température ambiante, Ainsi on a obtenu une valeur de  $R_i = 600 \Omega \cdot \text{km}$  .

De la même façon on déduit la valeur de la résistivité transversale

$$\rho_t = 6.16.10^{19} \Omega.cm.$$

Cette valeur est conforme aux recommandations de la norme CEI 502 [15] qui tolère une résistivité transversale supérieure à  $10^{12} \Omega.cm$  à la température maximale de service.

### III.2.8/ CALCUL DU COURANT ADMISSIBLE DANS LE CÂBLE EN RÉGIME PERMANENT ET EN RÉGIME DE COURT-CIRCUIT

#### i)- En régime 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.

- 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 du conducteur à la valeur maximale permise  $\theta_1$ .

Dans notre cas  $\theta_1 = 90^\circ C$  : température maximale admissible dans les câbles à isolation en PRS, de tension spécifiée 18 kV adopté par la norme CEI 502 [15]. Connaissant  $\theta_1$ , on détermine  $I$ .

- La norme CEI 287 [18] recommande une méthode complète de calcul de la capacité de transport des câbles d'énergie selon le critère thermique.

Après calcul (voir annexe I) on trouve  $I = 424 A$  et  $J = 6 A/mm^2$  qui satisfait à la norme EDF HN 33-S-22 [19].

ii) En régime de court-circuit

Pour les câbles à champ radial, les court-circuits sont généralement homopolaire. On suppose que le câble est initialement chaud ( $90^{\circ}\text{C}$ ) et que la température des conducteurs en fin de surcharge ne dépasse pas  $250^{\circ}\text{C}$  et que l'échauffement est adiabatique

Après calcul (voir annexe II) on trouve  $I_{cc} = 10080 \text{ A}$  et  $J_{cc} = 144 \text{ A/mm}^2$  qui satisfait à la norme EDF HN 33-S-22 [18].

RÉSUMÉ DES PROPRIÉTÉS DIELECTRIQUES DU CÂBLE

PROPRIÉTÉS DU CÂBLE	UNITES	PRS	CEI 502 [1]
-Résistance linéique ( $20^{\circ}\text{C}$ )	$\Omega/\text{km}$	0.261	$< 0.268$
-Résistivité transversale ( $20^{\circ}\text{C}$ )	$\Omega.\text{cm}$	$2.46.10^{14}$	$> 10^{13}$
-Permittivité relative $\epsilon_r$		2.6	$2 < \epsilon_r < 12$
-Facteur de pertes diélectriques à la température ambiante :			
* $\text{tg}\delta$ à $U_0$		$8.10^{-4}$	$< 40.10^{-4}$
* $\Delta\text{tg}\delta$		$24.10^{-4}$	$< 20.10^{-4}$
-Pertes diélectriques à la température de service: $\text{tg}\delta$ à 2kV		$8.10^{-4}$ ( 9kV)	$< 80.10^{-4}$
-Résistivité transversale ( $90^{\circ}\text{C}$ )	$\Omega.\text{cm}$	$6.16.10^{13}$	$> 10^{12}$

ETUDE COMPARATIVE DES PERFORMANCES DU PRS

---

IV.1/-COMPARAISON GENERALE ENTRE LES ISOLANTS SECS ET LE PAPIER  
IMPREGNE.

Par opposition à l'isolation en papier imprégné de matière plus ou moins fluide, les isolants secs possèdent les avantages suivants:

- Absence d'écoulement : l'isolant étant sec, il n'y a pas de risque d'écoulement de matière, même en position verticale.

- Sensibilité réduite à l'humidité : Cette caractéristique permet souvent de se passer d'une gaine métallique absolument étanche. La protection mécanique n'est imposée que par les conditions d'exploitation ou de pose. Ceci confère au câble souplesse et légèreté.

- Protection mécanique allégée et insensibilité aux vibrations : Les câbles secs sont insensibles aux vibrations, toutes les matières d'isolation et de gaine les composants y étant elles même insensibles. Les isolants secs étant moins sensibles à l'humidité, les boites d'extrémités sont donc plus légères et de conception simples.

- Possibilité de conférer à l'isolation des caractéristiques particulières, appropriées à chaque emploi envisagé, du point de vue électrique, thermique, mécanique ou chimique.

## IV.2/-COMPARAISON ENTRE LE CABLE ISOLE AU PRS ET LES CABLES ISOLES AU PRC ET LE PAPIER IMPREGNE.

### IV.2.1/-ETUDE ECONOMIQUE SOMMAIRE.

Un calcul économique montre que dans la production de câbles moyenne tension, si l'on exclut les coûts du cuivre ou de l'aluminium Les frais de matières d'isolation et les coûts d'investissement représentent à eux seuls près de 90% des coûts de production. Il en résulte que toute économie réalisée sur ces deux postes, aussi faible soit-elle, a une répercussion non négligeable sur la rentabilité des fonds investis.

Pour avoir une idée sur le câble le plus économique entre les différents câbles cités ci-dessus, il suffirait de connaître le prix de revient à l'usine de la matière première du PRC et du PRS .

Pour le PRC, le prix de revient de la tonne est de 52904 DA ; alors que pour le PRS (SIOPLAS), le prix de la tonne est de 48758 DA ; de plus la réaction de réticulation avec les peroxydes (PRC) requiert une énergie thermique qui est apportée par une haute pression de vapeur (20 à 25 atm). De telles installations sont chères en construction, empiètement et consommation d'énergie, alors que la réticulation du PRS se fait à l'air libre, d'où un gain important d'énergie. En effet une ligne SIOPLAS coûte environ deux millions de Dinars (2.000.000 DA) contre dix millions (10.000.000 DA) pour une ligne à vapeur nécessitant en plus une centrale de production et de distribution de vapeur.

De même une petite comparaison avec le papier imprégné nous montre que le prix de revient du papier imprégné et de l'imprégnation est de 58300 DA/tonne, sans tenir compte des autres coûts (temps de cuisson, tube de plomb, matelas jute imprégné, ...etc).

Ajouter à cela le fait que la vitesse de production du PRS est de loin supérieure à celle du PRC et du papier imprégné .

On conclut donc que du point de vue économique le prix de revient à l'usine du câble fini est largement à l'avantage du PRS.

#### IV.2.2/-COMPARAISON DES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES.

Caractéristiques	CAPI	Câble PRC	Câble PRS
- tg $\delta$ <ul style="list-style-type: none"> <li>- à 20°C</li> <li>- à T de service max</li> </ul>	85.10 <sup>-4</sup> à U <sub>0</sub> 27.10 <sup>-4</sup> à 0,75U <sub>0</sub>	3.10 <sup>-4</sup> à U <sub>0</sub> 9.10 <sup>-4</sup> à U <sub>0</sub>	16.10 <sup>-4</sup> à U <sub>0</sub> 23.10 <sup>-4</sup> à U <sub>0</sub>
- Résistivité transversale ( $\Omega.m$ )	10 <sup>16</sup>	>10 <sup>16</sup>	2,46.10 <sup>16</sup>
- Permittivité relative $\epsilon_r$	3,5 à 20°C et à 1,8% d'HzO	2,3	2,6
- Température max admissible			
* En régime permanent (°C)	65	90	90
* En régime de court-c (°C)	150	250	250

Des caractéristiques ci-dessus, on remarque que le PRS est non seulement plus économique que le PRC et le papier imprégné mais aussi performant qu'eux du point de vue électrique. Il est à noter aussi que les propriétés électriques du PRS sont semblables à celles du polyéthylène (PE), qui est l'un des matériaux isolants les plus importants, utilisés dans l'industrie du câble.

Enfin, de par le très bon comportement à haute température de ses constituants, le câble à isolation PRS peut être utilisé pour la réalisation de liaisons électriques soumises à des températures ambiantes élevées, quand celles-ci interdisent l'utilisation du câble isolé au papier imprégné.

Cependant, il est à noter que les principaux inconvénients du PRS sont :

- Temps de stockage faible .
- Craint l'humidité : la moindre trace le réticule .
- Déchets non recyclables .

## CONCLUSION

Le but recherché dans ce travail n'a pas été le calcul d'un câble ou sa modification, mais l'étude de sa technologie de fabrication et de ses performances mécaniques et électriques.

Les différents essais effectués au laboratoire de haute tension de l'ENICAB ont montré que le câble moyenne tension isolé au PRS répond de façon très satisfaisante aux normes internationales aussi bien du point de vue électrique que mécanique.

Ce très bon comportement du PRS en tant que câble électrique explique l'orientation de plus en plus grande des pays occidentaux pour la fabrication de ce type de câbles (AEI: associated electrical industries).

Enfin, une étude faite par les responsables de l'entreprise recommandent, pour la fabrication des câbles au polyéthylène réticulé l'utilisation du procédé SIOPLAS qui, comparativement aux différents systèmes classiques de réticulation du polyéthylène procure les avantages suivants :

- Coût d'investissement à machine beaucoup moins élevé que ceux d'une ligne de vulcanisation classique à vapeur ou à azote.
- Vitesses de production élevées .
- Taux de déchets très bas lors des engagements et des fins de tourets. Toute la longueur est utilisée, contrairement au système actuel, où on perd toujours 100 à 200 mètres au début et à la fin de chaque touret [8].
- Coût de maintenance moins élevé à ceux des tubes dont la technologie compliquée nécessite des agents de maintenance très qualifiés sur la régulation des fluides, la synchronisation, ...etc.

- Grande flexibilité des équipements : Les machines installées peuvent être utilisées aussi bien pour le travail du PVC que le polyéthylène ou l'EPDM SIOPLAS.
- Réticulation complète (densité de réticulation élevée).
- Possibilité de couvrir des sections allant de  $1\text{mm}^2$  à  $160\text{mm}^2$ , quelle que soit leur forme, ronde, sectorale...etc.

Nous signalerons à la fin de ce travail que ce projet a été 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.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] : M CHEBREK et M HAMIA  
Conception et réalisation d'un câble de 30kV isolé à l'EPDM  
Ecole nationale polytechnique (1983)
- [2] : PHILIPPE ROBERT  
Matériaux de l'électrotechnique. (1982)
- [3] : J.P TROTIGNON.  
Précis de matières plastiques  
structure, propriétés, mise en oeuvre et normalisation  
Edition Fernand Nathan (1982)
- [4] : J.GOSSOT  
Les matières plastiques. Fabrication-technologie.  
Collection Durand technique (1977)
- [5] : TREFICABLE PIRELLI Câbles et fils électriques (1982).
- [6] : Différentes revues du laboratoire de chimie de l'ENICAB.
- [7] : MAILLEFER.SA (bulletins techniques):  
- Installations pour vulcanisation en continu de câbles  
- MONOSIL, un nouveau procédé économique d'isolation des câbles  
Basse Tension et Moyenne Tension au polyéthylène réticulé.
- [8] : BEN ZADI  
Etude sur le procédé SIOPLAS (1983)
- [9] : A MAUDUIT  
Installations électriques à Haute et Basse Tension.  
Edition DUNOD, PARIS (1964).
- [10] : E.KUFFEL  
High-voltage engineering (Oxford : Pergamon press (1987) .

- [11] : KIND Dieter  
High-voltage insulation technology (1985)
- [12] : MICHEL AGUET  
Haute Tension  
Edition Georgi, SUISSE (1987).
- [13] : Processus de fabrication des fils et câbles (ENICAB).
- [14] : "Cuivre-type recuit"  
Norme NFC 30-010 (1969)
- [15] : "Câbles de transport d'énergie isolés par diélectriques massifs extrudés pour des tensions assignés de 1kV à 30kV"  
Norme CEI 502 (1975).
- [16] : "Câbles moyenne et haute tension à isolation synthétique"  
Norme EDF HN 33-S-22 (1971)
- [17] : " Ames des câbles isolés "  
Norme CEI 228 (1978)
- [18] : "Methode d'essais pour les enveloppes et les gaines de câbles électriques rigides et souples (mélanges élastomères et thermoplastiques)". Norme CEI 540 (1979).
- [19] : "Calcul du courant admissible dans les câbles en régime permanent (Facteur de charge 100%)".  
Norme CEI 287 (1969).

## EVALUATION DE L'INTENSITE DU COURANT ADMISSIBLE ALTERNATIF ADMISSIBLE DANS LE CABLE.

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

$$\Delta\theta = (RI^2 + 0.5W_d) \cdot T_1 + [RI^2(1+\lambda_1) + W_d] \cdot n \cdot T_2 + [RI^2(1+\lambda_1+\lambda_2) + W_d] \cdot n \cdot (T_3 + T_4) + \sigma \cdot D_e \cdot H \cdot T_4$$

d'où

$$I = \left[ \frac{\Delta\theta - W_d \cdot [0.5T_1 + n \cdot (T_2 + T_3 + T_4)] - \sigma \cdot D_e \cdot H \cdot T_4}{R \cdot [T_1 + nT_2 \cdot (1 + \lambda_1) + n \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (T_3 + T_4)]} \right]^{1/2}$$

où :

I : Intensité du courant circulant dans un conducteur (A).

$\Delta\theta$  : Echauffement du conducteur au dessus de la température ambiante ( $^{\circ}\text{C}$ ).

la température du sol est prise au maximum, égale à  $20^{\circ}\text{C}$  d'où :

$$\Delta\theta = 90 - 20 = 70^{\circ}\text{C}.$$

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.

$T_3$  : Résistance thermique par unité de longueur du revêtement extérieur du câble.

$T_4$  : Résistance thermique par unité de longueur entre la surface du câble et le milieu environnant.

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

$n = 1$  pour un câble unipolaire.

$\lambda_1$  : 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.

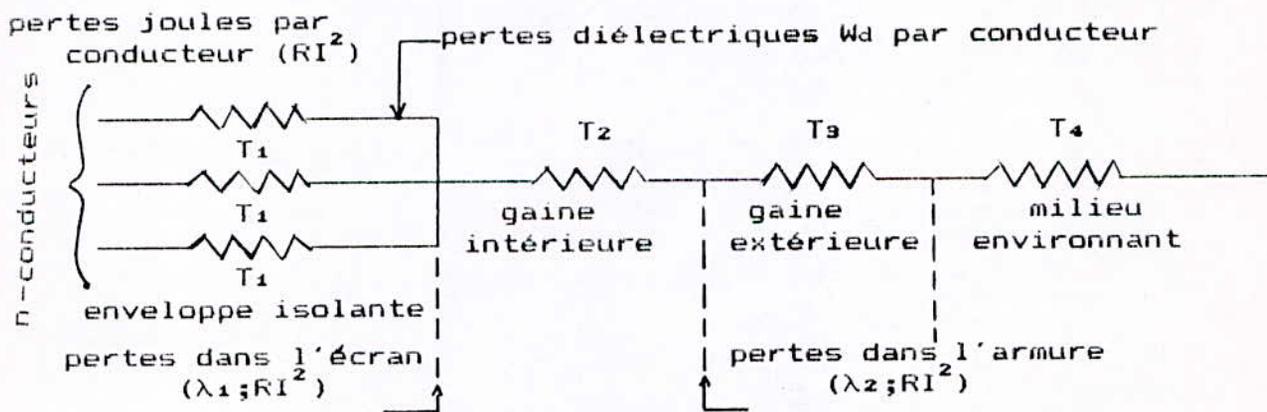
$\sigma$  : Coefficient d'absorption des rayons solaires à la surface du câble pour le PVC  $\sigma = 0.8$ .

$H$  : Intensité des rayons solaires qui est de  $0.1 \text{ W/cm}^2$  pour la plupart des altitudes.

$D_e$  : Diamètre extérieur du câble ( $D_e = 3.27 \text{ cm}$ ).

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

Du point de vue thermique le câble peut être représenté par le schéma suivant :



Pour notre câble:  $T_2=0$ ,  $\lambda_2=0$ ,  $n=1$  car on a un câble unipolaire sans armure.

## 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 ( $90^{\circ}\text{C}$ ) est donnée par la formule suivante:

$$R=R'(1+y_s+y_p) \quad \text{où :}$$

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' :

$$R' = R_0 \cdot [1 + a_{20} \cdot (\theta - 20)]$$

$R_0$  : Résistance en courant continu du conducteur à  $20^{\circ}\text{C}$  ( $\Omega/\text{cm}$ ).

$R_0$  est donnée par la norme CEI 228 [5]:  $R_0 = 0,268 \Omega/\text{km}$ .

$a_{20}$  : coefficient de variation à  $20^{\circ}\text{C}$  de la résistivité en fonction de la température, par  $^{\circ}\text{C}$ , à masse constante.

Pour le cuivre  $a_{20} = 0,00393$ .

$\theta$  : température maximale de service  $\theta = 90^{\circ}\text{C}$ .

### Application numérique:

$$R' = 0,268 \cdot 10^{-5} [1 + 0,00393(90 - 20)] = 0,342 \cdot 10^{-5} \Omega/\text{cm}.$$

\*- Facteur d'effet de peau  $y_s$

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8 \cdot x_s^4} \quad x_s^2 = \frac{8 \cdot \pi \cdot f}{R'} \cdot 10^{-9} \cdot K_s$$

f : Fréquence du courant d'alimentation f=50 Hz.

$K_s$  : Coefficient (Pour un conducteur en cuivre rond cablé  $K_s=1$  ).

$$x_s^2 = \frac{8 \cdot 3,14 \cdot 50}{0,342 \cdot 10^{-5}} \cdot 10^{-9} \cdot 1 = 0,3674$$

$$y_s = \frac{(0,3674)^2}{192 + 0,8 \cdot (0,3674)^2} = 70,264 \cdot 10^{-9}$$

$$\text{Donc } y_s = 7026 \cdot 10^{-7}$$

\*- Facteur d'effet de proximité  $y_p$

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

$$\text{où } x_p^2 = \frac{8 \pi f}{R'} \cdot 10^{-9} \cdot K_p$$

$d_c$  : Diamètre du conducteur en cm (  $d_c = 1,07$  cm ).

S : Distance entre axes des conducteurs en cm.

on suppose que les câbles se touchent, donc S est le diamètre du câble (  $S = D_c = 3,27$  cm ).

$K_p$  : Coefficient (pour un conducteur en cuivre rond cablé  $K_p = 0,8$  ).

$$x_p^2 = \frac{8 \cdot 3,14 \cdot 50}{0,342 \cdot 10^{-5}} \cdot 10^{-9} \cdot 0,8 = 0,3674$$

$$\text{d'où } y_p = 3305 \cdot 10^{-7}$$

$$\begin{aligned} \text{finalement } R &= R' \cdot (1 + y_s + y_p) = 0,342 \cdot 10^{-5} \cdot (1 + 7026 \cdot 10^{-7} + 3305 \cdot 10^{-7}) \\ &= 0,342 \cdot 10^{-5} \quad \Omega/\text{cm} \end{aligned}$$

### 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:

$$W_d = \omega \cdot C \cdot V^2 \cdot \text{tg} \delta \cdot 10^{-9} \text{ W/cm} .$$

où : -  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  en  $s^{-1}$

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

-  $V$  = Tension par rapport à la terre ( $V=18000$  Volts pour notre câble)

### \*- Capacité $C$

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

$\epsilon_r$  : Permittivité relative de l'isolant ( $\epsilon_r=2.6$  pour le PRS) .

$D_e$  : Diamètre extérieur de l'isolant ( $D_e=2.73$  cm) .

$d_c$  : Diamètre du conducteur comprenant la présence d'un écran, s'il ya lieu ( $d_c = 1.09$  cm) .

$$C = \frac{0,0241 \cdot 2,6}{2,73 \cdot \log_{10} \left( \frac{2,73}{1,09} \right)} \cdot 10^{-5} = 0,169 \cdot 10^{-5} \mu\text{F/cm}$$

D'où  $C = 0,169 \cdot 10^{-5} \mu\text{F/cm}$

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

$\text{tg} \delta = 0,008$

$$W_d = \omega \cdot C \cdot V^2 \cdot \text{tg} \delta \cdot 10^{-9} \text{ W/Cm} .$$

$$W_d = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,169 \cdot 10^{-5} \cdot (18000)^2 \cdot 0,008 \cdot 10^{-9} = 1,38 \cdot 10^{-9} \text{ W/cm}$$

d'où :  $W_d = 1,38 \cdot 10^{-9} \text{ W/cm}$

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 (1) et (2) donnent l'expression de ces pertes rapportées aux pertes totales dans les conducteurs.

Pour un câble unipolaire, le facteur de pertes est donné par :

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2} \quad (1)$$

où :

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

S : Distance entre axes des conducteurs ( S = 3,27 cm ) .

d : Diamètre moyen de la gaine ( d = 2,75 cm ) .

$$X = 4,6 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot \log_{10} \left( \frac{2 \cdot 3,27}{2,75} \right) \cdot 10^{-9} = 543,72 \cdot 10^9 \quad \Omega/\text{cm}$$

$R_s$ : Résistance linéique de la gaine au maximum de température admissible en  $\Omega/\text{cm}$  .

$$R_s = R_{20} \cdot [1 + a_{20} \cdot (90 - 20)]$$

$R_{20} = 0,261 \cdot 10^{-5} \quad \Omega/\text{cm}$  , valeur mesurée sur un échantillon .

$$a_{20} = 4 \cdot 10^{-9} \quad (^{\circ}\text{C})^{-1}$$

$$R_s = 0,261 \cdot 10^{-5} \cdot [1 + 4 \cdot 10^{-9} \cdot (90 - 20)] = 0,334 \cdot 10^{-5} \quad \Omega/\text{cm} .$$

D'où :

$$\lambda_1 = \frac{R_s}{R} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2} = \frac{0,334 \cdot 10^{-5}}{0,342 \cdot 10^5} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{0,334 \cdot 10^{-5}}{543,7 \cdot 10^9}\right)^2}$$

$$\lambda_1' = 252 \cdot 10^{-4}$$

Pour un câble à faible section  $\lambda_1'' = 0$  . donc  $\lambda_1 = 252 \cdot 10^{-4}$

#### d) Pertes dans les armures $\lambda_2$

Les pertes dans les armures ( $\lambda_2$ ) sont dues aux pertes par hysteresis ( $\lambda_2'$ ) et aux pertes par courant de Foucault ( $\lambda_2''$ ).

Dans notre cas on a un câble sans armure : Donc  $\lambda_2 = 0$  .

### 2) CALCUL DES RESISTANCES THERMIQUES

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

Nous calculerons les résistances thermiques linéiques des différentes parties du câble,  $T_1, T_2$  et  $T_3$ . Les résistances thermiques des matériaux utilisés comme isolant et revêtement sont données par la norme CEI 287 [19]

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

$$T_1 = 0,366 \cdot \rho_1 \cdot \log_{10} \left( \frac{D_i}{d_c} \right) \quad \text{où :}$$

$\rho_1$  : Résistivité thermique de l'isolant (PRS) ( =  $350^\circ\text{C.cm/W}$  ) .

$D_i$  : Diamètre extérieur de l'isolant ( =  $2,73 \text{ cm}$  ) .

$d_c$  : Diamètre de l'âme ( =  $1,09 \text{ cm}$  ) .

$$T_1 = 0,366 \cdot 350 \cdot \log_{10} \left( \frac{2,73}{1,09} \right) = 51,08 \text{ }^\circ\text{C.cm/W} \text{ .}$$

d'où :  $T_1 = 51,08 \text{ }^\circ\text{C.cm/W}$  .

### a.2) Résistance thermique T<sub>2</sub>

On a un câble sans armure (aussi sans revêtement intérieur sous l'armure) donc T<sub>2</sub>=0 .

### a.3) Résistance thermique T<sub>3</sub> du revêtement extérieur PVC

$$T_3 = 0,366 \cdot \rho_3 \cdot \log_{10} \left( \frac{D}{d_a} \right) \quad \text{Où :}$$

$\rho_3$  : Résistivité thermique du revêtement (PVC) ( = 700 °C.cm/W ) .

$D_e$  : Diamètre extérieur du revêtement extérieur ( = 3,27 cm ) .

$d_c$  : Diamètre intérieur du revêtement extérieur ( = 2,77 cm ) .

$$T_3 = 0,366 \cdot 700 \cdot \log_{10} \left( \frac{3,27}{2,77} \right) = 18,46 \text{ °C.cm/W} .$$

$$\text{d'Où : } T_3 = 18,46 \text{ °C.cm/W} .$$

### b) Résistance thermique extérieure T<sub>4</sub>

Le câble est placé à l'air libre et soumis aux rayons solaires. T<sub>4</sub> ce calcul par la formule suivante :

$$T_4 = \frac{1}{\pi \cdot D_e \cdot h \cdot (\Delta\theta_s)^{1/4}} \quad \text{Où :}$$

$D_e$  : Diamètre extérieur du câble ( = 3.27 cm ) .

$h$  : Coefficient d'émission de chaleur qui dépend de diamètre du câble ( $D_e$ ) et de l'état de surface de la gaine extérieur (noire).

- D'après l'abaque de la norme CEI 287 [19] pour  $D_e = 3.27$  cm on a :

$$h = 52 \cdot 10^{-5} \text{ W/cm}^2 \cdot (\text{deg}^\circ\text{C})^{5/4} .$$

$\Delta\theta_s$  : Echauffement de la surface par rapport à la température ambiante .

L'élévation de la température de la surface du câble  $\Delta\theta_s$  au dessus de la température ambiante est donnée par l'équation :

$$(1+\lambda_1+\lambda_2)(\Delta\theta+\Delta\theta_d-\Delta\theta_s) = \pi \cdot D \cdot h \cdot (\Delta\theta_s)^{5/4} \left[ \frac{T_1}{n} + T_2 \cdot (1+\lambda_1) + T_3 \cdot (1+\lambda_1+\lambda_2) \right] \quad (1)$$

où :

$$\Delta\theta_d = W_d \left[ \left( \frac{1}{1+\lambda_1+\lambda_2} - \frac{1}{2} \right) T_1 - \frac{n \cdot \lambda_2 \cdot T_2}{1+\lambda_1+\lambda_2} \right] + \sigma \cdot D \cdot H \left[ \frac{T_1 + n(1+\lambda_1)T_2 + n(1+\lambda_1+\lambda_2)T_3}{n(1+\lambda_1+\lambda_2)} \right]$$

$$(1) \implies \frac{\Delta\theta+\Delta\theta_d-\Delta\theta_s}{(\Delta\theta)^{5/4}} = \frac{\pi \cdot D \cdot e \cdot h}{(1+\lambda_1+\lambda_2)} \left[ \frac{T_1}{n} + T_2(1+\lambda_1) + T_3(1+\lambda_1+\lambda_2) \right]$$

Le calcul de  $\Delta\theta+\Delta\theta_d$  et de  $\frac{\Delta\theta+\Delta\theta_d-\Delta\theta_s}{(\Delta\theta_s)^{5/4}}$  permet de déterminer  $(\Delta\theta_s)^{1/4}$

d'après l'abaque de la norme CEI 287 [19]

On a :  $\Delta\theta = 70^\circ\text{C}$

$$\Delta\theta_d = W_d \left[ \left( \frac{1}{1+\lambda_1} - \frac{1}{2} \right) T_1 \right] + \sigma \cdot D \cdot H \left[ \frac{T_1 + (1+\lambda_1)T_3}{(1+\lambda_1)} \right]$$

$$= 1,38 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{1}{1+0,0252} - 0,5 \right] \cdot 51,08 + 0,8 \cdot 3,27 \cdot 0,1 \left[ \frac{51,08 + (1+0,0252) \cdot 18,46}{1+0,0252} \right]$$

$$= 17,9^\circ\text{C} \quad \text{Donc : } \Delta\theta+\Delta\theta_d = 87,9 \approx 88^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\theta+\Delta\theta_d-\Delta\theta_s}{(\Delta\theta)^{5/4}} &= \frac{\pi \cdot D \cdot e \cdot h}{(1+\lambda_1)} \left[ T_1 + T_3(1+\lambda_1) \right] \\ &= \frac{\pi \cdot 3,27 \cdot 52 \cdot 10^{-5}}{1+252 \cdot 10^{-4}} \left[ 51,08 + 18,46(1+0,0252) \right] \\ &= 0,36 \text{ } (^\circ\text{C})^{-1} \end{aligned}$$

Pour  $\Delta\theta+\Delta\theta_d = 88^\circ\text{C}$  et  $\frac{\Delta\theta+\Delta\theta_d-\Delta\theta_s}{(\Delta\theta)^{5/4}} = 0,36 \text{ } (^\circ\text{C})^{-1}$

L'abaque de la norme CEI 287 [2] nous donne  $(\Delta\theta_s)^{1/4} = 2,59 \text{ } (^\circ\text{C})^{1/4}$ .

donc :

$$T_4 = \frac{1}{\pi \cdot D \cdot e \cdot h \cdot (\Delta\theta_s)^{1/4}} = \frac{1}{\pi \cdot 3,27 \cdot 52 \cdot 10^{-5} \cdot 2,59}$$

d'où :  $T_4 = 72,28^\circ\text{C} \cdot \text{Cm/W}$

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

$$I = \left[ \frac{\Delta\theta - Wd. [0.5T_1 + n.(T_2 + T_3 + T_4)] - \sigma.D_o.H.T_4}{R.[T_1 + nT_2.(1 + \lambda_1) + n.(1 + \lambda_1 + \lambda_2).(T_3 + T_4)]} \right]^{1/2}$$

Application numérique :

$$I = \left[ \frac{70 - 1.38 \cdot 10^{-9} [0,551,08 + 1(0 + 18,46 + 72,28)] - 0,8 \cdot 3,27 \cdot 0,1 \cdot 72,28}{0,342 \cdot 10^{-5} [51,08 + 1 \cdot 0(1 + 0,0252) + 1(1 + 0,0252 + 0)(18,46 + 72,28)]} \right]^{1/2}$$

$$= 424,35 \text{ A}$$

$$\text{d'où } I = 424 \text{ A ; } J = I/S = 424/70 \approx 6 \text{ A/mm}^2 \text{ .}$$

## EVALUATION DE L'INTENSITE DU COURANT DE COURT-CIRCUIT ALTERNATIF DANS LE CABLE.

Pour les câbles à champ radial, les court-circuits sont généralement homopolaires. On suppose que le câble est initialement chaud ( $90^{\circ}\text{C}$ ) et que la température des conducteurs en fin de surcharge ne dépasse pas  $250^{\circ}\text{C}$  et que l'échauffement est adiabatique .

On a :

$$\frac{I_{cc}}{S} \cdot \sqrt{t} = K_c \left( A \cdot S^{1/2} / \text{mm}^2 \right) .$$

Avec : 
$$K_c = \left[ \frac{\gamma}{\rho_{20} \cdot a_{20}} \cdot \log_e \left[ \frac{1 + a_{20} (\theta_f - 20)}{1 + a_{20} (\theta_c - 20)} \right] \right]^{1/2}$$

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 ( $S = 70 \text{ mm}^2$ ).

$\gamma$  ( $\text{J}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{mm}^3$ ) : chaleur volumique du métal du conducteur (pour le cuivre  $\gamma = 3,5 \cdot 10^{-9} \text{ J}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{mm}^3$ ).

$\rho_{20}$  ( $\Omega \cdot \text{mm}$ ) : résistivité électrique du conducteur à  $20^{\circ}\text{C}$  (pour le cuivre  $\rho_{20} = 1,7241 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{mm}$ ).

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

$\theta_f(^{\circ}\text{C})$  : température du conducteur à la fin du court-circuit ( $\theta_f = 250^{\circ}\text{C}$ ).

$\theta_o(^{\circ}\text{C})$  : température du conducteur au début du court-circuit ( $\theta_o = 90^{\circ}\text{C}$ ).

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

Application numérique:

$$K_c = \left[ \frac{3,5 \cdot 10^{-9}}{1,7241 \cdot 10^{-9} \cdot 3,93 \cdot 10^{-9}} \log_e \left[ \frac{1 + 3,93 \cdot 10^{-9} (250 - 20)}{1 + 3,93 \cdot 10^{-9} (90 - 20)} \right] \right]^{1/2}$$

$$K_c = 1,439 \cdot 10^2 \simeq 144 \text{ A} \cdot \text{s}^{1/2} / \text{mm}^2$$

d'où  $I_{cc} = 10080 \text{ A}$  ;  $J_{cc} = I_{cc} / S = 10080 / 70 = 144 \text{ A/mm}^2$  .