

وزارة الجامعات والبحث العلمي
Ministère aux Universités et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT : *GENIE ELECTRIQUE*

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

INFLUENCE DE LA POLLUTION SUR L'ISOLATION DES EXTREMITES DE CABLES DE HAUTE TENSION

Proposé par :

*A. BOUBAKEUR
A. MEKHALDI*

Etudié par :

*N. ALLOUCHE
A. HAMDAD*

Dirigé par :

*A. BOUBAKEUR
A. MEKHALDI*

PROMOTION

JUIN 1992

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة الجامعات والبحث العلمي
Ministère aux Universités et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT : *GENIE ELECTRIQUE*

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*INFLUENCE DE LA POLLUTION
SUR L'ISOLATION DES
EXTREMITES DE CABLES
DE HAUTE TENSION*

Proposé par :

*A. BOUBAKEUR
A. MEKHALDI*

Etudié par :

*N. ALLOUCHE
A. HAMDAD*

Dirigé par :

*A. BOUBAKEUR
A. MEKHALDI*

PROMOTION

JUIN 1992

D E D I C A C E S

- A mes parents
- A toute ma famille
- A tous mes amis

Noureddine.

- A mes grand-parents
- A mes parents
- A mes soeurs
- A toute ma famille
- A tous mes amis.

Ahmed.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer notre vive reconnaissance, a Messieurs A. BOUBAKEUR et A. MEKHALDI, pour leur aide précieuse et le temps qu'ils nous ont consacré pour l'élaboration de ce travail.

Nous remercions Monsieur L. KHAILI, pour les moyens qu'il a mis à notre disposition pour la réalisation de nos essais. Nos remerciements vont aussi à Monsieur MOUHOUB pour son aide, lors des essais effectués à l'ENICAB.

2.3.2.	Tension d'apparition des décharges glissantes	24
<u>CHAPITRE 3</u>	LES PHENOMENES DE POLLUTION ET LEURS CONSEQUENCES SUR LE TRANSPORT DE L'ENERGIE ELECTRIQUE	27
3.1.	PHENOMENES DE POLLUTION	28
3.1.1.	Formation des couches polluantes	28
3.1.2.	Différents types de pollution	28
3.2.	CONSEQUENCES DE LA POLLUTION	30
3.2.1.	Arcs non localisés	30
3.2.2.	Arc fixe	30
3.2.3.	Contournement des surfaces isolantes / polluées	31
3.3.	CARACTERISATION DU DEGRE DE POLLUTION D'UN SITE	32
3.3.1.	Méthode de la densité de dépôt de sel équivalent	33
3.4.	METHODES D'ESSAIS	33
3.4.1.	Essais dans les conditions naturelles	33
3.4.2.	Méthodes d'essais sous pollution artificielle,	35
<u>CHAPITRE 4</u>	ETUDE EXPERIMENTALE	38
4.1.	MODELE EXPERIMENTALE	38
4.2.	ESSAIS SUR DES SURFACES PROPRES ET SECHES	40
4.2.1.	Circuit d'essai	40
4.2.2.	Mode opératoire	41
4.3.3.	Essais	42

4.3.	ESSAIS SUR DES SURFACES POLLUEES	50
4.3.1.	Circuit d'essais	50
4.3.2.	Mode opératoire	53
4.3.3.	Essais	57
	CONCLUSION	64
	BIBLIOGRAPHIE	66

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

La nécessité d'amener les lignes de transport d'énergie à très haute tension aux approches immédiats des agglomérations urbaines conduisent à effectuer des jonctions directes entre ces lignes et des câbles souterrains [1].

Ces jonctions ou extrémités de câbles, sont exposées aux dangers d'apparition des décharges glissantes, pouvant engendrer le contournement et la mise hors service de l'installation. Le risque de tels incidents s'accroît d'avantage en régions polluées, à cause de l'abaissement considérable de la résistivité superficielle de ces extrémités de câbles, qui affecte considérablement leur tenue diélectrique.

Notre étude portera d'abord, dans le chapitre 1, sur les câbles de haute tension et les propriétés importantes des polymères utilisés pour leur isolation, en particulier le PVC et l'EPDM. On s'intéressera, dans le chapitre 2 aux phénomènes des décharges glissantes à la surface des diélectriques solides. Par la suite, nous exposerons dans le chapitre 3, les différents phénomènes de pollution et leurs conséquences sur le transport de l'énergie électrique. Enfin, nous présenterons dans le chapitre 4, les circuits d'essais et de mesure, ainsi que les résultats des essais effectués sur des modèles de laboratoire d'isolateurs de traversée (modèle plan de TOEPLER). Les matériaux isolants utilisés sont le PVC et l'EPDM.

CHAPITRE 1

CABLES DE HAUTE TENSION ET POLYMERES UTILISES POUR LEUR ISOLATION

Dans les réseaux de transport à haute tension, les lignes souterraines sont du point de vue de l'exploitation moins avantageuses que les lignes aériennes. Cependant l'utilisation des câbles souterrains s'impose dans les zones urbanisées pour des raisons d'ordre technique, stratégique ou d'environnement [2].

Les câbles se composent principalement d'un (ou plusieurs) conducteur central, d'une isolation dont la rigidité diélectrique est élevée. La permittivité et les pertes diélectriques les plus faibles possibles et d'un écran conducteur généralement mis à la terre [2].

1.1. DIFFERENTES PARTIES D'UN CABLE:

Les différentes parties constituant un câble sont (figure 1):

1.1.1. Ame conductrice:

Elle est constituée généralement de plusieurs conducteurs formant une corde, assurant le transport de l'énergie électrique.

1.1.2. Couche semi-conductrice:

- (1): Ame conductrice
(2): Ecran semi-conducteur
sur âme
(3): Isolant
(4): Ecran semi-conducteur
isolant
(5): Ecran métallique
(6): Gaine de protection

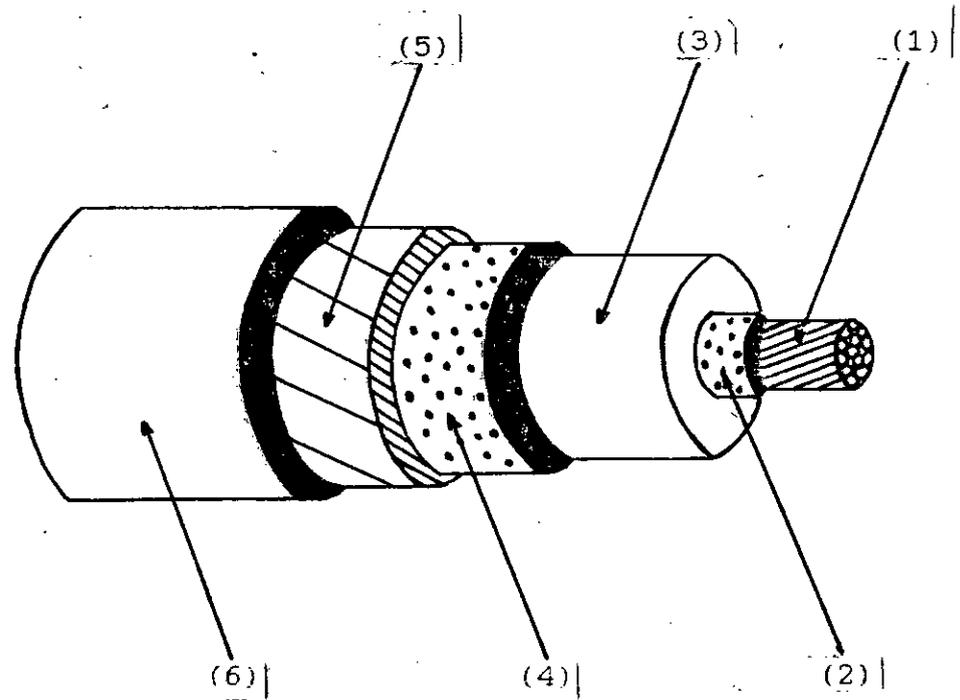


Figure 1: Différents constituants du câble

La concentration du champ électrique sur les irrégularités de la surface de l'âme (effet de brins) peut être préjudiciable à la bonne tenue en service, de l'isolant [3].

Pour y remédier, on utilise un écran semi-conducteur destiné à créer une surface équipotentielle autour de l'âme, en maintenant l'isolant au même potentiel que le conducteur, et à éviter en cas de mauvais contact ou de décollement, l'apparition des décharges partielles qui provoqueraient à plus ou moins longue échéance la dégradation et le claquage de l'isolant [4].

L'écran semi-conducteur constitue aussi une 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.

1.1.3. Isolant:

L'isolation est la partie la plus déterminante et la plus délicate dans la construction d'un câble. Les caractéristiques mécaniques et diélectriques du câble dépendent du choix de la nature de l'isolant, et de son épaisseur.

1.1.4. Ecran métallique:

Il est constitué d'une partie semi-conductrice non métallique associée à une partie métallique. Il a pour rôle

d'éviter une ionisation possible à la surface de l'isolant et d'homogénéiser la répartition radiale du champ électrique rendant les caractéristiques électriques des câbles indépendantes du mode de pose [2]. 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.

1.1.5. Gaine de protection:

Cette gaine a pour rôle de protéger le câble des différents phénomènes pouvant provoquer sa détérioration. Pour cela, elle doit présenter les caractéristiques suivantes:

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

1.2. CARACTERISTIQUES DES POLYMERES UTILISES EN HAUTE TENSION:

Au cours de ces dernières années, les applications des matériaux synthétiques se sont fortement développées et étendues à tous les domaines particulièrement électriques.

Les polymères trouvent actuellement de larges applications en technique de la haute tension. Ils remplacent progressivement les matériaux isolants classiques dans différents appareillages (condensateurs, isolateurs, câbles, transformateurs, etc...). Les bonnes performances de ces matériaux aux essais d'endurance thermique et leurs bonnes propriétés diélectriques leur ont ouvert de larges horizons

d'application en technique de la haute tension [5].

Cependant, à la différence des gaz et des liquides, le claquage des isolants solides entraîne la destruction du matériau, et par conséquent, l'arrêt du fonctionnement du système dont il fait partie. Ceci constitue un problème d'ordre technologique et scientifique d'importance particulière, qui s'accroît de nos jours par l'utilisation accrue des polymères dans divers secteurs.

1.2.1. Propriétés physico-chimiques des polymères:

1.2.1.1. Définitions:

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, et donc la substance de départ [6].

1.2.1.2 Différents types de polymérisation:

* Polymérisation en masse:

On place simplement le monomère dans une enceinte, en ajoutant éventuellement des catalyseurs. Généralement la réaction ne peut avoir lieu que sous des pressions et des températures élevées. L'appareillage utilisé est donc complexe, le polymère présente une pureté élevée [6].

* Polymérisation en solution

Le monomère et les catalyseurs s'il y a lieu, sont dissous dans un solvant. Ce procédé permet d'opérer à des températures plus basses et d'extraire plus efficacement la chaleur de la réaction. Comparé à celui de la polymérisation en masse, il nécessite une opération supplémentaire: la séparation du polymère et du solvant. Par ailleurs les impuretés du solvant sont susceptibles de polluer le polymère [6].

* Polymérisation en émulsion:

Cette polymérisation est caractérisée par le fait que les substances en présence pour la réaction forment deux phases non miscibles. Le polymère se forme soit dans l'une des phases, soit à la surface de séparation des phases [6].

1.2.1.3. Types de réactions de polymérisation:

On distingue deux types de réactions de polymérisation:

* Polymérisation par addition (polyaddition):

Ce type de réactions est caractérisé par l'assemblage des monomères sans formation d'un produit de réaction.

* Polymérisation par condensation (polycondensation):

Ce type de réactions est caractérisé par la formation d'un produit de réaction.

1.2.1.4. Structures moléculaires des polymères:

La structure moléculaire des polymères influe de manière décisive sur leurs propriétés mécaniques et diélectriques. Un polymère formé d'un seul type de monomère est appelé homopolymère. S'il comprend deux monomères ou d'avantage, c'est un copolymère.

Un homopolymère peut présenter trois structures différentes: linéaire, ramifiée, réticulée (figure 2). Les structures d'un copolymère sont plus nombreuses et plus complexes que celles d'un homopolymère, car elles dépendent encore de la disposition régulière ou aléatoire des différents monomères le long des chaînes [6].

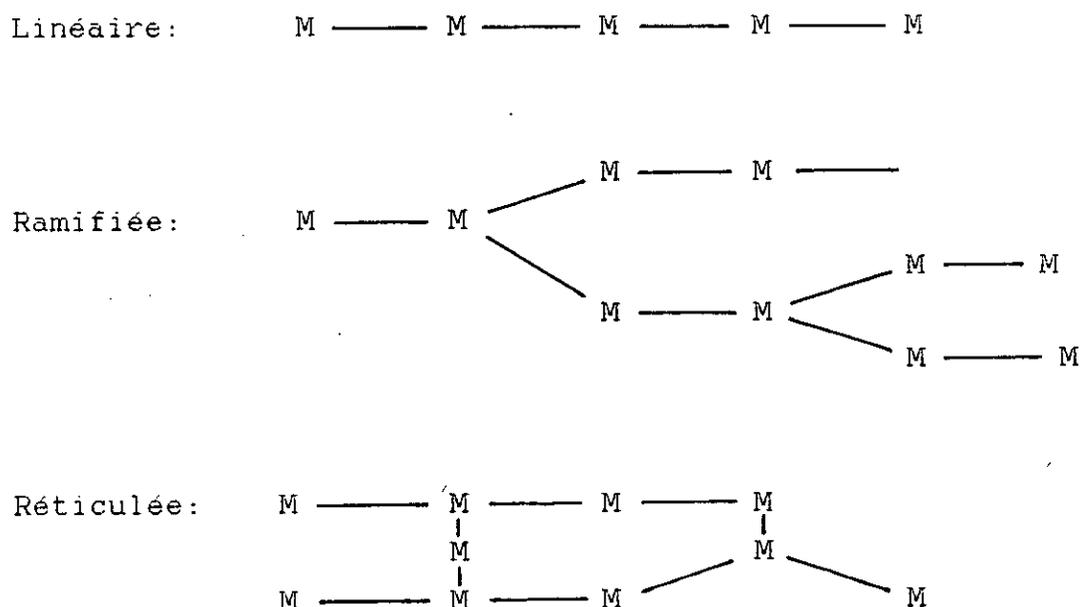


Figure 2: Représentation schématique des structures d'un polymère

Aux structures linéaires et faiblement ramifiées, correspondent les thermoplastiques. Comme leur nom l'indique, ces substances se déforment facilement quand la température augmente. Aux structures faiblement réticulées, c'est à dire formant un réseau à mailles larges, correspondent les élastomères, dont le comportement mécanique est comparable à celui du caoutchouc. Lorsque les mailles du réseau deviennent serrées, l'élasticité disparaît. Le matériau est appelé thermodurcissable, car la formation du réseau serré est accélérée par une élévation de la température [6].

1.2.1.5. Comportement chimique des polymères:

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 causer d'importantes contraintes qui peuvent être catastrophiques pour le matériau [5].

1.2.1.6. Propriétés mécaniques:

De manière générale, les polymères ont de bonnes propriétés mécaniques. Ils se distinguent 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 bonne résistance à l'usure
- leur importante résistance aux efforts de compression et de traction [3].

1.2.2. Propriétés électriques des polymères:

La plupart des propriétés électriques des polymères sont d'une façon ou d'une autre liées aux structures moléculaires du polymère. Il faut cependant tenir compte, lors de l'étude des propriétés, de la présence de charges et d'adjuvants, de l'absorption éventuelle d'humidité et enfin de la morphologie du polymère [7] et [8].

1.2.2.1. Rigidité diélectrique:

La rigidité diélectrique des polymères peut varier de 150 à 500 kV/cm, en fonction de:

- leur structure moléculaire
- leur morphologie: présence de vide, bulles, etc...
- la durée d'application de la tension.

1.2.2.2. Propriétés électriques superficielles:

La résistivité superficielle est fortement influencée par l'humidité. Elle caractérise la "peau" du matériau. La résistance aux décharges superficielles est importante dans les applications où une décharge électrique peut endommager le matériau, et en le carbonisant, le rendre superficiellement conducteur [7].

1.2.2.3. Résistivité transversale:

La résistivité transversale 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. Pour la majorité des polymères, la valeur de la résistivité transversale est supérieure à $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ [8].

1.2.3. 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 plupart 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 champ est suffisant, peuvent (par érosion, fusion localisée ou autre processus) créer dans le polymère, des réseaux de canaux plus ou moins conducteurs, appelés arborescences (figure 3), qui croissent au cours du temps provoquant un claquage dès que leur taille est suffisante [6].

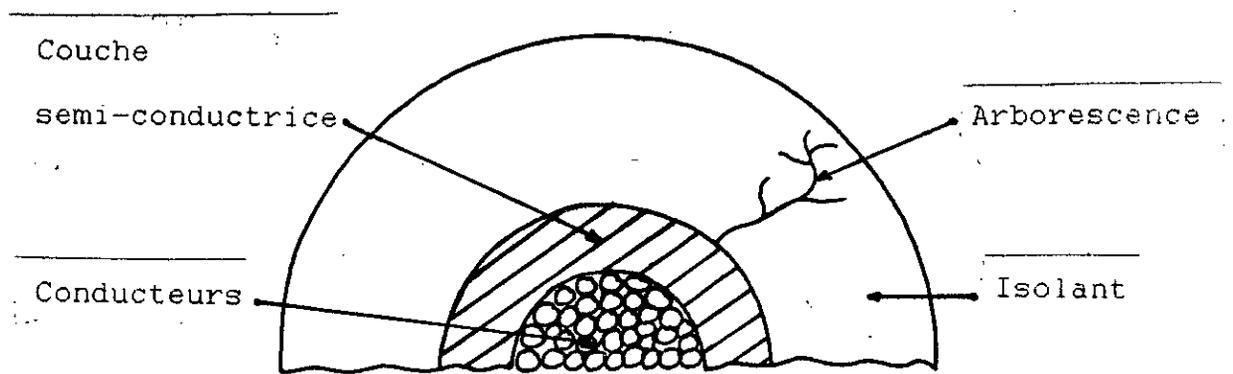


Figure 3: Arborescences dans l'isolant d'un câble

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 leur rigidité de façon importante [6]. Le vieillissement peut être aussi du type thermique, caractérisé par l'influence de la température sous un champ constant. La température peut altérer de façon considérable les propriétés du matériau.

1.2.4. Polymères utilisés dans les câbles de haute tension:

Les polymères les plus utilisés dans l'isolation des câbles de haute tension sont:

- le Polychlorure de Vinyle (PVC)
- le Polyéthylène (PE)
- le Polyéthylène Réticulé Chimiquement (PRC)

- l'Ethylène-Propylène-Diène Modifié (EPDM)
- et tout dernièrement le PE réticulé au "silane" dénomé PRS

Dans notre projet, nous nous intéressons aux phénomènes des décharges glissantes au niveau des extrémités de câbles. Les deux matériaux que nous avons utilisés sont le PVC et l'EPDM.

1.2.4.1. Polychlorure de Vinyle (PVC):

Le PVC n'est pas seulement l'une des matières plastiques les plus anciennes, mais également celle que l'on emploie fréquemment. On l'obtient par polymérisation du Chlorure de Vinyle (CH_2CHCl). Ce dernier est obtenu soit par addition de l'Acide Chlorhydrique à l'Acétylène, soit par séparation de l'Acide Chlorhydrique du Dichloroéthane.

Le PVC seul est une résine dure. On y ajoute un certain nombre d'adjuvants en vue de faciliter sa mise en oeuvre et d'obtenir les caractéristiques souhaitées pour le produit fini. Ces adjuvants sont des charges, des stabilisants, des lubrifiants, des colorants et des pigments, ainsi que plusieurs additifs divers. On obtient ainsi une matière thermoplastique isolante, ininflammable, insensible à l'ozone, résistante aux solvants, aux acides et absorbant peu l'humidité.

Très résistant aux décharges partielles, le PVC n'est cependant utilisé que pour des tensions n'excédant pas 30 kV,

étant donné qu'il a un facteur de pertes diélectriques $\text{tg}\delta$ relativement important. Par ailleurs, les qualités chimiques du PCV, le font largement utiliser dans la fabrication des gaines de protection des câbles de haute tension [5].

1.2.4.2. Ethylène-Propylène-Diène Monomère (EPDM):

L'EPDM est un terpolymère d'Ethylène-Propylène-Diène non conjugué, caractérisé par une absence totale d'insaturation dans la chaîne principale du polymère. Il a une bonne résistance à l'oxygène, à l'ozone, et autres produits chimiques tels les acides, alcools... Il a une bonne tenue au vieillissement thermique. Il est souple aux basses températures et a de bonnes propriétés électriques [5].

CHAPITRE 2

DECHARGES GLISSANTES A LA SURFACE

DES DIELECTRIQUES SOLIDES

Les décharges glissantes font partie des décharges superficielles qui peuvent avoir lieu dans l'air près de la surface d'un diélectrique solide. Le champ électrique donnant lieu à ce type de décharges a sa composante principale tangentielle à la surface du matériau isolant. Du point de vue technique, elles sont très nuisibles.

L'apparition des décharges glissantes sur les isolateurs haute tension n'est pas admissible, car il suffit en général d'une légère augmentation de tension pour qu'elles se transforment en décharges complètes court-circuitant ainsi les électrodes [9].

Dans le cas d'une mauvaise interface, des décharges de haute énergie, se développent, même à des tensions modérées, et peuvent court-circuiter d'importantes épaisseurs d'isolant.

2.1. SYSTEMES D'ISOLATION EXPOSES AUX DECHARGES GLISSANTES:

Il existe de nombreux systèmes d'isolation haute tension, exposés aux dangers d'apparition des décharges glissantes, parmi lesquels, nous pouvons citer:

- isolateurs de traversée, traversant les murs ou le couvercle des cuves des transformateurs

- extrémités de câbles
- extrémités de sorties des enroulements des stators des machines tournantes, etc....

Le système d'isolation courant le plus exposé aux dangers d'apparition des décharges glissantes est l'isolateur de traversée. Un tel système est constitué d'une électrode de faible dimension et d'une autre de grande dimension dont la forme la plus simple est représentée à la figure 4. Ces électrodes sont séparées par deux diélectriques de permittivités différentes (gaz ou liquide et solide), stratifiés en série-parallèle. La symétrie axiale de ce système n'est pas d'ailleurs essentielle du point de vue des décharges, les décharges glissantes peuvent se produire sur un système plan, tel qu'il est représenté à la figure 5. Ce qui caractérise ces deux systèmes est leur grande capacité superficielle spécifique définie par M. TOEPLER comme étant la capacité existant entre 1cm^2 de feuille métallique, collée sur la surface du diélectrique près de l'électrode active et la contre-électrode [9].

En général, le champ électrique représenté à la figure 4 peut être remplacé par un système de capacités K et C (figure 6), il apparaît que la capacité spécifique superficielle est liée à la capacité C . Une des conséquences des valeurs élevées de la capacité C est la grande valeur de l'intensité du champ près de l'électrode active (figure 7).

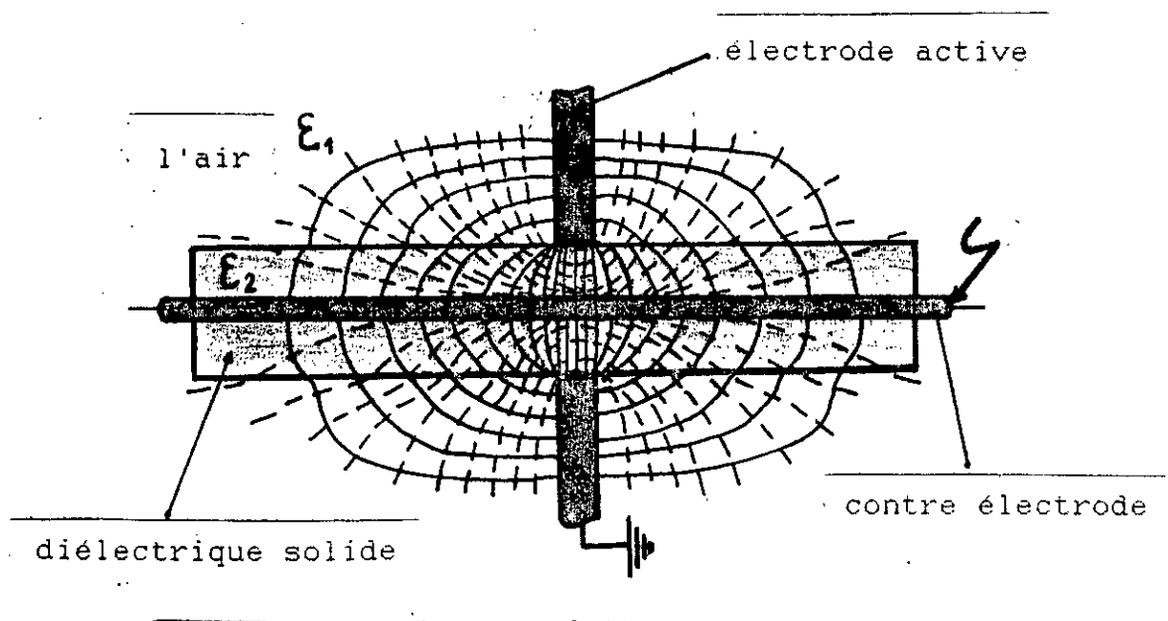


Figure 4: Système cylindrique simple

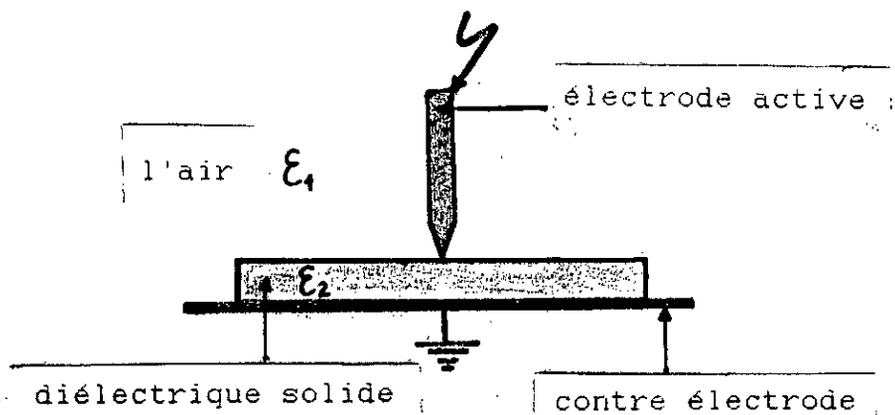


Figure 5: Système plan

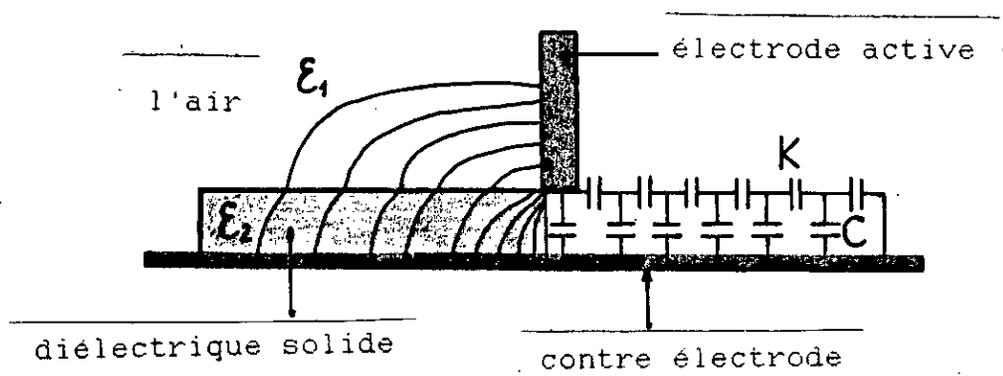


Figure 6: Schéma équivalent du système cylindrique de la figure 4

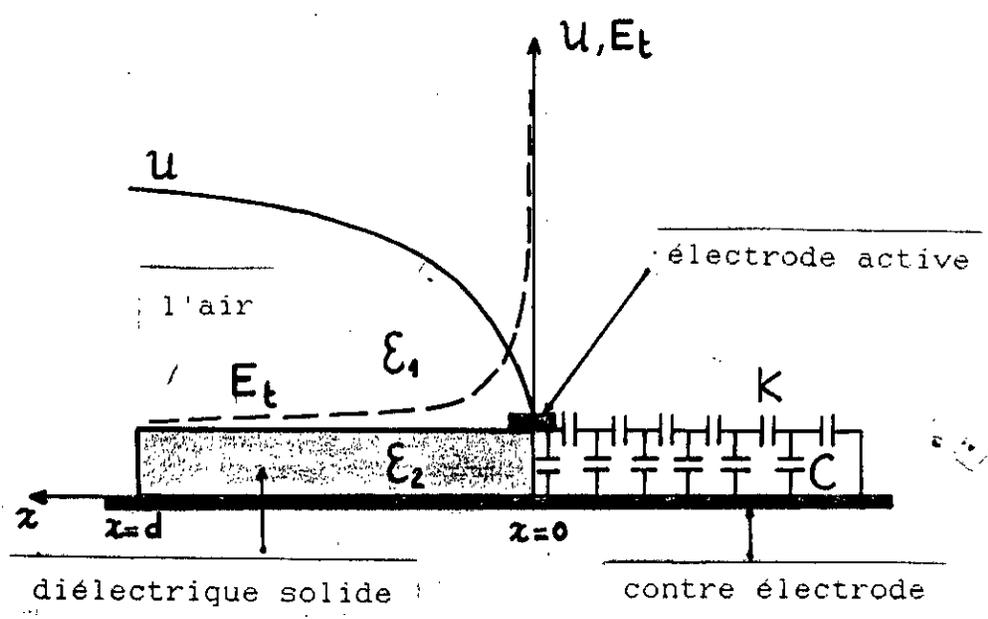


Figure 7: Répartition de la tension et de l'intensité du champ le long de la surface du diélectrique solide

C'est à cet endroit que la décharge prend naissance (apparition d'effet couronne) [9].

2.2. FORMATION DES DECHARGES GLISSANTES:

Les modalités d'apparition des décharges glissantes dépendent de:

- la structure du champ électrique qui est liée à la géométrie du système composé des deux diélectriques (solide et gazeux), et les électrodes
- la polarité et la forme de la tension appliquée
- la nature et l'état des deux diélectriques utilisés.

Le développement spatial des décharges glissantes est similaire à celui des décharges dans l'air. Lorsque la tension appliquée au système augmente, il y a d'abord apparition d'effluves (effet couronne) autour de l'électrode active, ceci se produit lorsque l'intensité du champ autour de cette électrode dépasse la rigidité diélectrique de l'air. Les porteurs de charges produits par l'effet couronne sont concentrés à la surface de l'isolant solide sous l'action de la composante normale (E_n) du champ, et la composante tangentielle (E_t) tend à les éloigner de l'électrode active. Pour des tensions plus importantes, des canaux de plasma ou filets lumineux apparaissent, ces derniers possèdent à leurs extrémités une concentration de charges de polarité donnée. Le champ étant intense au niveau de ces extrémités, des électrons se trouvant à proximité de celles-ci engendrent des

avalanches, et ainsi les canaux de plasma évoluent et glissent sur la surface du diélectrique vers la contre électrode. C'est pour cette raison qu'on les appelle "décharges glissantes" [9]. Si l'on continue d'augmenter la tension appliquée, les décharges glissantes atteignent la contre électrode, et le contournement se produit.

Les charges se trouvant aux extrémités des canaux de plasma se présentent, sous forme de pointes positives lorsque l'électrode active est positive, et sous forme d'hémisphères négatives quand elle est négative. A tensions égales, le champ est plus intense au niveau des pointes positives qu'au niveau des hémisphères négatives, ainsi l'évolution des canaux de décharge sera facile dans le cas où l'électrode active est positive, et les décharges glissantes qu'on obtiendrait seront plus longues. Ainsi, on obtiendrait une tension de contournement relativement plus faible dans le cas où l'électrode active est positive.

L'aspect des figures représentant les décharges positives et négatives est très différent pour la même forme de tension appliquée. Les décharges positives présentent des canaux partant de l'électrode active en forme d'étoile, ces canaux se distinguent bien les uns des autres et leur nombre dépend de la vitesse de variation de la tension appliquée. Les décharges négatives présentent aussi des canaux régulièrement répartis autour de l'électrode active, mais flous vers leurs extrémités, et séparés par des zones obscures [9].

On peut en déduire que lors de l'application d'une tension impulsionnelle, la forme des décharges permet de déterminer la polarité et l'amplitude de la tension appliquée.

Lors de l'application d'une tension périodique, les décharges glissantes, auront le caractère des figures positives. Ceci est valable même dans le cas où la première demi-période est négative, car les décharges positives sont plus longues que les négatives. La forme des décharges périodiques dépend de la fréquence de la tension appliquée [9].

Lors de l'application d'une tension continue, les décharges glissantes dont le courant se ferme par la capacité, ne se produisent pas. Dans ce cas, les décharges passeront directement du stade d'effluves au stade d'étincelles complètes court-circuitant les électrodes [9].

2.3. PROPRIETES ELECTRIQUES DES DECHARGES GLISSANTES:

2.3.1. Caractéristique u-i des décharges glissantes:

D'après M.TOEPLER et son Ecole, les filets lumineux ont une caractéristique tension-courant (u-i) non linéaire (figure 8). Cette caractéristique croît à partir du moment où les filets se forment (à $U=U_r$), c'est à dire que l'élévation de la tension conduit à une augmentation de courant, comme pour un circuit à résistance constante. Après passage, en un temps très court d'une quantité déterminée de charge électrique par le filet (environ 1 nC en 0.1 μ S

d'après M. TOEPLER [10], 7 à 10 nC pour l'électrode active positive et 1 nC pour l'électrode active négative d'après G. NEUMARKER [11]), la caractéristique devient descendante, comme pour la caractéristique bien connue de l'arc électrique. Ceci s'explique par une brusque élévation du courant de décharge (passage du point instable A au point stable B). Ce passage correspond à la transformation du filet en décharge glissante. A la figure 8, on a supposé que la source de tension possède une impédance interne sous forme de résistance R. En pratique (en exploitation et au laboratoire), cette impédance est fortement inductive, ce qui ne change pas l'explication qualitative du passage du filet à la décharge glissante. Le diagramme réel se substituant alors à celui de la figure 8 est constitué par les caractéristiques dynamiques, aussi bien de la source de tension que de la décharge [9].

La tension correspondant à la transformation des filets en décharges glissantes (point A de la figure 8) est liée, comme on l'a déjà mentionné au passage d'une charge électrique suffisamment importante par le filet lumineux. Ceci permet de comprendre le rôle primordial de la valeur de la capacité superficielle. Sa grande valeur conduit à de grands courants et à de grandes charges véhiculées par le filet [9].

Ces charges ($C.d_u$) ne dépendent pas de la vitesse de variation de la tension (d_u/d_t) et, en conséquence, cette vitesse n'a pas d'influence sur la tension d'apparition des

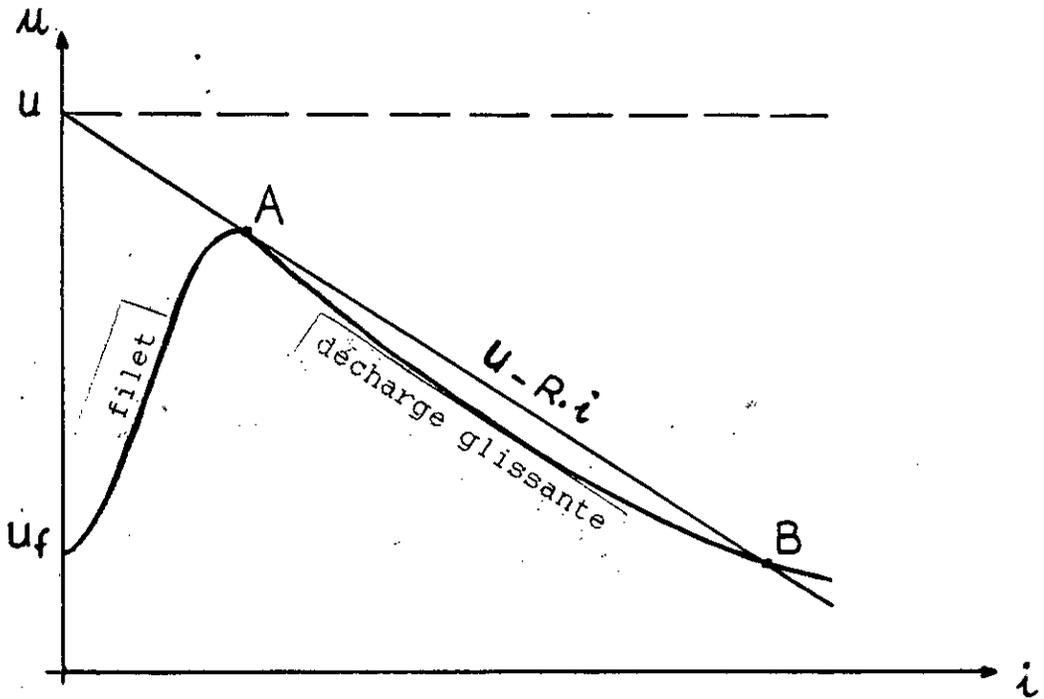


Figure 8: Caractéristique $u-i$ des décharges glissantes

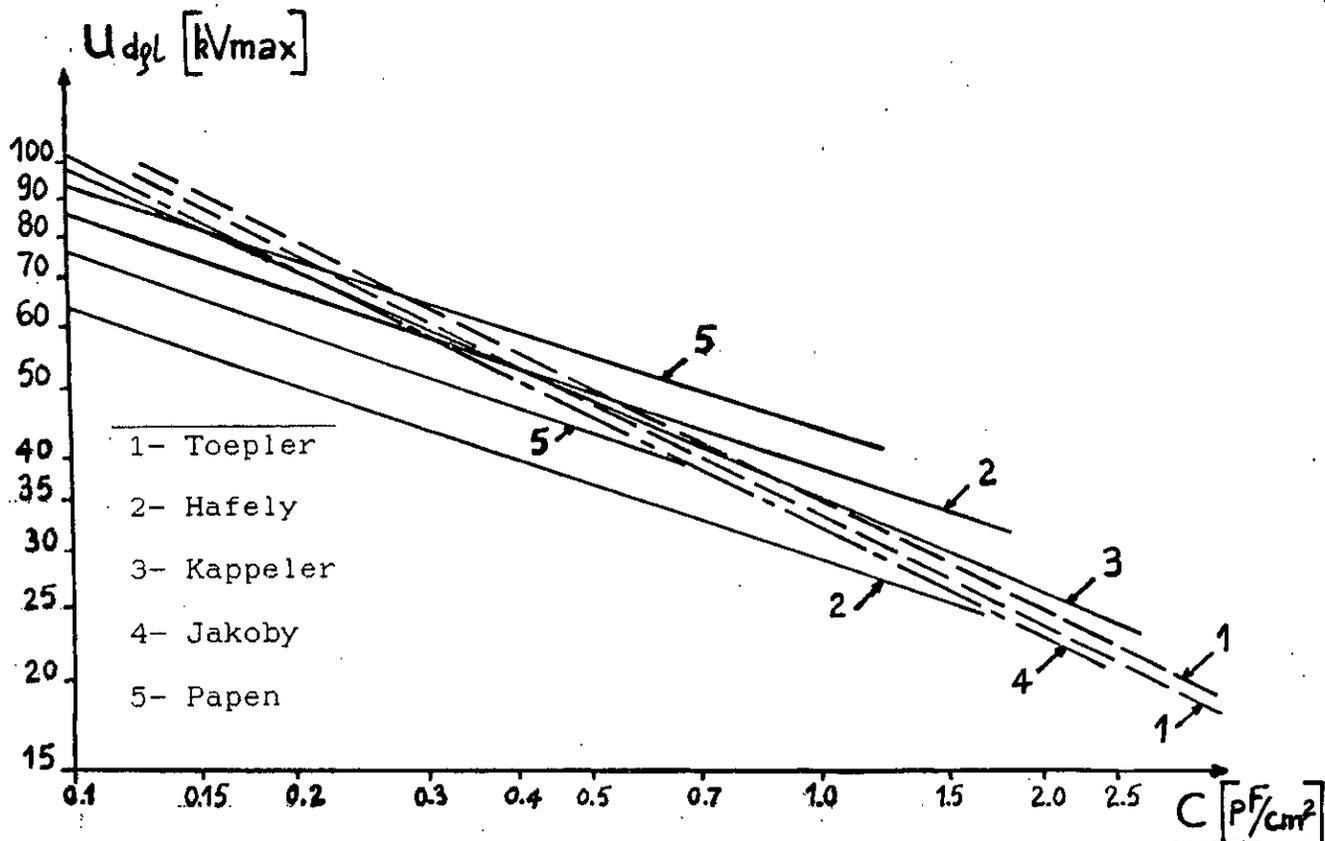


Figure 9: Tension d'apparition des décharges glissantes en fonction de la capacité spécifique superficielle (valeurs minimales et maximales)

décharges glissantes (d'après TOEPLER) [9].

2.3.2. Tension d'apparition des décharges glissantes:

Les travaux théoriques les plus remarquables sur les décharges glissantes, débouchant sur des applications pratiques, ont été menés par M.TOEPLER. Jusqu'à nos jours, ces travaux ont servi de base pour les recherches ultérieures.

Le résultat principal des recherches de M.TOEPLER est sa formule donnant la tension d'apparition des décharges glissantes, dont l'expression générale est la suivante:

$$U_{ag1} = k * C^{-0.5} \quad [kV, F/cm^2] \quad (1)$$

Où K est une constante dépendant de la polarité de l'électrode active et C représente la capacité superficielle spécifique du système étudié. TOEPLER a obtenu empiriquement cette expression lors de recherches sur des modèles plans, il a utilisé des plaques en verre de différentes épaisseurs dont la capacité C varie entre 0.3 et 3.1 pF/cm² [9].

E.HAFELY, E.HUETER, K.KAPPELER, A.ROTH, JAKOBY, H.PAPEN, partant de la formule (1) ont obtenu leurs propres formules dont la forme est:

$$U_{ag1} = K * C^{-n} \quad (2)$$

Les constantes K et n varient selon les auteurs. H.PAPEN a établi un diagramme (figure 9) comparant les résultats obtenus, en utilisant les différentes formules. On peut

constater que les divergences sont assez importantes. cela retire à la formule son importance pratique, sans diminuer en autant sa valeur théorique [9].

Une des principales causes des différences entre ces formules est due aux méthodes très diverses employées pour la constatation de l'apparition des décharges glissantes. On emploie des méthodes optiques (visuelles ou photographiques) et acoustiques (constatation de bruits caractéristiques). Ce sont surtout les méthodes visuelles qui donnent lieu à de telles divergences. Ce point de vue se trouve confirmé par l'analyse de G. NEUMARKER [11]. Cet auteur distingue trois phases dans la formation de la décharge glissante :

Phase 1: manche de quelques millimètres de longueur. Cette phase correspond à un courant d'injection de 6 à 8 nC dans la décharge préliminaire (filet).

Phase 2: manche ayant à sa tête plusieurs filets (10 à 15 nC)

Phase 3: manche plus long avec plusieurs branches (100 à 200 nC). D'après NEUMARKER, c'est cette phase qui devrait servir aux techniciens comme définition de la tension d'apparition de la décharge glissante. Cette dernière est bien visible sous la forme d'un arbre lumineux en miniature.

La tension d'amorçage (ou d'apparition) des décharges glissantes dépend de tous les facteurs pouvant avoir une influence, sur la répartition de la tension le long de la surface du diélectrique solide. Dans les cas pratiques (décharges atmosphériques, surtensions d'origine interne), l'influence de la forme d'onde sur la tension d'apparition

des décharges glissantes n'est pas essentielle. Les formules du type de celle de TOEPLER ne contiennent pas de paramètre lié à la variation de la tension dans le temps. Par contre, il existe une influence de la polarité, dans le cas d'une onde de choc [9].

D'après ce qui précède, on peut dire que la tension d'apparition des décharges glissantes dépend de la capacité superficielle spécifique, mais les formules contenant ce paramètre ne sont pas assez générales pour être employées dans la technique de la haute tension [9].

Le mécanisme des décharges discuté jusqu'à présent concerne les surfaces propres des diélectriques solides. En cas de dépôts sur ces surfaces, ce mécanisme sera, sans doute, valable dans certaines limites caractérisant les dépôts [9].

C H A P I T R E 3

LES PHENOMENES DE POLLUTION ET LEURS CONSEQUENCES SUR LE TRANSPORT DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

Les lignes aériennes et les postes du réseau de transport de l'énergie électrique, installés dans les régions où la pollution atmosphérique est importante, peuvent être sujets à des incidents graves dus aux contournements des surfaces isolantes polluées [12].

En effet, dans un environnement naturel, des dépôts d'origines diverses (poussières, fumées, sel, etc...) se fixent sur les surfaces isolantes et abaissent considérablement par temps de pluie fine ou de brouillard, la résistivité superficielle des surfaces isolantes. Des courants de fuite circulent sur les surfaces isolantes et provoquent des assèchements locaux de la couche polluante et l'apparition d'arcs partiels. Dans certains cas, la conductivité de cette couche polluante est telle que les arcs se développent jusqu'à provoquer le contournement total des surfaces isolantes et la mise hors service de l'installation [12].

Il convient donc de connaître les différents phénomènes de pollution et les mécanismes de contournement des surfaces isolantes, de mesurer et de quantifier la sévérité de pollution des différents sites, afin de prévenir de tels incidents par un choix judicieux de l'isolement des ouvrages

de haute tension en régions polluées.

3.1. PHENOMENES DE POLLUTION:

3.1.1. Formation des couches polluantes:

Suite à l'écoulement en présence d'humidité, d'un air transportant des poussières diverses et à l'obstacle formé par les surfaces isolantes, une couche de pollution s'y développe.

De nombreuses observations ont montré que la répartition de la couche polluante le long des surfaces isolantes n'est pas uniforme. En général, la couche de pollution se concentre dans les zones où le champ électrique, est le plus intense, ainsi que dans les parties les mieux protégées contre les facteurs d'auto-nettoyage (vents forts, pluie, etc...).

3.1.2. Différents types de pollution:

Les principales sources de pollution de l'atmosphère sont naturelles, industrielles ou mixtes (combinées). La pollution naturelle provient des dépôts :

- des sels marins dans les régions côtières
- de poussières du sol (notamment lors de chantiers importants)
- de sable véhiculé par le vent en régions désertiques

Dans les ouvrages (lignes ou postes) installés en bordure de mer, les embruns emportés par le vent déposent progressivement sur les surfaces isolantes une couche de sel

qui, à plus ou moins longue échéance, recouvre toute la surface de l'isolant y compris les parties les mieux protégées. Cette couche de sel humidifiée par les embruns eux-mêmes, par un brouillard ou simplement par condensation, devient conductrice. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche polluante et des arcs peuvent prendre naissance dans certaines conditions, et se développer jusqu'à provoquer le contournement total de la surface isolante [12].

Au voisinage des usines métallurgiques, chimiques ou même aux abords des centrales thermiques, les surfaces isolantes se recouvrent de poussières faiblement conductrices, mais très hygroscopiques. Dans des conditions de forte humidité (brouillard, pluie, condensation matinale, etc...), la dissolution des sels contenus dans cette poussière provoque la formation d'une couche électrolytique. Les gaz présents dans les fumées absorbées par la couche liquide en augmentent encore la conductivité. Comme dans le cas de la pollution marine, un courant de fuite circule dans la couche superficielle et le contournement peut parfois survenir [12].

La pollution mixte résulte de la combinaison des pollutions: naturelle et industrielle. Ce type de pollution est le plus nocif pour l'exploitation des réseaux de haute tension.

Quelle que soit la source de pollution, on observe donc la formation d'une couche électrolytique due à

l'humidification d'un dépôt solide accumulé progressivement à la surface de l'isolant. Il importe de remarquer que par suite du lavage périodique des dépôts par la pluie, on atteint après une période d'exposition plus ou moins longue une "pollution limite" propre à chaque site, elle dépend entre autre de l'intensité de la pollution atmosphérique, de l'adhérence des poussières, de la fréquence de la pluie, etc... .

3.2. CONSEQUENCES DE LA POLLUTION:

Les couches polluantes qui s'accumulent sur les surfaces isolantes provoquent une conductivité superficielle qui modifie la répartition du potentiel le long de la surface isolante. Suivant les conditions atmosphériques (pluie fine, brouillard, etc...), la tension de rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante, entraînant l'amorçage d'un arc électrique.

3.2.1 Arcs non localisés:

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorce à un autre endroit et ainsi de suite. Il y a apparition de courants de fuite entraînant une petite perte d'énergie généralement supportable par l'installation [13].

3.2.2. Arc fixe:

L'arc électrique se fixe sur la surface, soit en s'y maintenant (courant continu), soit en se réamorçant au même

endroit (courant alternatif). L'arc peut entraîner par effet thermique, la dégradation de la surface isolante [13].

3.2.3. Contournement des surfaces isolantes polluées:

3.2.3.1. Définitions:

* Tension de contournement:

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas à partir duquel tous les arcs joignent les deux électrodes. Elle dépend :

- de la résistivité moyenne de la pollution
- de la répartition de la couche de pollution
- du profil des surfaces isolantes.

* Courant de fuite:

Le courant de fuite est un courant de faible amplitude, circulant à travers la couche polluante le long de la surface isolante. Son intensité devient considérable lorsque cette couche est humidifiée, la dissolution des sels contenus dans la couche polluante provoque la formation de la couche électrolytique [14].

* Courant de fuite critique:

Le courant de fuite critique est le courant minimal nécessaire pour provoquer un contournement. Sa valeur est obtenue dans la dernière demi-période avant le contournement [15].

* Longueur critique de l'arc:

La longueur critique de l'arc représente la longueur limite de l'arc partiel qui peut encore s'éteindre. Cette longueur est approchée aux $2/3$ de la longueur de fuite totale [15].

3.2.3.2. Contournement électrique:

L'arc électrique s'allonge le long de la surface isolante jusqu'à court-circuiter l'intervalle inter-electrodes. c'est le phénomène de contournement électrique qui entraîne la mise en défaut de la ligne.

3.3. CARACTERISATION DU DEGRE DE POLLUTION D'UN SITE:

Afin d'être en mesure de dimensionner convenablement l'isolement susceptible d'assurer un service sans défaillance dans un site pollué, il est nécessaire de caractériser quantitativement la sévérité de pollution de ce site. Plusieurs méthodes ont été proposées pour caractériser cette sévérité. Elles sont pour la plupart basées sur la détermination expérimentale de la conductivité superficielle de la couche polluante [16].

En se référant à l'essai sous pollution saline artificielle, il est possible de caractériser plus simplement et avec une meilleure précision la sévérité de pollution d'un site. Cet essai nous permet, en choisissant convenablement la concentration de la pollution pulvérisée de reproduire en laboratoire une couche polluante électriquement identique à

celle qui se forme dans un site pollué. A chaque site, on pourra donc faire correspondre une concentration de la solution saline que l'on exprimera par exemple en grammes de chlorure de sodium par litre de solution. La sévérité de la pollution d'un site sera ainsi caractérisée par une "salinité équivalente" [12].

3.3.1. Méthode de la densité de dépôt de sel équivalent:

3.3.1.1. Définition:

La densité de dépôt de sel équivalent est le dépôt équivalent exprimé en mg de NaCl/cm² de surface isolante, ayant une conductivité équivalente égale à un dépôt polluant réel dissous dans la même quantité de solution.

3.3.1.2. Description:

Des échantillons sont prélevés sur des surfaces isolantes témoins, par lavage, en utilisant un matériau absorbant (coton, etc...) et de l'eau distillée. Le dépôt est distillé dans une quantité de solution connue. La conductivité de la solution obtenue permet de déterminer la salinité équivalente. Les mesures doivent être répétées avec une fréquence suffisante afin d'obtenir les niveaux maximaux entre les périodes de lavage naturel.

3.4. METHODES D'ESSAIS:

3.4.1. Essais dans les conditions naturelles:

On installe dans différents sites pollués des stations

dans lesquelles on observe le comportement d'un certain nombre de surfaces isolantes de dimensions ou de profils différents. Les qualités respectives de ces surfaces isolantes soumises à une même tension sont appréciées en se basant sur le courant de fuite ou sur la conductivité superficielle [14].

3.4.1.1. Essais basés sur le courant de fuite:

Le fait de pouvoir utiliser le courant de fuite comme critère caractérisant le degré de pollution ainsi que comme annociateur d'un risque de contournement imminent pour la surface isolante, provient principalement de la corrélation existant entre ce courant et la tension de contournement sous pollution [12].

Néanmoins la valeur critique de ce courant mesuré sous la tension de contournement ne dépend pas uniquement de la sévérité de pollution, mais aussi de la forme et de la tension appliquée à la surface isolante [12].

Le courant de fuite peut être divisé en trois niveaux: la zone normale, la zone d'avertissement et la zone de risque. Cette dernière est caractérisée par des courants de fuite pouvant engendrer le contournement. L'état du courant de fuite dans la zone d'avertissement est non stationnaire. Il apparaît souvent sous la forme de groupes d'impulsions correspondants à l'apparition et à l'extinction d'arcs partiels. La valeur de ces impulsions de courant dans cette zone est généralement de quelques dizaines à une centaines de

micro-ampères [17].

3.4.1.2. Essais basés sur la conductivité superficielle:

La résistivité superficielle d'une surface isolante peut être déterminée par la mesure de la résistance de fuite, entre deux électrodes en métal, de l'objet en essai. La conductivité superficielle est prise égale à l'inverse de la résistance de fuite, multiplié par un facteur dépendant de la forme géométrique de la surface isolante [18].

3.4.2. Méthodes d'essais sous pollution artificielle:

La pollution étant un phénomène à évolution lente puisque dû à une accumulation progressive de dépôts, plusieurs années étaient nécessaires pour pouvoir comparer valablement les performances des surfaces isolantes essayées sur site. Ce délai étant jugé trop long, à juste titre d'ailleurs, on a rapidement cherché à reproduire en laboratoire les conditions de la pollution naturelle, ce qui devait permettre d'obtenir des résultats et effectuer des comparaisons plus rapidement, plus facilement et à moindre coût que dans les stations sur site. Ainsi différentes méthodes d'essais en laboratoire furent proposées [12].

3.4.2.1. Méthode du brouillard salin:

La surface isolante est alimentée sous sa tension de service, maintenue constante durant tout l'essai, et est soumise à un brouillard salin (chlorure de sodium et eau)

sans adjonction de liant. Le degré de salinité exprimé en kg de sel/m³ de solution, définit le paramètre de sévérite. Les valeurs de salinité appliquées, en référence aux conditions de pollution sont choisies selon une progression allant de 2.5 à 160 kg/m³ [18].

3.4.2.2. Méthodes des couches solides:

Dans ces méthodes, la surface isolante est recouverte par pulvérisation d'une couche de pollution solide constituée de chlorure de sodium et d'un agent liant inerte ou presque. La tension est appliquée après stabilisation de la couche polluante. Si l'humidification s'effectue après application de la tension (méthode du brouillard à vapeur), le paramètre de sévérite est défini par la densité de dépôt de sel en mg/cm². Si l'humidification a lieu avant l'application de la tension, le paramètre de sévérite est défini par la conductivité de la couche polluante [18].

Dans certains cas, la couche solide est constituée d'une peinture semi-conductrice [19].

3.4.2.3. Analyse des méthodes d'essais sous pollution artificielle:

La solution saline utilisée dans la méthode du brouillard salin représente assez bien la pollution marine contenant un peu de matière insoluble. Elle est également valable pour représenter de nombreux dépôts de pollution industrielle ayant une couche de pollution relativement mince.

Les méthodes des couches solides simulent mieux les dépôts de pollution industrielle tels que les cendres de charbon et ciment, ce type de couches pouvant contenir des quantités d'eau relativement importantes.

La méthode du brouillard salin a l'avantage, par rapport aux méthodes de la couche solide, d'une bonne reproductibilité et d'une grande facilité de mise en oeuvre. La validité de cette méthode a été vérifiée dans un certain nombre de régions côtières. On a également trouvé une corrélation satisfaisante avec les résultats obtenus dans les conditions naturelles de pollution industrielle [20].

CHAPITRE 4

ETUDE EXPERIMENTALE

Afin de mettre en évidence, au laboratoire, l'influence de la pollution sur les extrémités de câbles de haute tension, nous avons utilisé un dispositif expérimental simple qui nous facilite les observations et les mesures nécessaires. Dans un premier temps, nous avons étudié le phénomène de décharges glissantes, puis par la suite, l'influence de la pollution sur la tension de contournement des surfaces isolantes.

Dans ce chapitre, nous présenterons les circuits d'essais et de mesure, ainsi que les essais effectués et les résultats obtenus.

4.1. MODELE EXPERIMENTAL:

Le modèle utilisé dans cette étude est le modèle "plan" de TOEPLER (figure 10). Ce modèle est constitué d'une plaque de diélectrique solide placée entre deux électrodes planes, l'une circulaire de petite dimension (électrode active), l'autre carrée de grande dimension (contre électrode).

Les isolants solides utilisés, sont des échantillons de Polychlorure de Vinyle (PVC) et d'Ethylène-Propylène-Diène Modifié (EPDM), fournis par la Cablerie (ENICAB) du Gué de Constantine. Ces échantillons sont de forme carrée de côtés variables de 8 à 24 cm et d'épaisseurs: 1.6 et 5.5 mm pour le

PVC, 2.4 et 5.5 mm pour l'EPDM.

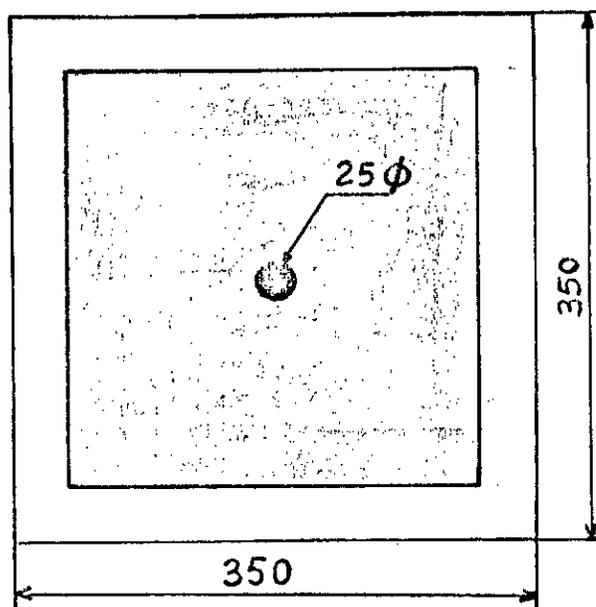
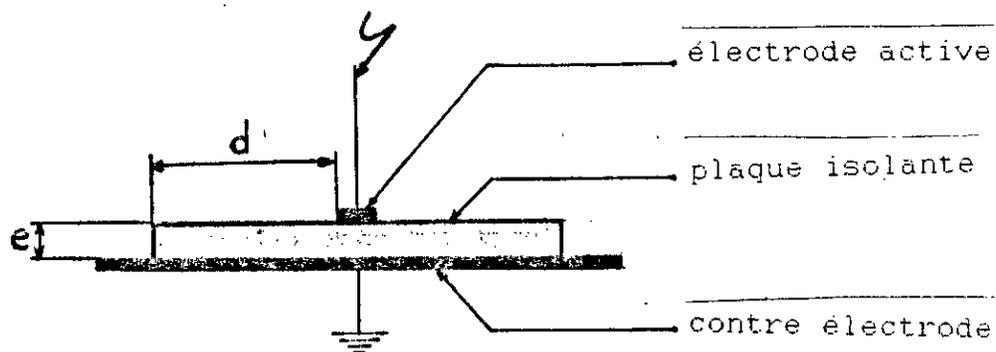


Figure 10: Modèle expérimental

* Caractéristiques électriques des échantillons:

Des essais de mesure de la constante diélectrique ϵ_r , du facteur de pertes diélectriques $\text{tg}\delta$, et de la capacité C , ont été effectués à l'ENICAB sur des échantillons de plaques identiques à celles utilisées lors des essais. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 1.

Isolant	PVC		EPDM	
e (mm)	1.60	5.50	2.40	5.50
ϵ_r	5.50	5.85	3.35	3.46
$\text{tg}\delta (*10^{-3})$	64.0	54.5	5.40	4.46
C (pF/cm ²)	3.05	0.95	1.24	0.56

Tableau 1: Caractéristiques électriques des diélectriques utilisés

4.2. ESSAIS SUR DES SURFACES PROPRES ET SECHES:

4.2.1. Circuit d'essais:

Les essais ont été effectués au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (ENPA). L'équipement de la station d'essais à fréquence industrielle comprend les éléments suivants (Figure 11):

- 1- Interrupteur d'alimentation générale
- 2- Contacteur d'alimentation du pupitre de commande
- 3- Transformateur de réglage
- 4- Transformateur d'essais
- 5- Voltmètre de mesure de la haute tension

6- Contacteur d'alimentation du transformateur d'essai.

7- Objet d'essais.

Le transformateur d'essais (4) est alimenté en tension variable par un transformateur de réglage (3) incorporé dans le pupitre de commande. La mesure de la tension est faite à l'aide du voltmètre (5) branché aux bornes du primaire du transformateur de haute tension.

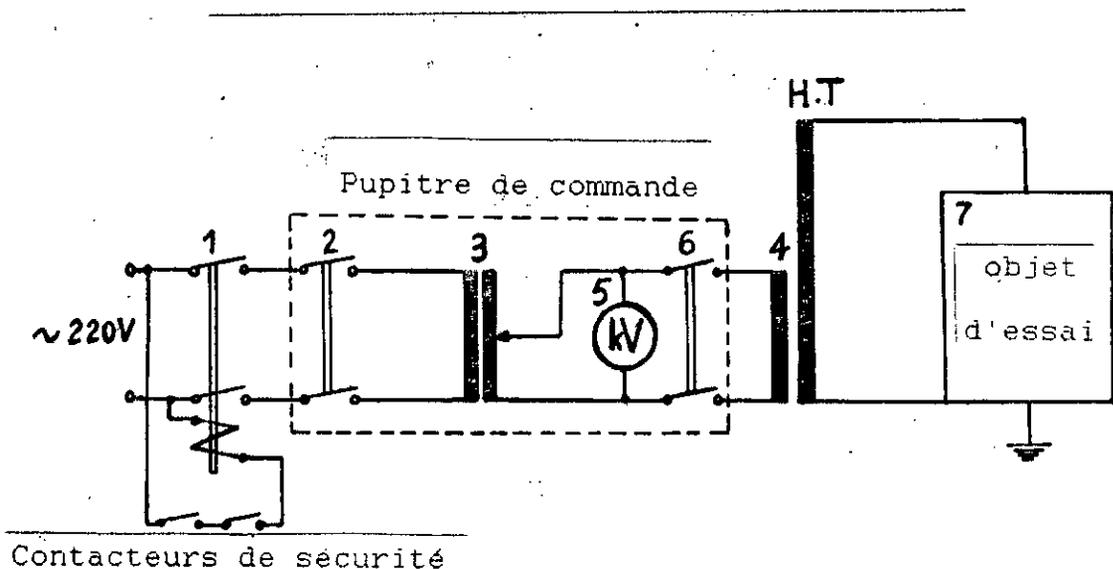


Figure 11: Circuit d'essais (ENPA)

4.2.2. Mode opératoire:

* Réalisation du modèle:

Avant chaque essai, la plaque isolante doit être initialement bien lavée et séchée, puis imbibée d'une façon uniforme de "gaz-oil" dans les endroits d'emplacement des

électrodes en papier d'aluminium, de manière à ce qu'aucun espace d'air ne reste entre la plaque isolante et les électrodes. Par la suite, la plaque est essuyée avec du coton imbibé de trichloro-éthylène, pour éliminer toute trace de "gaz-oil" sur la surface isolante. Le modèle est disposé horizontalement sur un support en bois, placé à une hauteur d'environ 1m au dessus du sol.

* Application de la tension et mesure de la tension d'apparition des décharges glissantes:

Pour pouvoir observer l'apparition des décharges glissantes, l'obscurité totale est nécessaire. La tension d'essai est appliquée d'une manière progressivement croissante, jusqu'à la constatation de bruits caractérisant la décharge et/ou de décharges en forme d'un arbre lumineux qui s'amorce et s'éteint. Le niveau de tension ainsi atteint correspond à l'apparition des décharges glissantes. Par la suite, la tension est augmentée jusqu'au contournement.

La tension d'apparition des décharges glissantes, peut être calculée à l'aide de formules empiriques telles que celles établies par M.TOEPLER [21] et JAKOBY [9].

4.2.3. Essais:

Il s'agit de relever pour différents intervalles inter-électrodes, les tensions d'apparition des décharges glissantes, et de contournement. Cinq mesures ont été effectuées pour chaque intervalle. Avant l'application de la

tension. on s'assure que la plaque ne présente aucune trace ou fissure due à la décharge

* Phénomènes observés:

- Lors des essais, nous avons pu distinguer les différentes phases de la décharge citées dans le chapitre 2, à savoir: apparition de l'effet couronne, filet lumineux, décharge glissante et décharge complète (contournement).

- Pour les petits intervalles inter-électrodes, le contournement se produit subitement, sans que nous puissions observer l'apparition des décharges glissantes.

- Après les essais, les plaques isolantes ne présentent pas de traces de décharges bien visibles, à l'exception de certaines plaques de PVC, sur lesquelles des traces sont observées au voisinage de l'électrode active. Ceci est dû au champ élevé à cet endroit, et à la chaleur dégagée par la décharge.

- Lors d'un essai sur une plaque de PVC, un claquage s'est produit au voisinage de l'électrode active.

* Résultats des essais:

Les essais ont été effectués à fréquence industrielle (50Hz), dans les conditions ambiantes du laboratoire. La température, la pression et le degré hygrométrique se situaient respectivement entre 17 et 18°C, 766 et 768 mm Hg, 72 et 75% .

Les résultats que nous présentons dans les tableaux 2 et 3, sont ramenés aux conditions normales de température et de pression, selon les recommandations de la CEI-60 [22].

d (cm)	U_{ag1} (kVeff)	$U_{ag1} \pm \sigma_{ag1} * t / \sqrt{n}$ (kVeff)	U_e (kVeff)	$U_e \pm \sigma_e * t / \sqrt{n}$ (kVeff)
02.75	18.7	18.7±1.2	18.7	18.7±1.2
04.75	19.1	19.1±0.4	22.6	22.6±0.5
06.75	18.2	18.2±0.5	24.1	24.1±0.9
08.75	20.0	20.0±0.6	28.2	28.2±0.5
10.75	18.2	18.2±1.0	30.0	30.0±0.5

(a)

d (cm)	U_{ag1} (kVeff)	$U_{ag1} \pm \sigma_{ag1} * t / \sqrt{n}$ (kVeff)	U_e (kVeff)	$U_e \pm \sigma_e * t / \sqrt{n}$ (kVeff)
02.75	22.2	22.2±0.5	22.2	22.2±0.5
04.75	23.7	23.7±1.6	28.7	28.7±2.0
06.75	24.8	24.8±0.7	33.2	33.2±1.5
08.75	24.3	24.3±1.6	36.2	36.2±0.9
10.75	23.6	23.6±1.3	38.7	38.7±1.2

(b)

Tableau 2: Résultats d'essais sur des surfaces propres et sèches d'EPDM

(a): e = 2.4 mm

(b): e = 5.5 mm

d (cm)	U_{ag1} (kVeff)	$U_{ag1} \pm \sigma_{ag1} * t / \sqrt{n}$ (kVeff)	U_c (kVeff)	$U_c \pm \sigma_c * t / \sqrt{n}$ (kVeff)
02.75	11.8	11.8±0.3	14.6	14.6±0.4
04.75	12.3	12.3±0.9	19.5	19.5±0.6
06.75	12.4	12.4±0.5	21.7	21.7±0.7
08.75	12.5	12.5±0.6	24.9	24.9±0.6
10.75	13.1	13.1±0.6	27.9	27.9±1.0

(a)

d (cm)	U_{ag1} (kVeff)	$U_{ag1} \pm \sigma_{ag1} * t / \sqrt{n}$ (kVeff)	U_c (kVeff)	$U_c \pm \sigma_c * t / \sqrt{n}$ (kVeff)
02.75	15.9	15.9±0.9	19.8	19.8±1.1
04.75	16.0	16.0±1.0	25.4	25.4±0.7
06.75	15.7	15.7±1.0	30.0	30.0±0.7
08.75	15.7	15.7±0.9	32.6	32.6±0.9
09.75	15.7	15.7±0.9	34.2	34.2±0.7

(b)

Tableau 3: Résultats d'essais sur des surfaces propres et sèches de PVC

(a): e = 1.6 mm

(b): e = 5.5 mm

Où:

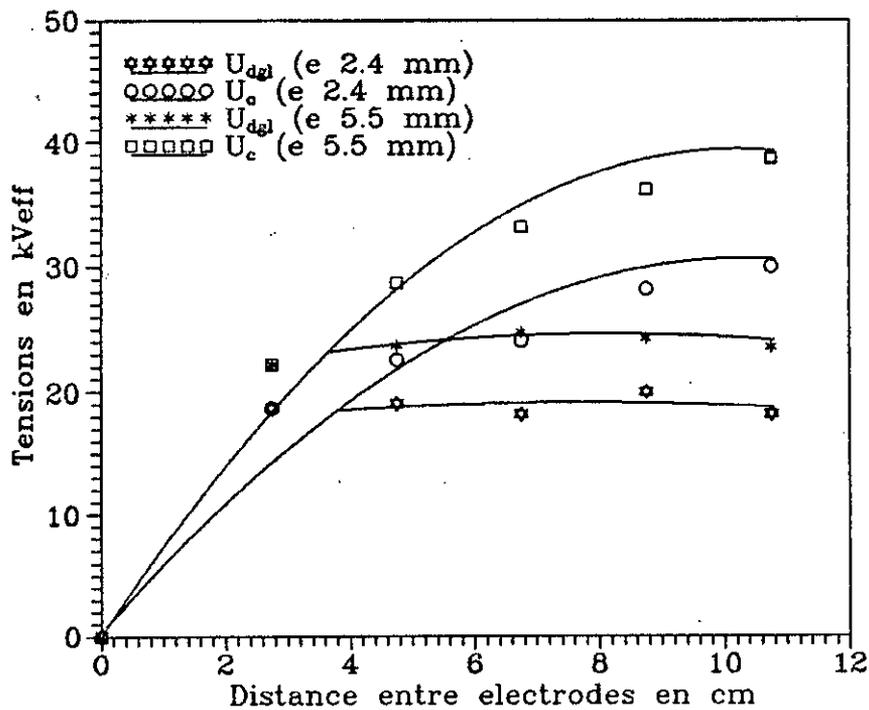
d: distance inter-électrodes (figure 10)

U_{ag1} , valeur moyenne de la tension d'apparition des décharges glissantes

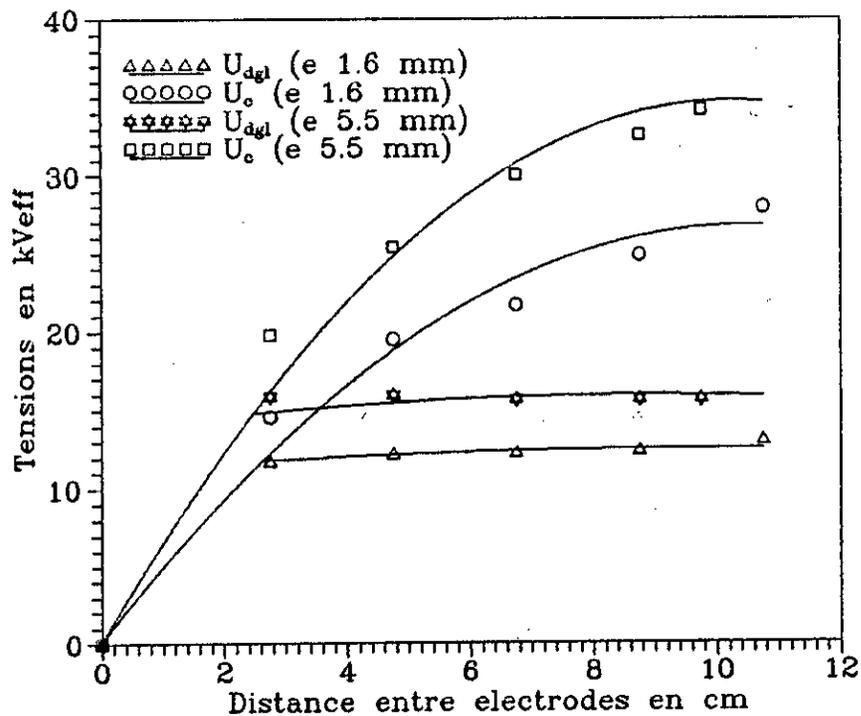
U_c : valeur moyenne de la tension de contournement

$U \pm t/\sqrt{n}$: intervalle de confiance à 95% de la tension U , où σ est l'écart type relatif à la tension considérée, et $t/\sqrt{n}=1.24$ du fait que nous avons effectué 5 mesures pour chaque intervalle.

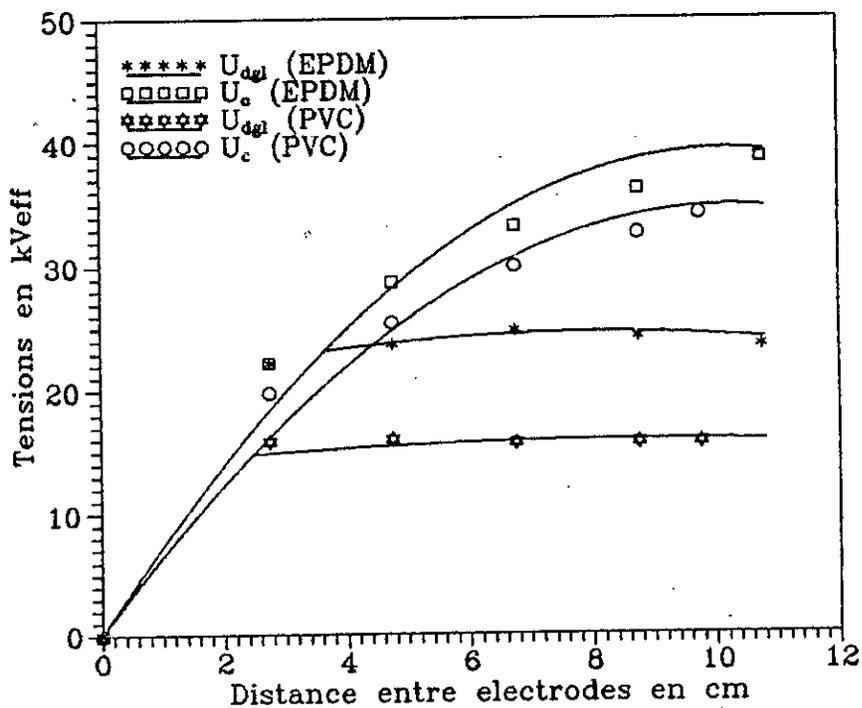
Les courbes correspondantes aux résultats présentés dans les tableaux 2 et 3 sont représentées dans les figures 12, 13 et 14.



Figure(12) : Variations des tensions d'apparition des décharges glissantes et de contournement des plaques d'EPDM en fonction de la distance entre électrodes.



Figure(13) : Variations des tensions d'apparition des décharges glissantes et de contournement des plaques de PVC en fonction de la distance entre electrodes.



Figure(14) : Variations des tensions d'apparition des décharges glissantes et de contournement des plaques de 5.5 mm d'épaisseur en fonction de la distance entre electrodes.

* Calcul de la tension d'apparition des décharges glissantes à l'aide de formules empiriques:

Les formules utilisées sont:

- D'après TOEPLER [21] :

$$U_{ag1} = 25.8 * C^{-0.44} \quad [\text{kVeff. pF/cm}^2] \quad (3)$$

- D'après JAKOBY [9] :

$$U_{ag1} = 3.43 * 10^{-5} * C^{-0.5} \quad [\text{kVmax. F/cm}^2] \quad (4)$$

Où C représente la capacité superficielle spécifique du système étudié. dans notre cas (système plan), la capacité C est donnée par :

$$C = \epsilon / e \quad (5)$$

où :

- e est l'épaisseur du diélectrique solide en cm

- ϵ est la permittivité du diélectrique solide

$$\epsilon = \epsilon_0 * \epsilon_r ; \quad \epsilon_0 = 8.859 * 10^{-14} \quad [\text{As/cm}]$$

D'après les formules empiriques (3 et 4), la tension d'apparition des décharges glissantes est indépendante de la distance entre-électrodes.

Dans le tableau 4, nous présentons simultanément les tensions d'apparition des décharges glissantes calculées à l'aide des formules empiriques (3 et 4) et celles obtenues expérimentalement.

isolant	PVC		EPDM	
	e (cm)	0.16	0.55	0.24
C (pF/cm ²)	3.05	0.95	1.24	0.56
U _{ag1} (kVeff) /3/	15.8	26.4	23.5	33.3
U _{ag1} (kVeff) /4/	13.9	24.9	21.8	32.4
U _{ag1moycal} (kVeff)	14.8	25.6	22.6	32.8
U _{ag1moyexp} (kVeff)	12.4	15.8	18.8	23.7

Tableau 4: Tensions d'apparition des décharges glissantes

* Interprétations:

- Pour de faibles distances entre-électrodes, le contournement se fait sans qu'il ait apparition des décharges glissantes. Plus la distance inter-électrodes augmente, plus la tension de contournement augmente. Au delà d'une certaine distance entre-électrodes, la tension d'apparition des décharges glissantes reste pratiquement constante, alors que la tension de contournement augmente de plus en plus.

- Pour une même distance entre-électrodes, plus l'épaisseur du diélectrique est importante, plus les tensions d'apparition des décharges glissantes et de contournement sont élevées. Car, pour un même diélectrique, la capacité superficielle spécifique augmente, quand l'épaisseur diminue (formule 5).

- Pour une même épaisseur du diélectrique, les tensions d'apparition des décharges glissantes et de contournement de l'EPDM sont supérieures à celles du PVC, du fait que la permittivité du PVC est supérieure à celle de l'EPDM (tableau 1), et par conséquent la capacité superficielle spécifique du PVC est supérieure à celle de l'EPDM.

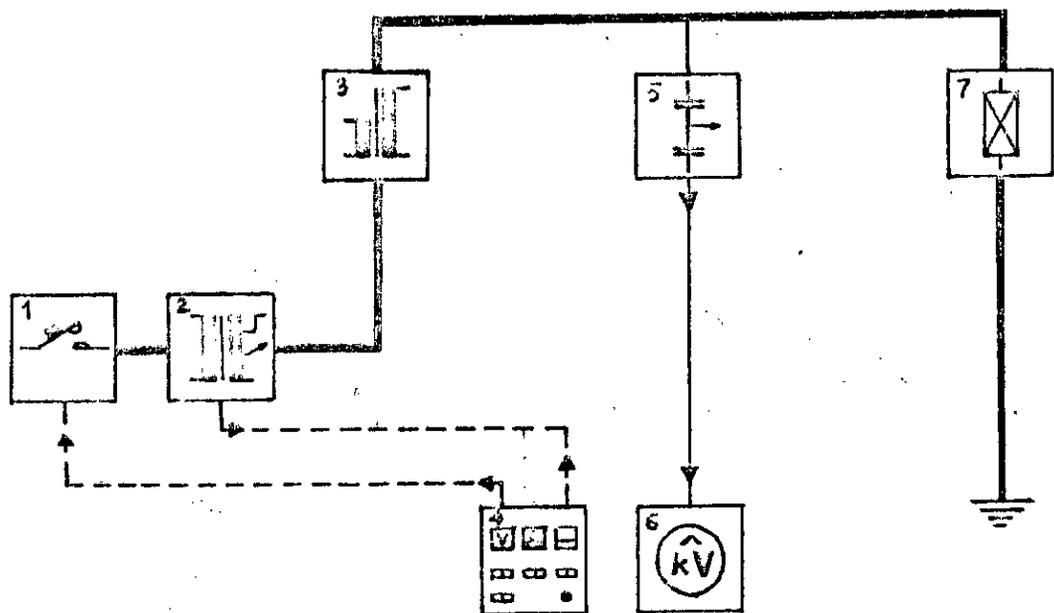
- Les tensions d'apparition des décharges glissantes calculées à l'aide des formules empiriques sont supérieures à celles mesurées. Elles sont comparables dans le cas des petites épaisseurs.

4.3. ESSAIS SUR DES SURFACES POLLUEES:

4.3.1. Circuit d'essai:

Les essais de contournement à 50 Hz des surfaces polluées, ont été effectués au Laboratoire de Haute Tension de la Cablerie (ENICAB) du Gué de Constantine. Le circuit d'essai est représenté à la figure 15.

Suite à la défaillance du circuit de mesure de tension (voltmètre de crête), nous avons procédé à l'étalonnage du circuit de mesure de tension pour assurer sa mise en marche, et effectuer nos essais.



- 1- Disjoncteur
- 2- Transformateur de réglage
- 3- Transformateur d'essais
- 4- Pupitre de commande
- 5- Diviseur de tension capacitif
- 6- Voltmètre de crête
- 7- Objet d'essais

Figure 15: Circuit d'essai (ENICAB)

* Etalonnage du circuit de mesure de tension:

Pour déterminer le rapport de transformation du transformateur d'essais, nous avons utilisé un éclateur à sphères de 6.25 cm de diamètre et un voltmètre, placés

respectivement au secondaire et au primaire du transformateur d'essais.

Pour chaque distance entre-électrodes, on mesure la tension disruptive au primaire. La tension au secondaire est donnée selon les recommandations de la CEI-52 [23], dans les conditions normales de température et de pression. Nous avons obtenu les résultats présentés dans le tableau 5.

a (cm)	U_{mp} (V)	$U_{mp} \pm \sigma_{mp} * t / \sqrt{n}$ (V)	U_{ns} (kV)	U_{ms} (kV)
0.5	8.3	08.3±0.04	12.2	12.4
1.0	16.4	16.4±0.06	22.6	22.9
1.5	23.5	23.5±0.14	32.7	32.7
2.0	26.5	26.5±0.04	41.4	42.0
2.6	34.2	34.2±0.15	50.9	51.7

Tableau 5: Etalonnage du circuit de mesure de la tension

a: distance entre-électrodes

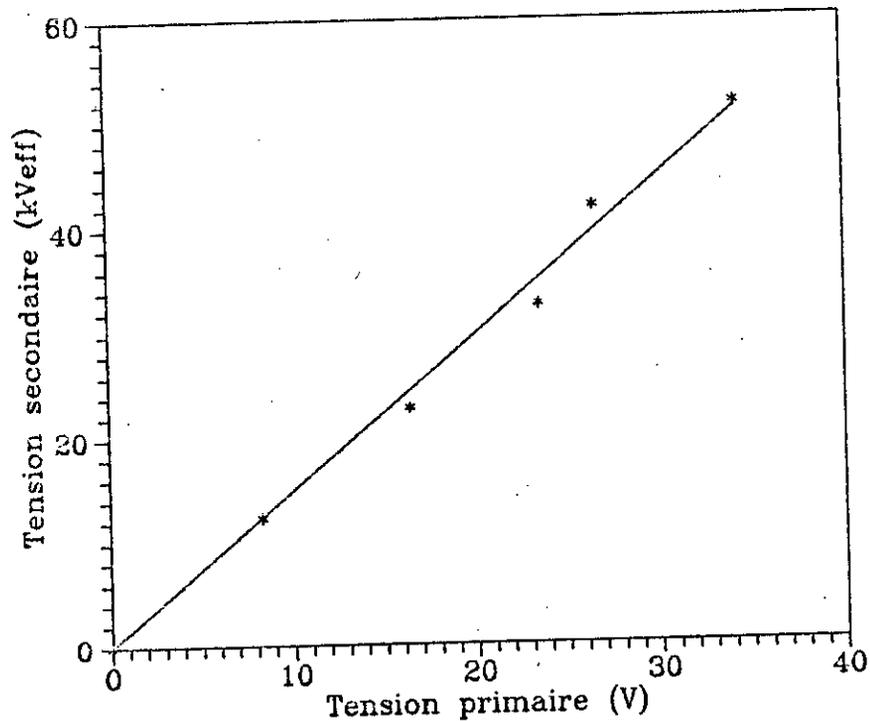
U_{mp} , valeur moyenne de la tension mesurée au primaire

$U_{mp} \pm \sigma_{mp} * t / \sqrt{n}$: intervalle de confiance à 95% où σ_{mp} représente l'écart type relatif aux tensions mesurées et $t / \sqrt{n} = 0.72$, du fait qu'on a effectué 10 essais pour chaque distance inter-électrodes

U_{ns} , tension secondaire donnée selon la CEI-52

U_{ms} , tension secondaire ramenée aux conditions atmosphériques ambiantes.

La figure 16. nous permet de déduire le rapport du transformateur d'essai qui est de 1485.



Figure(16) : Variations de la tension secondaire en fonction de la tension primaire du transformateur d'essai

4.3.2. Mode opératoire:

La préparation du modèle se fait comme précédemment (paragraphe 4-4-2). Par manque de peinture semi-conductrice, du sable saharien est utilisé pour reproduire artificiellement la couche polluante. Deux modes d'application de cette dernière sont envisagés:

- Couche continue:

Dans ce cas, la couche polluante recouvre entièrement la surface isolante.

- Couche discontinue:

Dans ce cas, des couches polluantes de forme circulaire de différentes largeurs circonscrites à l'électrode active, recouvrent partiellement la surface isolante (figure 17). Avant l'application de la tension, la couche de sable est humidifiée uniformément jusqu'à saturation.

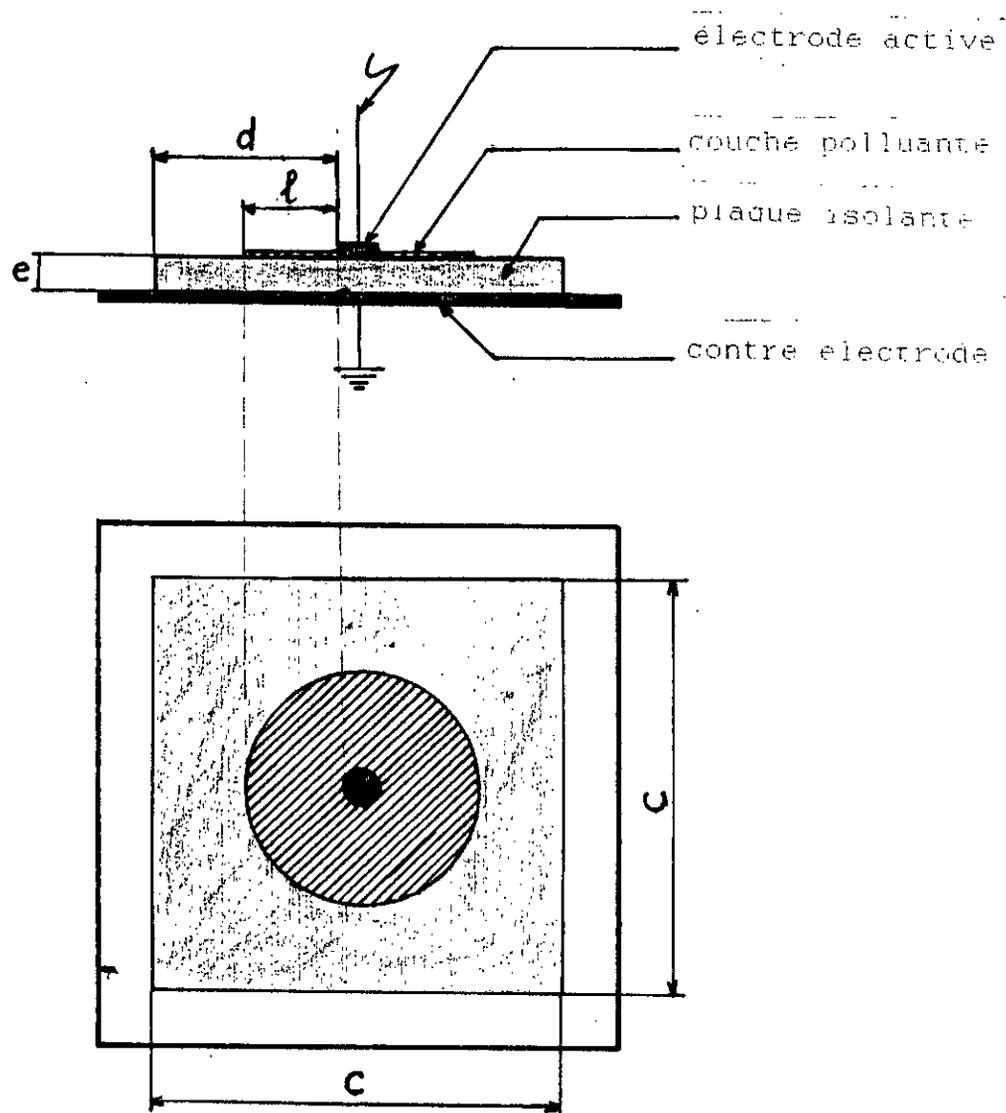


Figure 17: Disposition de la couche polluante

* Mesure de la conductivité de la couche polluante:

Durant ces essais, nous avons essayé de reproduire les mêmes couches polluantes que celles appliquées, lors des essais sous pollution. A cause de l'indisponibilité d'une source de tension continue puissante, on n'a pas pu atteindre le minimum de 20 kV/m de ligne fuite recommandé par la CEI-60 [18]. Nos essais ont été effectués à tension réduite.

La conductivité superficielle est prise égale à l'inverse de la résistance de fuite, laquelle est mesurée à l'aide du circuit représenté à la figure 18 [24].

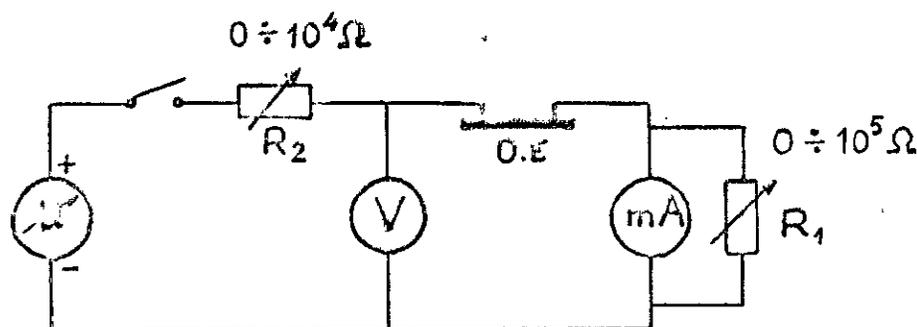


Figure 18: Circuit de mesure de la résistance superficielle (de fuite)

Les plaques utilisées sont similaires à celles utilisées lors des essais sous pollution, et sont munies de deux électrodes planes rectangulaires délimitant la couche polluante appliquée (figure 19).

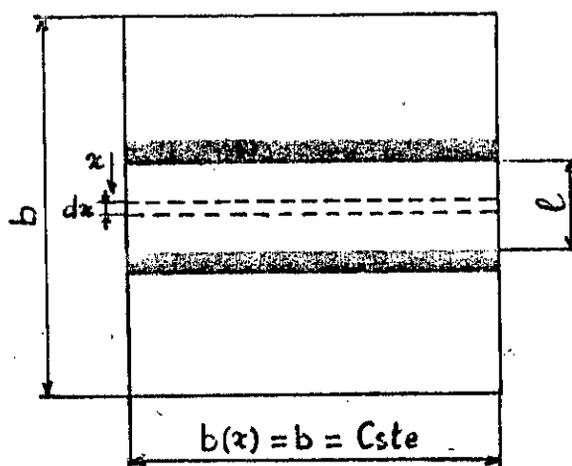


Figure 19: Modèle utilisé (O.E)

$$\gamma_s = \rho_s^{-1} = 1 / R_f * \int_0^l dx / b(x)$$

D'après le modèle:

$$\gamma_s = I/U * 1/b$$

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 6.

isolant	PVC		EPDM	
e (mm)	01.6	05.5	02.4	05.5
l (cm)	16.7	16.7	19.2	14.8
b (cm)	22.0	22.0	24.5	20.0
U (V)	160	165	170	165
I (mA)	4.8	5.0	4.95	4.95
γ_s (μS)	22.7	23.0	22.8	22.2

Tableau 6: Résultats des mesures de la conductivité superficielle

La conductivité superficielle de la couche polluante est indépendante de l'épaisseur et de la nature du diélectrique. Par contre, elle dépend de la nature du sable, et du taux d'humidification de celui-ci.

4.3.3. Essais:

Il s'agit, de relever pour différentes largeurs, de la couche polluante, les tensions de contournement correspondantes des plaques isolantes.

* Phénomènes observés:

Dans le cas de la couche polluante continue, et des couches polluantes discontinues de largeurs proches de la distance entre-électrodes:

- les décharges glissantes sont initialement observées, au niveau des extrémités de la plaque, puis au voisinage de l'électrode active et la décharge se développe à partir de celle-ci jusqu'au contournement.
- Après chaque essai, il y a modification de la répartition de la couche polluante autour de l'électrode active.
- Une détérioration des plaques isolantes est observée au niveau de leurs extrémités. La dégradation est plus importante dans le cas des plaques de PVC.

Dans le cas des couches polluantes discontinues, de faibles largeurs :

- la décharge apparaît subitement

- Après chaque essai, il y a apparition d'une zone sèche circonscrite à la couche polluante, ceci est dû à la forte densité de courant au voisinage de l'électrode active.

* Résultats d'essais:

Les essais ont été effectués dans les conditions ambiantes du laboratoire, dont la pression et la température se situaient respectivement entre 763 et 767 mm Hg, 24 et 30°C.

Nous présentons dans les tableaux 7 et 8, les résultats ramenés aux conditions normales de température et de pression, selon les recommandations de la CEI-60 [22]. Chaque valeur de tension représente la moyenne de 5 mesures.

l (cm)	U_{cp} (kVeff)	$U_{cp} \pm \sigma_{rep} * t / \sqrt{n}$ (kVeff)
10.75	10.8	10.8±0.1
08.75	10.9	10.9±0.9
07.15	11.1	11.1±1.0
04.75	16.1	16.1±0.8
02.75	21.9	21.9±2.3

(a)

l (cm)	U_{cp} (kVeff)	$U_{cp} \pm \sigma_{cp} * t / \sqrt{n}$ (kVeff)
09.75	11.5	11.5±0.3
08.25	11.6	11.6±0.5
06.50	11.9	11.9±0.6
04.75	21.0	21.0±1.0
02.75	26.6	26.6±1.0

(b).

Tableau 7 : Résultats d'essais sous pollution
avec les plaques d'EPDM

(a): c = 12 cm et e = 2.4 mm

(b): c = 11 cm et e = 5.5 mm

l (cm)	U_{cp} (kVeff)	$U_{cp} \pm \sigma_{cp} * t / \sqrt{n}$ (kVeff)
10.75	09.2	09.2±0.5
08.75	09.5	09.5±1.3
07.15	11.0	11.0±1.5
04.75	21.9	21.9±1.8
02.75	27.6	27.6±2.4

(a)

l (cm)	U_{cp} (kVeff)	$U_{cp} \pm \sigma_{cp} * t / \sqrt{n}$ (kVeff)
09.75	10.4	10.4 ± 0.3
08.25	11.2	11.2 ± 0.9
06.50	13.5	13.5 ± 1.0
04.75	21.2	21.2 ± 1.3
02.75	30.3	30.3 ± 3.1

(b)

Tableau 8: Résultats d'essais sous pollution
avec les plaques de PVC

(a): c = 12 cm et e = 1.6 mm

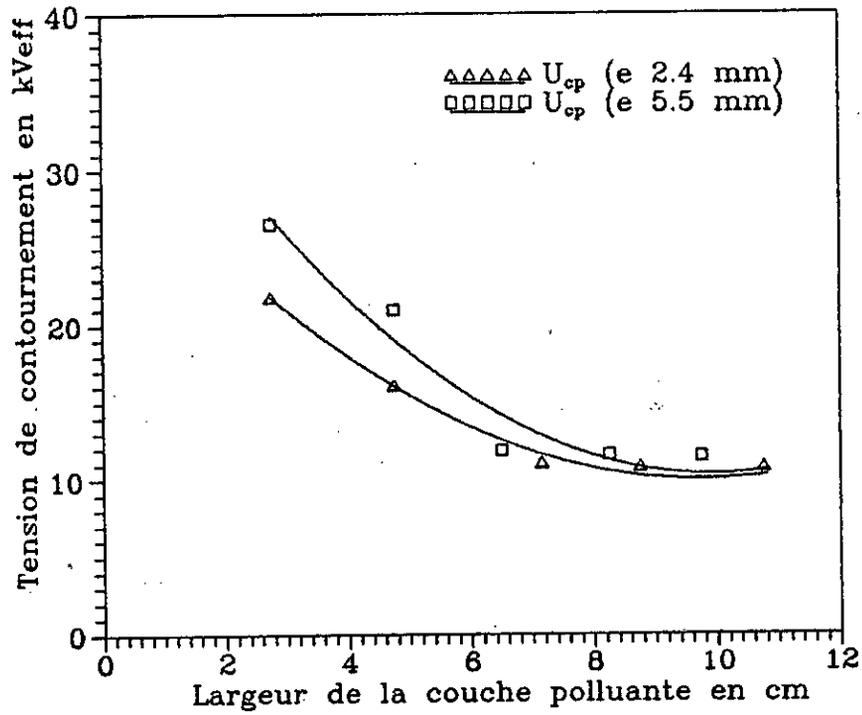
(b): c = 11 cm et e = 5.5 mm

Ou:

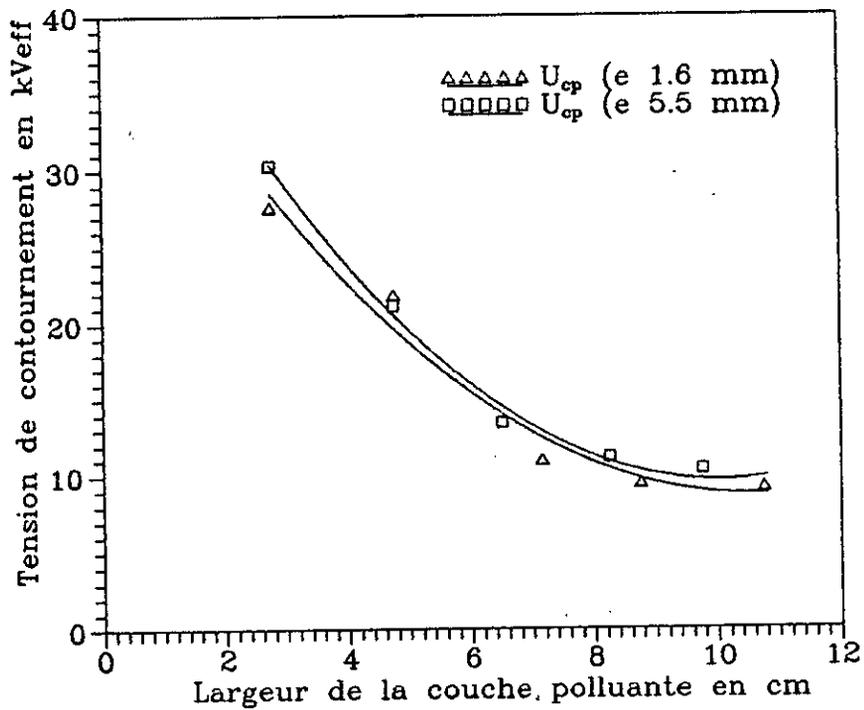
l: largeur de la couche polluante (figure 17)

U_{cp} : tension de contournement sous pollution.

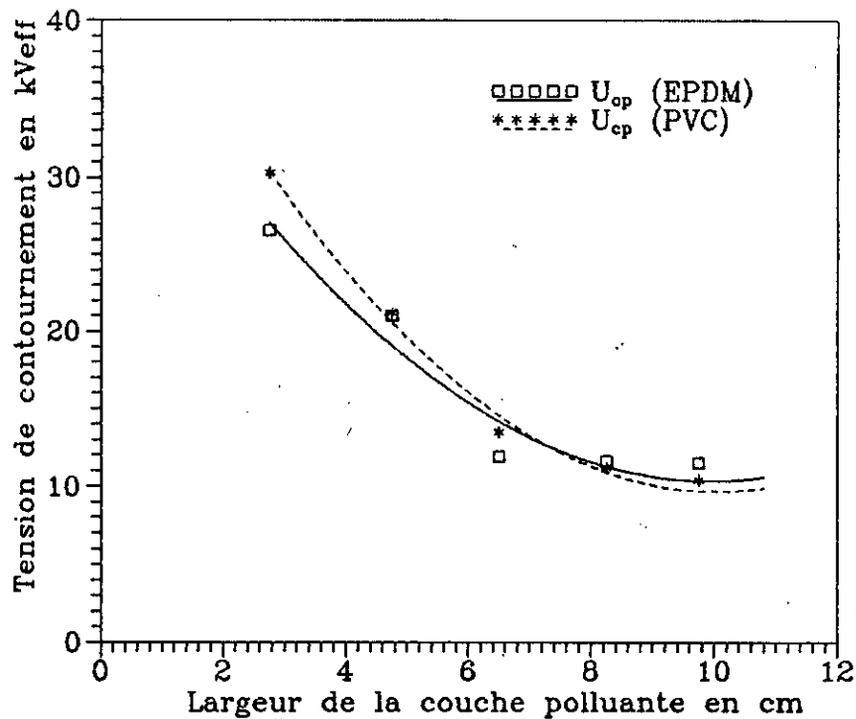
Les courbes correspondants aux résultats présentés dans les tableaux 7 et 8 sont représentées sur les figures 20, 21 et 22.



Figure(20) : Variations de la tension de contournement des plaques d'EPDM en fonction de la largeur de la couche polluante.



Figure(21) : Variations de la tension de contournement des plaques de PVC en fonction de la largeur de la couche polluante.



Figure(22) : Variations de la tension de contournement des plaques de 5.5 mm d'épaisseur en fonction de la largeur de la couche polluante.

* Interprétations:

- Pour une même plaque isolante, la tension de contournement sous pollution (couche continue) est nettement inférieure à celle obtenue dans le cas des surfaces propres. Ceci est dû à l'abaissement considérable de la résistivité superficielle de la plaque isolante, résultant de l'application de la couche polluante.

- La tension de contournement sous pollution diminue quand la largeur de la couche polluante augmente, du fait que la résistance superficielle diminue. Plus cette largeur

augmente, plus la tension de contournement tend à devenir constante.

- Pour un même diélectrique et une même largeur de la couche polluante, plus l'épaisseur augmente, plus la tension de contournement est élevée, cependant l'écart se réduit pour les grandes largeurs de la couche polluante.

- Pour une même épaisseur du diélectrique solide, les tensions de contournement sous pollution du PVC et de l'EPDM sont pratiquement égales. l'écart existant se réduit de plus en plus que la largeur de la couche polluante augmente. Car la résistance superficielle de la plaque tend à devenir constante pour des couches polluantes de largeurs proches de la distance entre-électrodes.

C O N C L U S I O N

A l'issue de notre étude, nous pouvons conclure que :

- La tension d'apparition des décharges glissantes est indépendante de la distance entre-électrodes. Elle dépend de la capacité superficielle spécifique du diélectrique.

- Les formules empiriques donnant les décharges glissantes ont été vérifiées dans le cas de diélectriques de faibles épaisseurs.

- La tension de contournement des surfaces propres augmente avec la distance entre-électrodes.

- La rigidité diélectrique superficielle de l'EPDM est supérieure à celle du PVC.

- La pollution influe de manière intensive sur le comportement des surfaces isolantes, en réduisant considérablement leur tension de contournement.

- La résistance superficielle des surfaces isolantes dépend de la nature de l'agent polluant et du mode d'application de la couche de pollution.

Nous suggérons pour l'avenir, d'effectuer les essais en utilisant d'autres agents polluants et matériaux isolants, ainsi que des têtes de câbles réelles.

B I B L I O G R A P H I E

- [1]: A.MAUDUIT
Installations électriques à haute et basse
tension (tome 2)
Ed. Dunond, Paris (1964)
- [2]: M.AGUET
Haute Tension
Ed. Georgie, Suisse (1967)
- [3]: M.ACHOUR et M.HASNI
Etude et conception d'un câble isolé au PRS
Ecole Nationale Polytechnique (1991)
- [4]: Câbles de transport d'énergie isolés par
diélectriques massifs extrudés pour des tensions
assignés de 1 à 30 kV
Norme CEI 502 (1975)
- [5]: A.BOUBAKEUR
Utilisation des polymères dans les câbles de
Haute Tension
Journées d'étude sur les matériaux (J.E.M)
Ecole Nationale Polytechnique (1991)
- [6]: P.ROBERT
Matériaux de l'électrotechnique (1982)
- [7]: JP.TROTIGNON
Précis de matières plastiques: structure,
propriétés, mise en oeuvre et normalisation
Ed. Fernand Nathan (1982)

- [8]: J.GOSSOT
Les matières plastiques. Fabrication-technologie
Collection Durand technique (1977)
- [9]: M.DOBARZIC
Formes de décharges glissantes sous tensions de
choc 1.2/50 μ S sur les surfaces de diélectriques
solides polluées par le sable du Sahara
Ecole Nationale Polytechnique (1975)
- [10]: M.TOEPLER
über die physikalischen Grundgesetze der in der
Isolatortechnik auftretenden elektrischen
Gleiterscheinungen. Arch. für Elektrotechnik (1921)
- [11]: G.NEURMAKER
Vorentladungen auf der Oberfläche von Isolierungen.
Diss. der TU Dresden (1963)
- [12]: P.CLAVERIE et Y.PORCHERON
Les phénomènes de pollution des isolateurs
et l'isolement des ouvrages en régions polluées
RGE - Tome 82 - N°3 (Mars 1973)
- [13]: C.HURAUX, M.ALIOUCHENE, M.IZZULARAB
Isolateurs pollués: quelques modèles récents et
critères de contournement associés
Labo GE (UA 304)
Université Paul Sabatier, Toulouse (1985)

- [14]: A.MEKHALDI
Modèle de contournement d'isolateurs pollués dans
les conditions désertiques du Sahara Algérien
Ecole Nationale Polytechnique (1990)
- [15]: P.CLAVERIE et Y.PORCHERON
How to choose insulators for polluted areas
IEEE Trans. Pas N°3 (Mai/Juin 1973)
- [16]: P.J. LAMBETH
Effect of pollution on high-voltage outdoor insulators
IEEE Reviews. t.118, N°92 (Septembre 1979)
- [17]: KOSZTALULE et R.KUCHARSKI
Mesure de pollution, essais d'isolateurs pollués,
choix des isolateurs
CIGRE, rapport N° 33-07, Paris (1978)
- [18]: CEI-60-1
Technique des essais à Haute Tension. Première partie:
Définitions et prescription générales relatives aux
essais
Première édition (1973)
- [19]: A.BOUBAKEUR
Influence des barrières isolantes sur l'amorçage
des moyens intervalles d'air, thèse de Doctorat
Ecole Polytechnique de Vasovie (Mai 1979)
- [20]: A.CIMADOR et S.VITEL
La pollution des isolateurs externes
EPURE - N°27 - Juillet 1990

- [21]: S.Szpor et Al
Technique de la haute tension (en Polonais)
Ed. W.N.T,Varsovie (1978)
- [22]: CEI-60-2
Technique des essais à haute tension
Genève (1977)
- [23]: CEI-52 Recommandations pour la mesure de tension au
moyen d'éclateurs à sphère
Genève (1969)
- [24]: Norme polonaise PN.71/E-04405
Matériaux isolants solides et Mesure
de résistances électriques
Varsovie (1971)