

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**

المركز الوطني المتعدد اللغويات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

THESE DE MAGISTER

SUJET :

Etude Mathématique des Mécanismes de
Développement des Décharges Electriques
sur des Isolateurs installés en Régions Polluées

Présentée par :

Mr. TEGUAR Madjid
Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Soutenu le 07/07/1993 devant la comission d'examen :

Président	Monsieur M.E.ZAIM	Maître de conférence à l'E.N.P
Rapporteur	Monsieur A.BEROUAL	Professeur à l'E.N.P
Rapporteur	Monsieur A.MEKHALDI	Chargé de cours à l'E.N.P
Examineur	Monsieur A.BOUBAKEUR	Chargé de cours à l'E.N.P
Examineur	Monsieur T.SAADOUNE	Professeur à l'U.S.T.H.B.
Invité	Monsieur N.DERRAR	Directeur de la direction de la recherche de la SONELGAZ

REMERCIEMENTS

Au terme de cette étude, qu'il me soit permis de témoigner toute ma reconnaissance et mes chaleureux remerciements à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, en particulier:

- A Messieurs A.Béroual Professeur à l'ENP, A.Boubakeur et A.Mekhaldi, chargés de cours à l'ENP, pour leur aide précieuse, leur suivi constant et leurs encouragements soutenus qu'ils n'ont cessés de nous prodiguer jusqu'à l'achèvement de ce travail.

- A Monsieur M.E.Zaïm, Maître de conférence à l'ENP, pour l'honneur qui me fait de présider le jury de soutenance.

- A Messieurs les Membres du jury qui ont bien voulu nous honorer de leur présence à la présentation de ce travail.

- A Monsieur N.Derrar, directeur de la Direction de Recherche de la SONELGAZ, pour sa participation à ce jury.

- A tous les Professeurs, les chargés de cours et les Maîtres Assistants qui ont contribué de près ou de loin à notre formation: R.Tahmi, A.Bensenouci, R.Ibtiouane, A.Maazi, M.O.Mahmoudi, L.Nezli, O.Touhami, B.Hamici, H.Chekireb,

- A tous les Collègues et Amis pour l'ambiance qu'ils ont su créer et les idées fructueuses que nous avons échangées. Nous pourrions citer notamment: M.Boudour, F.Legubedj, A.Azizi, N.Bali, L.Guenfaf, A.Laifa, B.Fiala, F.Guerbas, N.Rouha, S.Bouazabia, A.Hachi, A.Radjeai, D.Saadoun, A.Oukil, M.Nibouche, S.Benakmoum, A.R.Yeddou, F.Halet, S.Grouni, L.Haderbache, ...

- A mes Parents, à mes Frères et Soeurs, à ma Femme ainsi qu'à toute la famille, particulièrement à mon oncle Ahmed, pour leurs précieux conseils, leurs encouragements soutenus, leurs remarques constructives et surtout pour leur soutien moral.

LISTE DES PRINCIPAUX SYMBOLES



A	perte de puissance linéique.
A_1	perte de puissance linéique avant le zéro du courant.
A_2	perte de puissance linéique après le zéro du courant.
b	largeur de l'isolateur.
C	constante.
C_j	coefficients du polynôme de la fonction caractéristique de la pollution.
C_s	coefficient de sécurité de l'isolement pollué.
D	diffusivité thermique.
E_a	gradient de tension de l'arc.
E_{da}	rigidité diélectrique à la température ambiante.
E_p	gradient de potentiel dans la couche de pollution.
f	fonction arbitraire.
$F(x)$	fonction de répartition de la couche polluante à la longueur d'arc x.
$F(X)$	fonction de répartition de la couche polluante à la valeur crête de la longueur d'arc X.
$F(X_c)$	fonction de répartition de la couche polluante à la longueur critique de l'arc X_c .
i	courant de fuite.
I	courant de fuite maximal.
I_c	courant de fuite critique.
k	constante de la caractéristique statique de l'arc.
L	longueur de la ligne de fuite d'un isolateur.
L_a	longueur d'arc minimale.
L_1, L_2	distances de fuite partielles d'un isolateur à long fût correspondant à la tige et l'ailette respectivement.
m	constante.

- n exposant de la caractéristique statique d'arc.
- P produit de la tension appliquée par le courant de fuite élevé à la puissance n .
- P_c produit de la tension appliquée critique par le courant de fuite critique élevé à la puissance n (produit critique).
- r résistance de pollution moyenne par unité de longueur de fuite.
- r_a position de la base de l'arc.
- r_b rayon de la colonne limite de l'arc.
- r_d rayon de la base de l'arc.
- r_0 rayon externe du modèle d'isolateur à disque circulaire.
- r_1, r_2 résistance de pollution moyenne par unité de longueur de fuite correspondant respectivement à la tige et à l'ailette d'un isolateur à long fût.
- $R_m(x)$ résistance de l'arc pour la valeur crête du courant alternatif.
- $R_0(x)$ résistance de l'arc au passage à zéro du courant.
- $R(x)$ fonction caractéristique de répartition de la couche polluante (résistance de pollution) à la longueur d'arc x .
- $R(X)$ résistance de pollution à la valeur crête de la longueur d'arc X .
- $R(X_c)$ résistance de pollution à la valeur critique de la longueur d'arc X_c .
- $R_c(x)$ résistance de pollution entre deux points de base de l'arc.
- $R_i(x)$ résistance interne associée à la base de l'arc.
- V tension appliquée aux électrodes.
- V_{arc} tension de l'arc.
- V_c tension critique.
- V_{cx} tension critique d'entretien d'un arc de longueur x .

V_c	chute de tension aux électrodes.
x	longueur d'arc.
X	longueur d'arc maximale.
X_c	longueur critique d'arc.
x_p	longueur de la couche de pollution mouillée non court-circuitée.
ϕ	diamètre.
ρ	résistivité superficielle de la pollution.
ρ_c	résistivité superficielle critique de la pollution.
w	fréquence angulaire.
γ	conductivité superficielle de la pollution.
θ	constante de temps de l'arc.
θ_1	constante de temps de l'arc avant le zéro du courant.
θ_2	constante de temps de l'arc après le zéro du courant.
δ	angle entre les axes arbitraires $\alpha\alpha'$ et $\beta\beta'$.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

ETUDE MATHEMATIQUE DES MECANISMES
DE DEVELOPPEMENT DES DECHARGES
ELECTRIQUES SUR DES ISOLATEURS
INSTALLES EN REGIONS POLLUEES

الدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION GENERALE

Les lignes et les postes du réseau de transport installés dans les régions où règne une pollution atmosphérique notable, sont sujets à des incidents graves dus au contournement d'isolateurs pollués [1]. Ces incidents ont pour origine des dépôts divers qui se fixent sur les surfaces isolantes et abaissent considérablement par temps de pluie ou de brouillard, leur résistivité superficielle [2].

Les courants de fuite qui circulent alors à la surface de ces isolateurs provoquent des assèchements locaux de la couche de pollution et l'apparition de petits arcs. Dans certains cas, la conductivité de la couche polluante est telle que ces arcs se développent jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur et la mise hors service de l'ensemble de l'installation [2].

L'amélioration recherchée de la tenue des ouvrages (lignes et postes) afin d'éviter de telles défaillances, peut être obtenue [1], [2]:

- soit par des dispositions constructives appropriées:

- * surisolement résultant de l'allongement de la ligne de fuite des isolateurs,
- * utilisation d'isolateurs spéciaux de forme plus favorable,
- * emploi de chaînes horizontales ou inclinées de préférence aux chaînes verticales;

- soit par des mesures d'exploitation convenables:

- * nettoyage périodique des isolateurs,
- * lavage par jet d'eau des installations hors ou sous tension,
- * graissage des isolateurs qui représente la solution la plus adoptée pour les ouvrages exposés à des incidents dus à la pollution, à coût relativement élevé.

Les principaux types de pollution atmosphériques pouvant être rencontrés séparément ou simultanément sont: la pollution naturelle (pollution marine, celles provenant des poussières naturelles, de sable véhiculé par des vents violents en régions désertiques, ...), la pollution industrielle (fumées, poussières industrielles) et la pollution mixte.

Afin d'orienter le choix entre divers types d'isolateurs, différents à la fois par le profil et par la longueur de ligne de fuite, il est nécessaire de disposer de méthodes d'essais permettant de prévoir rapidement leur comportement sous pollution.

Aux essais sous pollution naturelle très longs, on a tenté, depuis plusieurs années, de leurs substituer des essais en laboratoire; reproduisant artificiellement le dépôt polluant. Cependant, il est indispensable de mieux connaître les mécanismes de contournement des isolateurs soumis à la pollution atmosphérique et surtout de rechercher les facteurs qui déterminent réellement la tenue sous pollution [2], [3]. En effet, deux types d'essais existent, à savoir, essais sous pollution naturelle et essais sous pollution artificielle.

Si la nature fondamentale des forces mises en jeu par la formation d'une couche polluante est assez bien connue, les interactions de l'isolateur avec le milieu polluant, qui se prêtent, en raison de leur complexité, le sont moins. C'est pourquoi, jusqu'à présent, tous les travaux visant l'étude de la formation de la couche polluante ont été presque exclusivement de nature expérimentale [4].

En vue d'apporter des compléments valables aux résultats expérimentaux obtenus en milieu naturel, des modèles mathématiques, représentant un contournement engendré par la pollution, ont été élaborés pour décrire les phénomènes d'arcs sur des surfaces polluées [5]. Etant donné que leur nature est forcément idéalisée, ils ne peuvent en aucun cas se substituer

au travail expérimental.

Les phénomènes d'arcs se produisant sur une surface polluée sont tellement complexes qu'il est indispensable de faire de nombreuses hypothèses simplificatrices pour rendre possible leur représentation au moyen d'un modèle mathématique. La complexité de ces phénomènes a pour origine de nombreux facteurs [5], à savoir, la variabilité de la résistivité superficielle découlant essentiellement de l'existence d'échange thermique, la formation d'arcs multiples, la non-uniformité des profils d'isolateurs et des configurations de pollution,

Les deux aspects fondamentaux décrivant le phénomène d'arc sur les surfaces polluées sont :

- la tension minimale nécessaire au maintien d'un arc partiel, en série avec une couche de pollution non court-circuitée par l'arc de longueur variable,

- la propagation de l'arc sur la surface d'un isolateur pollué ou mouillé.

Notre étude, basée sur le modèle de Claverie et Porcheron [2], consiste à étudier par simulation numérique, sous tension alternative 50 Hz, le développement de l'arc électrique sur une surface isolante recouverte d'une couche de pollution continue ou discontinue. Un moyen de surveillance du degré de pollution des isolateurs contaminés permettant d'éviter les incidents provoqués par le contournement est également proposé.

Dans un premier chapitre, nous présentons les phénomènes de pollution et leurs conséquences sur le transport d'énergie électrique. Certaines méthodes de mesure de la sévérité de pollution des sites, ainsi que les méthodes d'essais sous pollution naturelle et artificielle sont discutées.

Le deuxième chapitre présente les principaux modèles mathématiques élaborés pour décrire les phénomènes de contournement des isolateurs sous atmosphère polluée. Il passe en revue les modèles s'appliquant aux arcs en régime de courant continu qui s'entretient sur des surfaces polluées, les critères de propagation des arcs en régime de courant continu, ainsi que les modèles de réallumage des arcs dans le cas d'isolateurs pollués soumis à des contraintes électriques alternatives.

Dans le troisième chapitre, et en vue de formuler un modèle représentatif du mécanisme de contournement, nous proposons une étude mathématique, basée sur le modèle de Claverie et Porcheron. Celle-ci établit des relations entre les valeurs de la tension, du courant et de la longueur d'arc à travers les caractéristiques de la couche polluante de l'isolateur (la répartition de cette couche polluante et sa résistivité superficielle).

Le dernier chapitre est consacré à une étude mathématique du développement de l'arc électrique sur des surfaces isolantes d'isolateurs pollués installés en régions désertiques au Sahara Septentrional Est Algérien; il s'agit des régions de Hassi-Messaoud et de Hassi-R'mel. Nous présentons les différentes caractéristiques décrivant le contournement pour les isolateurs installés dans les régions considérées.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale permettant la synthèse globale de notre travail.

CHAPITRE 1

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

La présence de couches conductrices à la surface de l'isolateur constitue un problème sérieux sur l'isolement des ouvrages de haute tension. De telles couches se forment de différentes façons suivant les conditions naturelles de dépôts de matières polluantes et de leur humidification sur site.

La tension de contournement d'un isolateur avec une couche superficielle conductrice dépend essentiellement de la conductivité de la couche, c'est à dire du degré de pollution, ainsi que de la répartition de cette couche sur les surfaces des isolateurs.

La connaissance de ce degré de pollution subi sur site par les isolateurs, est par conséquent une condition préalable et indispensable pour juger la valeur de l'isolement des ouvrages installés dans ce site, en vue de dimensionner convenablement l'isolation extérieure.

Pour réduire considérablement le facteur temps, toujours trop long, que nécessitent les essais effectués sur site, et d'éviter d'avoir recours à des essais in situ chaque fois que se pose un problème d'isolement en zone polluée, certaines tentatives ont été faites afin de formuler un critère d'amorçage et élaborer un modèle de laboratoire représentatif de l'isolateur dans les conditions naturelles d'exploitation.

I.1. DEFINITIONS:

I.1.1. Contournement:

Suivant certaines conditions électriques, l'arc peut s'allonger le long de la surface isolante en la court-circuitant. C'est le phénomène de contournement électrique qui entraîne, en fait, la mise en défaut de ligne ou poste.

I.1.2. Tension de contournement:

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas à partir duquel les arcs électriques joignent les deux électrodes.

I.1.3. Courant de fuite - Courant de fuite critique:

Le courant de fuite est un courant de faible amplitude, circulant à travers la couche polluante le long de la surface de l'isolateur. Son intensité devient considérable lorsque cette couche est humidifiée. Le courant minimal nécessaire pour provoquer un contournement est dit "courant de fuite critique".

I.1.4. Longueur critique de l'arc:

En atmosphère polluée, l'apparition d'un courant de fuite est accompagnée par la formation d'arcs partiels sur des surfaces isolantes. Selon les conditions électriques, ces arcs peuvent se développer en engendrant le contournement total ou s'éteindre après un certain temps.

La longueur critique d'un arc représente la longueur limite de l'arc partiel qui peut s'éteindre. Dès que l'arc dépasse cette longueur critique, il se propagera et conduira inévitablement au contournement total.

I.1.5. Densité du dépôt de sel équivalent:

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

I.1.6. Conductance superficielle:

La conductance superficielle est le rapport du courant de fuite traversant l'isolateur à la tension appliquée. Elle caractérise l'état global de la surface isolante (niveau de pollution et degré d'humidification de la couche polluante), lequel détermine la performance de l'isolateur.

I.1.7. Contrainte de contournement:

La contrainte de contournement d'un isolateur est le rapport de tension de contournement à la longueur totale de l'isolateur.

I.2. 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 isolateurs, une couche polluante se développe à la surface de ceux-ci. La répartition de cette couche polluante non homogène et non uniforme, dépend du profil des isolateurs utilisés, de la hauteur des isolateurs par rapport au sol, de la disposition (verticale, horizontale ou inclinée) des chaînes d'isolateurs et du niveau de tension qui leur est appliqué.

En général, la couche polluante se concentre dans les parties les mieux protégées contre les facteurs "d'auto-nettoyage" (vents violents, fortes pluies,...) [6], [7].

I.3. SOURCES DE POLLUTION:

Les principales sources de pollution atmosphérique qui peuvent être rencontrés, séparément ou simultanément, sont naturelles, industrielles ou combinées (mixtes).

I.3.1. Pollution naturelle:

Nous pourrions citer notamment:

- la pollution naturelle d'origine marine,
- les autres pollutions naturelles proviennent des dépôts de poussières naturelles, de sable véhiculé par les vents en régions désertiques,

I.3.1.1. Pollution marine:

Dans les ouvrages installés en bordure de mer, les embruns portés par le vent déposent progressivement sur les isolateurs une couche de sel qui, à plus ou moins longue échéance, recouvre toute la surface de l'isolateur 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 superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance dans certaines conditions, et se développer jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur [2], [6], [7].

I.3.1.2. Pollution désertique:

En régions désertiques, un vent de poussière fréquent, engendrant occasionnellement des tempêtes de sable, dépose progressivement sur les isolateurs une couche de pollution contenant des sels solubles. Cette couche devient beaucoup plus conductrice lorsqu'elle est humidifiée.

Un courant de fuite apparaît brusquement accompagné d'arcs partiels dont la propagation à la surface de l'isolateur peut

aussi conduire à un contournement total de l'isolateur [6], [8].

I.3.1.3. Autres types de pollution naturelle:

La pluie est un phénomène naturel propice à l'humidification des isolateurs par excellence.

Lorsqu'elle est intense, elle est susceptible de provoquer la désagrégation des dépôts solides. Cependant, cet auto-lavage favorable à l'amélioration des qualités diélectriques des isolateurs est contrarié par le phénomène de ruissellement.

Dans certaines conditions de pluie violente, un film continu d'eau peut s'établir d'une extrémité à l'autre de la chaîne ou de la colonne isolante. Comme l'eau n'est jamais parfaitement isolante, ce phénomène peut entraîner le contournement de l'isolation; c'est le contournement sous pluie.

Il est généralement admis que la pollution est plus contraignante que la pluie dans la mesure où la résistivité des couches polluantes est bien inférieure à celle de la pluie. Ceci explique qu'au cours des dernières années, les efforts de compréhension aient davantage porté sur le contournement sous pollution.

I.3.2. Pollution industrielle:

La pollution industrielle provient des fumées évacuées à proximité de raffineries (torchères pétrolières), de cimenteries, de complexes sidérurgiques, chimiques ou même aux abords des centrales thermiques. En outre, cette pollution consiste, pour les régions exemptes de fumées, en la pollution domestique (appareils de chauffage polluants des habitations, véhicules automobiles, ...) et la pollution agricole (engrais, ...).

Les isolateurs se recouvrent de poussières faiblement conductrices, mais très hygroscopiques, car elles ont tendance à absorber l'humidité de l'air. Dans des conditions de forte humidité (brouillard, pluie, condensation matinale, ...), la dissolution des sels contenus dans cette poussière provoque la formation d'une couche électrolytique. Les gaz présents dans les fumées absorbés par la couche liquide, en augmentent encore la conductivité superficielle.

Comme dans le cas de la pollution marine, un courant de fuite circule alors dans la couche superficielle et le contournement peut parfois survenir [2], [6], [7].

I.3.3. Pollution mixtes:

Les pollutions mixtes résultent de la combinaison d'une ou de plusieurs pollutions prés-citées. C'est la forme de pollution la plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques [6], [7].

Par conséquent, quelle que soit la source de pollution, on observe la formation d'une couche électrolytique due à l'humidification d'un dépôt solide accumulé progressivement à la surface des isolateurs [2].

Il est important 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, qui dépend entre autres de l'intensité de la pollution atmosphérique, de l'adhérence des poussières, de la fréquence de la pluie, ... [2].

Comme on le voit, la nature et les caractéristiques des agents contaminants sont très variés. Généralement, ils ne provoquent pas de dégradations de la rigidité diélectrique lorsqu'ils sont secs. Cependant, l'humidification d'un dépôt

solide accumulé progressivement à la surface des isolateurs, quelle que soit sa nature, provoque la formation d'une couche électrolytique caractéristique du phénomène de pollution.

I.4. CONSEQUENCES DE LA POLLUTION:

Lors de la mise en place d'une chaîne d'isolateurs, la longueur de la ligne de fuite de l'ensemble est telle que le champ électrique en chaque point est très inférieur à la rigidité diélectrique de l'atmosphère ambiante.

Les couches polluantes qui s'accumulent à la surface des isolateurs provoquent une conductivité électrique superficielle. Celle-ci modifie la répartition du potentiel le long de la ligne de fuite. Suivant les conditions atmosphériques (pluies fines, brouillard, ...), 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 qui court-circuite une partie de la ligne de fuite.

Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur [2], [7], [9], [10], [11]:

I.4.1. Arc non localisé:

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

I.4.2. 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).

Cet arc peut entraîner, par effet thermique, une dégradation du support isolant nécessitant le remplacement de l'élément défaillant.

I.4.3. Contournement des isolateurs pollués:

On admet généralement que les principaux phénomènes conduisant au contournement d'un isolateur pollué, soumis à la tension de service, comprennent la formation d'une couche conductrice à la surface de l'isolateur, l'apparition brusque d'un courant de fuite accompagné de la formation d'une bande sèche et d'arcs partiels, et la propagation en surface de l'arc qui peut couvrir tout l'isolateur.

En atmosphère humide, pour une tension de quelques kilovolts appliquée entre les électrodes, les principales étapes engendrant le contournement sont les suivantes:

- L'humidification (pluie, brouillard ou rosée) associée à un dépôt polluant crée une couche conductrice à la surface de l'isolateur.

- L'échauffement par effet Joule créé par le courant de fuite provoque, à cause de différences de densité de courant d'un point à un autre, l'apparition d'une zone sèche.

- Une partie importante de la tension appliquée se trouve reportée sur cette bande sèche engendrant, si le champ qui en résulte est suffisant, le claquage diélectrique et l'établissement d'une décharge électrique.

- Selon les conditions électriques qui se trouvent alors réunies, cette décharge va se développer jusqu'au contournement final ou s'éteindre au bout d'un certain temps variable.

Sous tension continue, le processus global est relativement facile à décomposer: une fois la décharge amorcée, si les conditions électriques le permettent, elle va se développer rapidement jusqu'au contournement. Dans le cas contraire, la zone sèche va tendre à s'élargir jusqu'à ce que la tension appliquée ne puisse plus maintenir la décharge, qui va alors s'éteindre.

Sous tension alternative, le problème est rendu plus complexe par les passages à zéro de l'onde de courant, pendant lesquels la décharge s'éteint. Les vitesses de contournement sont très variables (de quelques microsecondes à la fraction de seconde) selon les conditions électriques. Lorsque cette vitesse est faible, le passage à zéro peut intervenir avant que le contournement ne soit fini; il faut alors que la tension appliquée soit capable de réamorcer la décharge à l'alternance suivante.

A chaque alternance, la forte densité au voisinage de la décharge, si elle est amorcée, provoque une vaporisation très rapide du liquide. Cependant, cette décharge emprunte tout ou partie du trajet précédemment ionisé et se développe vers l'électrode opposée en balayant une zone qu'elle assèche progressivement.

Deux cas sont alors à considérer suivant le type de pulvérisation :

* Si la pulvérisation est arrêtée peu après l'application de la tension, lorsque l'arc aura atteint une certaine longueur et que la zone balayée sera complètement sèche, le phénomène s'arrêtera; aucun courant ne circule alors dans le circuit.

* Par contre, pour une pulvérisation continue, un régime permanent s'établit, caractérisé par des arcs radiaux tournant autour de l'électrode mise à la haute tension, en balayant une surface bien délimitée. Si à partir de ce régime, la tension est augmentée, les arcs s'allongent et la zone balayée s'étend puis

se stabilise. En élevant ainsi progressivement la tension par paliers, on atteint un état critique au-delà duquel toute nouvelle augmentation de tension provoque immédiatement le contournement total par développement d'un arc radial.

Il apparaît donc que le développement de l'arc électrique est essentiellement un phénomène thermique. En outre, le problème fondamental est celui du mécanisme qui, sous tension continue, détermine l'élongation de la décharge électrique une fois qu'elle a été amorcée.

I.5. MESURES DE LA SEVERITE DE POLLUTION DES SITES:

Le choix des isolateurs à installer sur le réseau ne peut se faire que si la sévérité de la pollution du site est connue. En effet, la mesure de cette sévérité est indispensable afin de dimensionner convenablement les isolateurs susceptibles d'assurer un service sans défaillance dans un site pollué.

I.5.1. Classification des sites pollués [3], [7]:

Il est possible de caractériser la sévérité de la pollution d'un site en utilisant, par exemple, la méthode de brouillard salin équivalent. La sévérité considérée est alors exprimée en termes de salinité équivalente.

En effet, on peut faire correspondre à chaque site soumis indifféremment à une pollution naturelle ou industrielle, une solution saline équivalente.

Afin de définir l'isolement des lignes de transport et d'établir la corrélation entre la salinité équivalente et niveaux de pollution naturelle, quatre classes de sévérité ont été proposées:

I.5.1.1. Classe 1:

Cette classe correspond à une pollution faible. Cette pollution est généralement naturelle (sauf marine) ou légèrement industrielle.

Les zones soumises à une telle pollution sont des zones sans industries, à faible densité d'habitations équipées d'installations de chauffage, situées loin de la mer et/ou à une altitude élevée (les régions agricoles ou montagneuses) et ne doivent en aucun cas être exposées aux vents venant de la mer.

Les contournements de chaînes dans ces régions se produisent surtout en période de brouillard ou au lever du soleil par condensation (incidents du matin). Pour ces zones, l'isolement normal convient facilement.

La salinité équivalente maximale retenue pour cette classe correspond à une pulvérisation d'une solution de chlorure de sodium à 2,5 g/l de concentration.

I.5.1.2. Classe 2:

La classe 2 correspond à une pollution moyenne. En général, cette pollution est naturelle (sauf marine) ou non ou faiblement industrielle.

Une telle classe comporte des zones avec des industries ne produisant pas de fumées particulièrement polluantes ou sans industries polluantes, à densité moyenne d'habitations équipées d'installation de chauffage et situées loin de la mer. Ces zones nécessitent un isolement renforcé.

En classe 2, la salinité équivalente maximale retenue est de 10 g/l.

I.5.1.3. Classe 3:

Cette classe correspond à des zones très localisées où l'on trouve simultanément une forte pollution marine et industrielle.

Il s'agit donc de zones à densité industrielle importante, de grandes villes, ou de zones proches de la mer soumises à l'action directe des embruns salins. Ces sites nécessitent un isolement important.

La salinité équivalente maximale, concernant cette classe, est de 80 g/l.

II.5.1.4. Classe 4:

La classe 4 correspond aux zones où le niveau de pollution est exceptionnel. La pollution est éventuellement naturelle, industrielle ou mixtes.

Cette classe comporte des zones qui sont sujettes à des fumées industrielles et à des poussières conductrices produisant des dépôts particulièrement épais ou/et des zones très proches de la cote soumises à des vents marins très forts et très polluants. Ces zones nécessitent donc un isolement exceptionnel.

La salinité équivalente maximale, pour la classe 4, est de 160 g/l.

REMARQUE:

Les zones désertiques ont généralement un très fort degré de pollution. Elles sont caractérisées par l'absence de pluie pendant de très longues périodes, par une condensation régulière et par des vents violents engendrant éventuellement des tempêtes chargés de sable,

I.5.2. Méthodes de mesures de la sévérité d'un site:

Les principales méthodes qui ont été proposées pour caractériser la sévérité d'un site [7], [12], [13] sont:

I.5.2.1. Densité du dépôt de sel équivalent:

Des échantillons de sels sont prélevés à la surface d'isolateur témoin par lavage, en utilisant un matériau absorbant (coton,) et de l'eau distillée. Le dépôt est ensuite dessous dans une quantité de solution connue. La conductivité de la solution obtenue ainsi que les caractéristiques de l'isolateur permettent 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.

Cette méthode permet d'établir une relation avec les méthodes d'essais sous pollution artificielle. Elle présente, en outre, certains inconvénients tels que les fréquences des prélèvements si elle n'est pas autorisée, les fluctuations de l'humidité et l'amorçage des arcs qui ne sont pas pris en considération.

I.5.2.2. Conductance superficielle:

La conductance des isolateurs témoins, installés sur site, est obtenue à partir d'une mesure du courant de fuite en calculant le rapport $G=i/v$.

La conductivité superficielle est obtenue en multipliant la conductance G par un facteur de forme de l'isolateur. Généralement, la tension est appliquée aux électrodes terminales, ce qui fournit la conductivité superficielle globale de

l'isolateur.

En cas de couches polluantes non homogènes, la conductivité superficielle locale peut être obtenue en mesurant la conductance d'une partie de la surface à l'aide d'électrodes auxiliaires.

Cette méthode peut être représentative d'un type de pollution du site étudié, mais en général elle présente des résultats dispersés.

I.5.2.3. Courant de fuite:

La mesure du courant de fuite s'effectue en deux étapes :

I.5.2.3.1. Comptage d'impulsions:

On enregistre pendant une période donnée, sur un isolateur soumis à sa tension de service, le nombre d'impulsions du courant de fuite dépassant une amplitude donnée. L'existence d'impulsions précède généralement la phase de contournement.

Pour l'enregistrement, on utilise un isolateur en service ou isolateur témoin et un dispositif "comptage d'impulsions" permettant de compter les impulsions du courant de fuite.

Cette méthode exigeant une aptitude au contrôle continue, permet de déterminer la longueur des isolateurs lors d'une extension de réseau, à faible coût. Cependant, elle ne fournit pas une mesure absolue de la performance des isolateurs.

I.5.2.3.2. Courant de fuite crête:

On mesure la plus forte valeur de crête du courant de fuite sur un isolateur témoin soumis à sa tension de service. Ces

mesures devant être effectuées pendant une période relativement longue et à coût relativement élevé.

Cette méthode est simple et tient compte de l'effet combiné des conditions atmosphériques et de la tension sur la couche polluante.

I.5.2.4. Contrainte de contournement:

Sur site, la contrainte de contournement peut être mesurée de différentes façons. Nous pouvons citer entre autres:

- L'installation de chaînes d'isolateurs de même type, mais de différentes longueurs et soumises à une tension constante. On estime les probabilités de contournement à partir des portions d'amorçages enregistrées.

- La disposition des éclateurs sur chaque chaîne afin que sa longueur effective soit augmentée jusqu'à atteindre le niveau de tenue en tension.

Ces méthodes présentent des mesures les plus directes qui puissent être faites. Les coûts élevés peuvent être réduits par l'utilisation d'une ligne existante.

I.5.2.5. Autres méthodes:

Certaines méthodes utilisent des jauges permettant l'analyse de l'environnement pour la recherche de sels et de solides. Les données météorologiques habituelles (quantité de pluie, humidité relative, importance du brouillard, vitesse et direction du vent) peuvent être également utilisées ainsi que les statistiques de défaut sur les lignes d'une région donnée. Enfin, certaines recommandations font appel à des règles empiriques.

I.6. METHODES D'ESSAIS SOUS POLLUTION:

Pour comparer les performances de divers types d'isolateurs et sélectionner ceux qui présentent le meilleur comportement sous pollution, il est nécessaire d'effectuer des essais.

En effet, on distingue deux catégories de recherches sur les isolateurs pollués: les essais sous pollution naturelle et les essais sous pollution artificielle. Chacune des deux catégories a ses propres caractéristiques.

I.6.1. Essais sous pollution naturelle:

On installe dans différents sites pollués, des stations dans lesquelles on observe le comportement d'un certain nombre de chaînes d'isolateurs ou colonnes isolantes de longueurs ou de profils différents. Les qualités respectives de ces isolateurs, placés sous la même tension, sont appréciées en fonction des temps au contournement. On peut les classer en distinguant ceux qui ont contourné de ceux qui ont tenu, par exemple, durant deux ou trois ans d'exposition [2], [7].

Cependant, l'inconvénient majeur de ces essais "in situ" apparaît immédiatement. La pollution étant un phénomène à évolution lente dû à une accumulation progressive de dépôts. Plusieurs années sont nécessaires pour pouvoir comparer valablement les performances des isolateurs essayés "in situ".

Ce délai étant jugé trop long, c'est pourquoi on a rapidement cherché à reproduire en laboratoire les conditions de pollution naturelle, afin d'obtenir des résultats et effectuer des comparaisons plus rapidement, plus facilement et à un moindre coût.

Ainsi différentes méthodes d'essais de laboratoire ont été proposées.

I.6.2. Essais sous pollution artificielle:

En créant artificiellement en laboratoire une pollution, on a cherché à pallier à l'inconvénient majeur des essais in situ, à savoir, leur durée.

Cependant, la mise au point de ces méthodes artificielles s'est effectuée progressivement et de façon empirique faute de connaissances précises sur les conditions réelles déterminant le contournement.

Afin de valider ces essais artificiels, il a été nécessaire de comparer les isolateurs essayés en laboratoire, par ordre de mérite, à ceux observés sous pollution naturelle [2], [7].

Les critères de mérite peuvent être:

- La tension de contournement ou la sévérité maximale de la pollution artificielle que l'isolateur peut supporter sans défaillances pour les essais en laboratoire.

- Le temps au bout duquel l'isolateur a contourné pour les essais sur site.

Les méthodes d'essais qui demeurent actuellement normalisées sont: la méthode du brouillard salin et les méthodes de la couche solide [14].

I.6.2.1. Méthode du brouillard salin:

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 [2], [3], [6], [7], [15], [16].

Après un nettoyage préalable, l'isolateur est soumis à sa tension de service, maintenue constante durant toute la durée de l'essai.

La pollution artificielle est réalisée par pulvérisation à la surface de l'isolateur d'une solution saline (chlorure de sodium et eau) plus ou moins concentrée selon la conductivité désirée.

Le degré de salinité, exprimé en kg de sel/m³ de solution, définit le paramètre de sévérité. Selon la classification des sites pollués, les valeurs de salinité appliquée sont choisies selon une progression allant de 2.5 à 160 kg/m³.

Etant donné que l'application de la tension se fait avant que l'humidification commence, cette méthode correspond au cas d'un réseau sous tension pour lequel le courant de fuite, circulant à la surface des isolateurs pollués, augmente en même temps que s'effectue l'humidification.

I.6.2.2. Méthodes des couches solides:

Les méthodes des couches solides simulent mieux les dépôts de pollution industrielle tels que cendres de fuel et ciment. Ce type de couches pouvant contenir des quantités d'eau relativement importantes [2], [6], [7], [8], [17], [18].

Dans ces méthodes, l'isolateur est recouvert par pulvérisation ou application d'une couche de pollution solide constituée d'un mélange d'eau et d'un agent liant complètement ou presque inerte (émulsion de craie, silice pulvérisée ou cab-o-sil, kieselguhr, méthylcellulose). La conductivité de cette suspension est réglée par addition d'une certaine quantité de chlorure de sodium. La tension est appliquée après stabilisation de la couche polluante.

La sévérité est définie comme étant :

- La densité de dépôt de sel en mg/cm^3 , si l'humidification se fait après application de tension (méthode du brouillard vapeur).

- La conductivité de la couche polluante, en cas où l'humidification s'effectue avant application de tension.

A l'exception de la méthode du brouillard vapeur, qui correspond aux isolateurs sous tension car l'humidification se fait après application de la tension, les méthodes de la couche solide correspondent au cas où une partie du réseau est remise sous tension. Cependant, les isolateurs n'ayant pas été alimentés depuis quelques temps peuvent être froids et humides.

I.6.2.3. Critiques de ces méthodes d'essais:

La méthode du brouillard salin est la plus utilisée au laboratoire vu sa bonne reproductibilité des essais et sa grande facilité de mise en oeuvre. En outre, cette méthode est la seule qui assure, au cours de l'essai, un renouvellement de la couche polluante.

La validation de cette méthode a été vérifiée dans un certain nombre de régions côtières. On a également trouvé une corrélation satisfaisante avec les résultats dans les conditions naturelles de pollution industrielle [2], [3], [6], [7], [15], [16].

I.7. CONCLUSION:

La connaissance du degré de pollution est une condition indispensable permettant de dimensionner convenablement l'isolation extérieure.

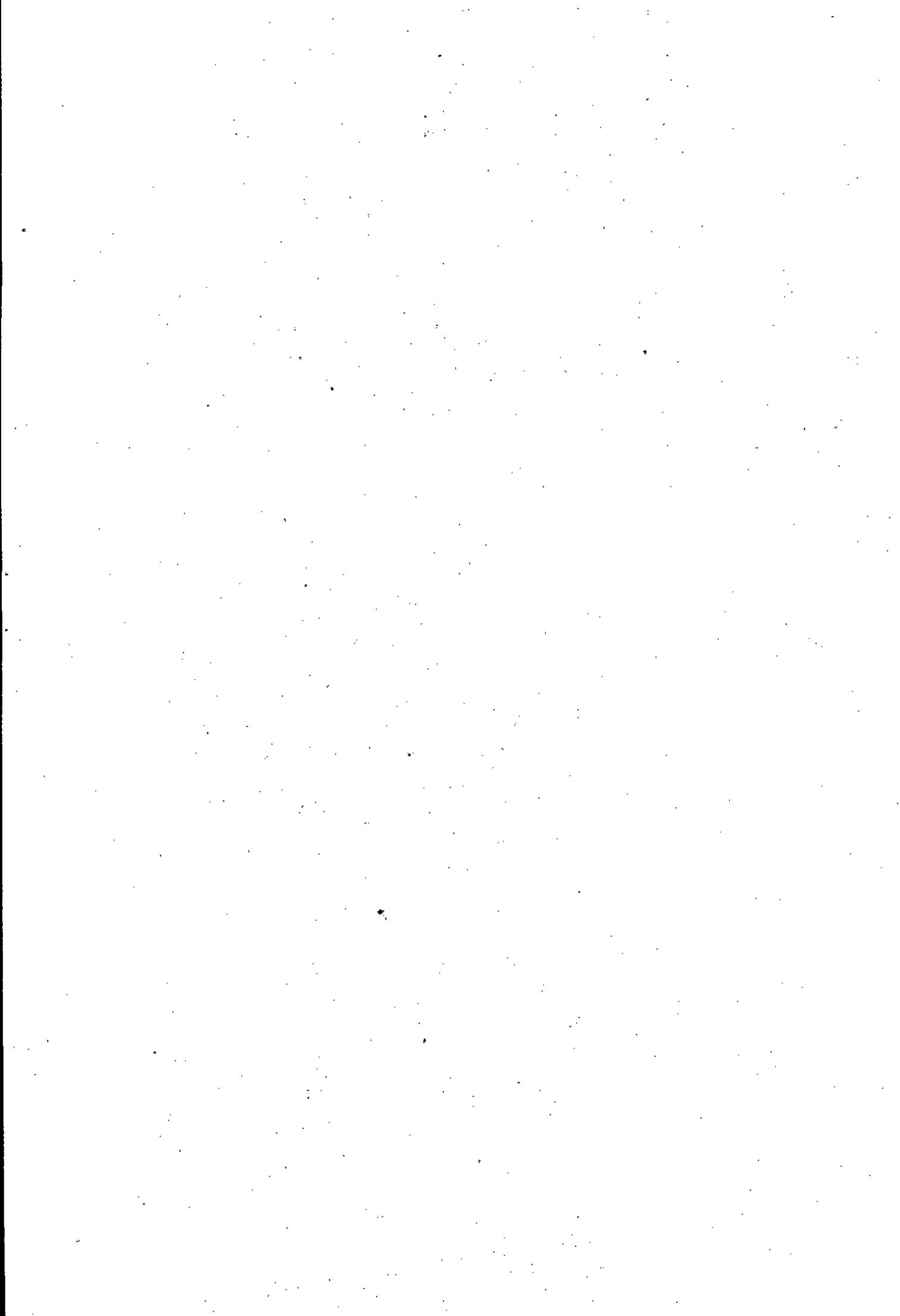
En effet, lorsqu'un ouvrage doit être construit en zone polluée, il est certain que la meilleure définition de l'isolement sera obtenue en déterminant la salinité équivalente du site par une expérimentation aussi longue que possible dans ce même site.

Le fait de disposer d'une méthode de pollution artificielle permet de n'effectuer l'expérimentation (dans le site) que sur un seul type d'isolateurs et éventuellement à un niveau de tension différent que celui prévu, ce qui constitue déjà un avantage considérable. Il n'en demeure pas moins que trois années sont au minimum nécessaires pour déterminer la sévérité d'un site.

Afin d'être en mesure de fournir rapidement des renseignements concernant l'isolement nécessaire, il serait préférable de disposer d'une "carte de sévérité" des principaux sites pollués. On propose de les classer en quatre catégories de sévérité auxquelles correspondent des longueurs minimales de lignes de fuite à respecter pour les isolateurs en service dans ces sites.

CHAPITRE 2

MODELES DE DEVELOPPEMENT DE L'ARC ELECTRIQUE SUR DES SURFACES ISOLANTES POLLUEES



En vue de formuler un critère d'établissement d'un arc sous tension continue, plusieurs modèles ont été développés. Ils sont très souvent employés pour interpréter des résultats obtenus pour des tensions alternatives. Pour la représentation du contournement engendré par la pollution, les modèles considérés doivent être traités différemment dans le cas du courant continu et celui du courant alternatif.

Afin de faciliter l'analyse des différents modèles, plutôt que d'adopter les notations chaque fois différentes employées dans les articles à partir desquels cette synthèse a été effectuée, nous avons décidé de recourir au même système de symboles.

En effet, les principaux modèles développés pour l'étude de propagation de l'arc électrique sur la surface d'un isolateur pollué, sont les suivants:

II.1. MODELES A COURANT CONTINU:

Plusieurs modèles ont été proposés en vue d'étudier le développement d'arc, en courant continu, qui s'entretient sur des surfaces polluées.

II.1.1. Modèles simples:

Parmi les premiers chercheurs qui ont commencé à développer des modèles, en vue d'analyser quantitativement les phénomènes d'arcs se produisant sur des surfaces contaminées, nous pourrions citer notamment: Obenaus [19], Neumarker [20], Alston et Zoledziowski [21], ainsi que Danis [22]. Ces chercheurs ont considéré, pour la plupart, une surface isolante plane, polluée et partiellement contournée. Cette surface serait équivalente à un circuit formé d'un arc de longueur X en série avec une résistance $R(x)$ représentant la couche de pollution. Ce circuit

est alimenté par une tension constante V et parcouru par un courant de fuite i (Fig. 2.1).

Selon Obénaus, l'équation du circuit est donnée par:

$$V = kxi^{-n} + iR(x) \quad (\text{II.1})$$

où k et n représentent des constantes empiriques caractérisant l'état statique de l'arc se formant sur la surface isolante polluée.

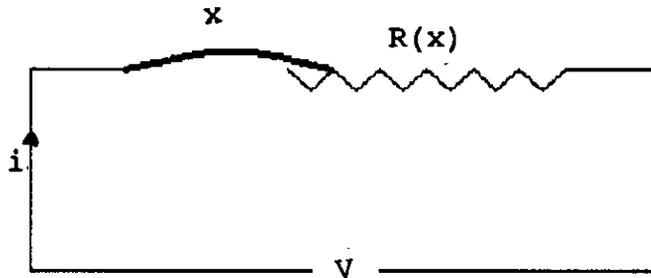


Fig. 2.1. - Circuit électrique équivalent.

La tension nécessaire pour entretenir un arc de longueur x en série avec une résistance de pollution $R(x)$ est:

$$V_{cx} = \frac{n+1}{n \frac{n}{n+1}} [kxR(x)^n]^{\frac{1}{n+1}} \quad (\text{II.2})$$

A partir du modèle d'Obénaus, Newmarker a fait l'hypothèse supplémentaire d'une résistance de pollution uniforme par unité de longueur de fuite, soit:

$$R(x) = r(L-x) \quad (\text{II.3})$$

où L et r représentent respectivement la longueur de fuite totale et la résistance moyenne par unité de longueur.

Ainsi la tension minimale nécessaire pour entretenir l'arc est liée, en fait, aux paramètres fondamentaux par l'expression suivante:

$$\frac{kn}{r} \left(\frac{V_{cx}}{(1+n)kL} \right)^{\frac{n}{n+1}} = \left(\frac{x}{L} \right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{x}{L} \right)^{\frac{n+1}{n}} \quad (\text{II.4})$$

La tension critique peut s'écrire:

$$V_c = L(kn^n)^{\frac{1}{(n+1)}} \quad (\text{II.5})$$

En tenant compte de l'hypothèse de Newmarker et en négligeant la chute de tension cumulée aux électrodes (car elle est de l'ordre de 600 V), Alston et Zoledziowski ont trouvé la formule précédente donnant la tension critique, pour un isolateur cylindrique de longueur L (Fig. 2.2).

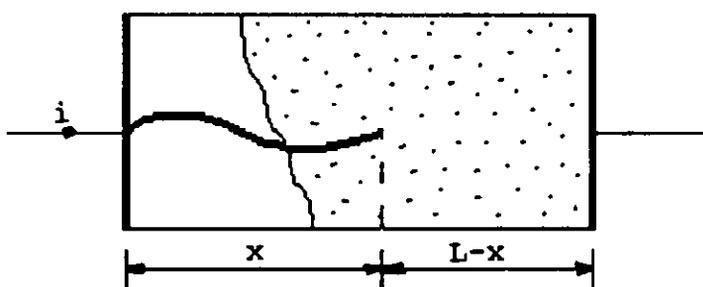


Fig. 2.2. - Modèle cylindrique utilisé par Alston et Zoledziowski [21].

La tension minimale nécessaire pour entretenir un arc selon Alston et Zoledziowski est telle que:

$$V_{cx} = (n+1) (kx)^{\frac{1}{n+1}} \left(I \frac{L-x}{n} \right)^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{II.6})$$

Pour un modèle simple (plaque ou cylindre) semblable aux isolateurs réels, contenant plus d'une zone sèche (Fig. 2.3), Danis a établi, pour une résistance de la couche polluante linéaire, l'équation régissant le circuit:

$$V = ki^{-n} + \rho (L-x) i \quad (\text{II.7})$$

où ρ étant la résistance spécifique, $n \geq 0,5$ et $200 \leq k \leq 400$.

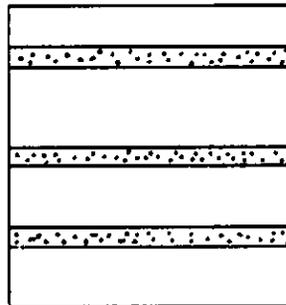


Fig. 2.3. - Modèle plan selon Danis [22].

La tension critique est alors:

$$V_c = L(k\rho)^{\frac{1}{n+1}} = LI_c \rho_c = kI_c^{-n} \quad (\text{II.8})$$

où ρ_c est la résistance spécifique critique et I_c le courant de fuite critique maximal. La résistance en série est calculée selon le modèle de Wilkins [23], dans le cas de la bande étroite.

Pour une couche de pollution uniforme et à partir d'expériences de contournement effectuées, Skurapat [24] a proposé que la décharge électrique se propagera si le courant augmente ($di/dx > 0$); et le contournement peut se produire dès que la tension appliquée est supérieur à une certaine valeur V_c : dite "tension critique". Ce dernier critère a été déjà proposé par Hesketh [25] et Rumeli [26]. Hampton [16] a proposé que l'arc se propagera si le gradient de la tension de la décharge E_d est inférieur au gradient de la tension de la couche polluante en série E_p ($E_d < E_p$). Nacke [27] et Wilkins [23] avaient suggéré quand à eux que les arcs se déplacent vers la position où le taux d'énergie dépensée est maximum. Cependant, la raison fondamentale de propagation n'est pas clair jusqu'à maintenant.

La tension appliquée, pour une décharge en série avec la résistance linéique r , est donnée par:

$$V = kxi^{-n} + V_o + ir(L-x) \quad (\text{II.9})$$

où V_o est la chute de tension cumulée aux électrodes qui peut être négligée, car elle est de l'ordre de 600 volts, L la longueur de la ligne de fuite de l'isolateur et k et n des constantes caractéristiques (empiriques).

En appliquant le critère $di/dx > 0$ pour cette équation, nous arrivons à l'expression donnant le courant critique:

$$I_c = \left(\frac{k}{r} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (\text{II.10})$$

Cependant l'expression précédente donnant le courant de fuite critique n'a pas été vérifiée par une expérimentation directe [28].

Hampton a étudié la propagation de décharge électrique par humidification et conclu que le courant critique peut être calculé à l'avance si cette décharge s'amorce dans une atmosphère humide. Certains auteurs tels que Rumeli, Danis, Rahal et Huraux [29] ont confirmé ces résultats.

Cependant, la non-uniformité de la couche humide peut conduire, selon d'autres auteurs [28], à une erreur de 40 % dans l'estimation de la résistivité linéique. Quand à Zoledziowski [30], il a supposé que la décharge s'amorce dans l'air.

II.1.2. Amélioration des modèles à courant continu:

En vue d'améliorer certaines hypothèses simplificatrices, plusieurs tentatives ont été effectuées.

II.1.2.1. Modèle de la couche mixte :

Pour une couche de pollution mixte; cas d'un isolateur à long fût, Obenaus et Boehme [31] ont considéré que celle-ci est équivalent à deux couches résistantes en série, de résistance linéique r_1 et r_2 , et correspondant respectivement à la tige et aux ailettes comme montre la figure 2.4. En outre, ils ont décomposé la longueur totale de fuite en deux distances partielles L_1 et L_2 respectivement.

L'application du critère de Hampton leur a permis de déduire la relation ci-dessous donnant le gradient de contournement critique (en faisant certaines hypothèses et choisissant l'exposant $n = 1$):

$$\frac{V_c}{L} = 0,8 \sqrt{k} \sqrt{r_1} \quad (\text{II.11})$$

où la constante $k = 80 \text{ VA/cm}$.

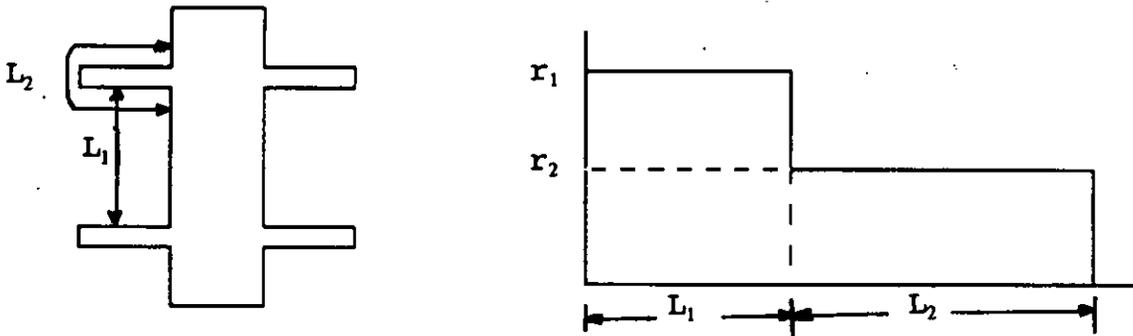


Fig. 2.4. - Modèle d'un isolateur à long fût et distribution de la résistance de pollution selon Boheme et Obénaus [31].

En appliquant le critère d'Hesketh, l'expression précédente devient:

$$\frac{V_c}{L} = 0,8 (Lr_i) \quad (\text{II.12})$$

où r étant la résistance linéique sur une longueur partielle de fuite L_1 ou L_2 .

Notons que les études précédentes décrivent électriquement la décharge en phase stable ou en propagation, pour un modèle unidimensionnel.

Cependant Rahal et Huraux [29] ont proposé quand à eux un modèle permettant à la fois:

- d'en prévoir la stabilité ou l'instabilité à une seule condition que l'on introduit quelques critères supplémentaires d'origine expérimentale;

- de faire une approche en bidimensionnel en réalisant toutes les corrections possibles des équations décrivant le modèle unidimensionnel. Cette approche a été déjà étudiée par Cheng et Jolly [32].

Ainsi, le modèle proposé est donné par la figure 2.5, dont le schéma électrique équivalent est le même que celui donné auparavant (Fig. 2.1).

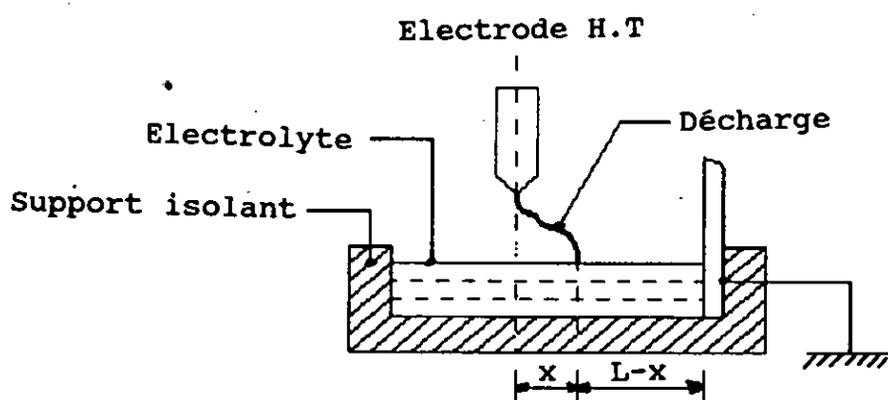


Fig. 2.5. - Modèle de laboratoire d'après Rahal et Huraux [29].

L'application du critère de Hampton leur a permis de constater une divergence entre les valeurs mesurées et celles calculées. Ce désaccord peut être interprété par l'existence d'une perturbation qui peut, à priori, être engendrée par trois phénomènes:

- élévation locale de la température due à la décharge.

- constriction des lignes de courant dans l'électrolyte au voisinage de la décharge.

- existence éventuelle d'une charge d'espace dans l'électrolyte dans cette même zone de constriction.

Ils ont constaté, en outre l'existence d'une force électrostatique quelle que soit la tension appliquée. Quand les conditions critiques sont satisfaisantes, cette force peut tirer la décharge pendant le processus de propagation.

Cependant, le mécanisme microscopique de l'action de cette force reste jusqu'à maintenant mal connu [29].

II.1.2.2. Modèle du disque circulaire:

Woodson et McElroy [33] ont essayé de reproduire, d'une façon idéale, la surface d'un isolateur par une configuration géométrique circulaire (Fig. 2.6).

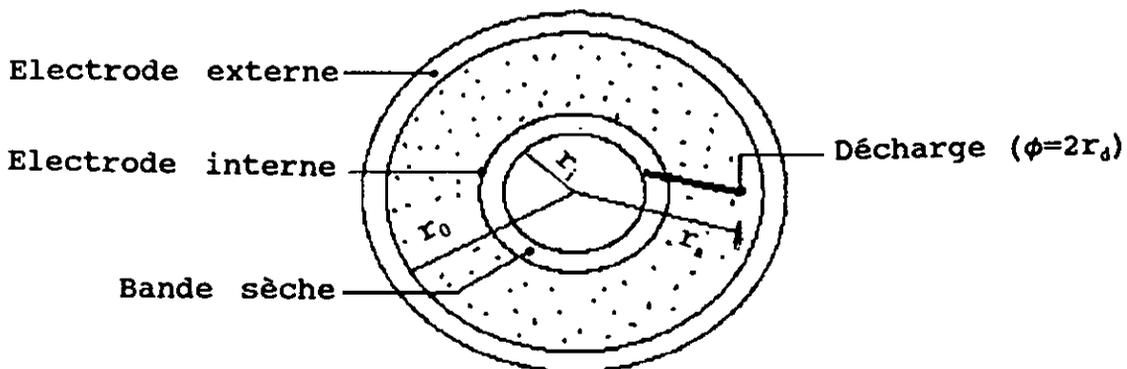


Fig. 2.6. - Modèle de disque circulaire selon Woodson et McElroy [33].

La résistivité superficielle du polluant, en se basant sur certaines hypothèses, peut s'écrire sous la forme suivante:

$$R(x) = \frac{C}{\gamma} (r_0 - r_a)^m \quad (\text{II.13})$$

où r_0 étant le rayon de l'électrode externe, γ la conductivité superficielle du polluant, r_a la position de départ de l'arc la constante $C = 1.4$ a été déterminé expérimentalement pour une résistance de pollution $R(x) = 1.6 \cdot 10^{-2} \Omega$ et m une constante.

Ce modèle n'a pas donné de résultats satisfaisants. Ils l'ont imputé à la non-uniformité de la résistivité superficielle de l'isolateur [5].

Quand à Nacke [34], il a proposé l'hypothèse que les points à la base de l'arc forment des demi-cercles aux limites des bandes sèches (Fig. 2.7.a). Ainsi la résistance de pollution se compose de deux termes: une résistance interne $R_i(x)$ propre aux deux demi-cercles, et une résistance externe $R_e(x)$ pour le reste.

Pour une largeur de bande étroite ($x_p/b \geq 2/\pi$):

$$R_i(x) = \frac{1}{\pi \gamma} \quad (\text{II.14})$$

et

$$R_e(x) = r x_p + \frac{2}{\pi \gamma} \ln\left(\frac{b}{2\pi r_d}\right) \quad (\text{II.15})$$

où $r = x_p/b$ est la résistance linéique de la pollution.

x_p est la longueur de la couche polluée (mouillée) dans les conditions critiques.

b est la largeur de la surface de l'isolateur.

r_d est le rayon de la base de l'arc.

Pour une bande large et pour un isolateur à ailette unique, la résistance externe est donnée par:

$$R_e(x) = \frac{2}{\pi\gamma} \left[0,68 + \ln\left(\frac{x_p}{I_d}\right) \right] \quad (\text{II.16})$$

Pour un isolateur à ailettes multiples:

$$R_e(x) = \frac{2}{\pi\gamma} \left[0,3 + \ln\left(\frac{x_p}{I_d}\right) \right] \quad (\text{II.17})$$

La résistance de pollution totale est telle que:

$$R(x) = P_i(x) + R_e(x) \quad (\text{II.18})$$

Wilkins [23] a obtenu, pour le même problème (Fig. 2.7.b), dans le cas d'une bande étroite:

$$R(x) = r(L-x) + \frac{1}{\pi\gamma} \ln\left(\frac{b}{2\pi I_d}\right) \quad (\text{II.19})$$

Pour une bande large:

$$R(x) = \frac{1}{\pi\gamma} \left[\ln\left(\frac{2L}{\pi I_d}\right) - \ln\left(\tan\frac{\pi x}{L}\right) \right] \quad (\text{II.20})$$

où x est la longueur d'arc et L la distance totale de fuite de l'isolateur.

Le désaccord existant entre les essais à courant continu et ceux à courant alternatif, leur a permis d'introduire un facteur

de conductivité.

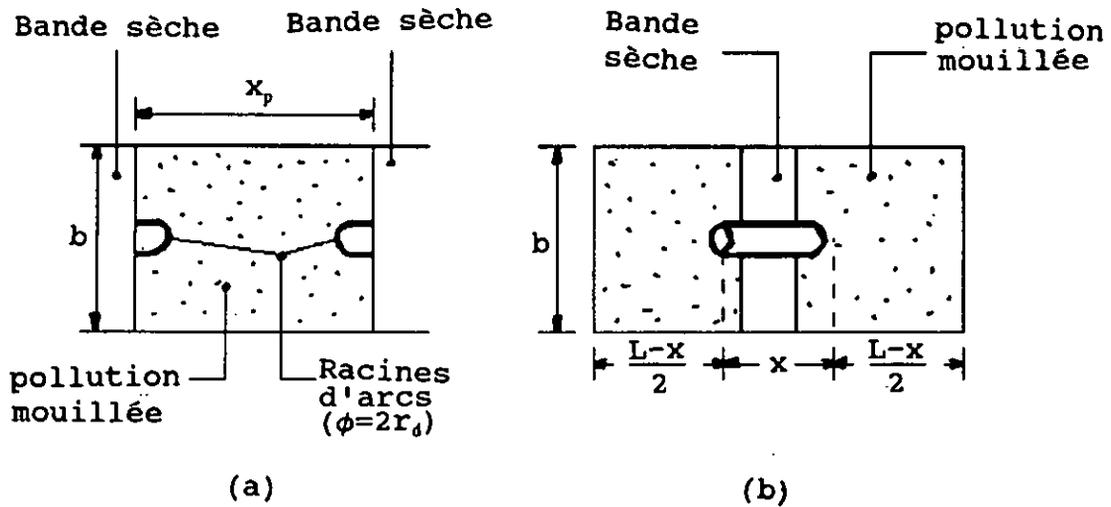


Fig. 2.7. - Représentation schématique de la surface d'un isolateur et des pointes de base de l'arc utilisé pour le calcul de la résistance de pollution selon: (a) Nacke [34], (b) Wilkins [23].

II.2. MODELES A COURANT ALTERNATIF:

Les modèles à courant alternatif développés, afin d'étudier un contournement engendré par la pollution des isolateurs, peuvent être classés en deux catégories: Modèles théoriques et Modèles expérimentaux. Chacune de ces deux catégories a ses propres caractéristiques.

II.2.1. Modèles théoriques:

En courant alternatif, l'arc s'éteint deux fois par période à chaque fois que le courant s'annule. Le réallumage de l'arc se fait par rupture énergétique et rupture diélectrique [5].

La rupture énergétique se produit immédiatement après l'annulation du courant, quand l'espace où se maintient l'arc résiduel ne parvient plus à dissiper l'énergie injectée dans le plasma. Ce type de rupture s'accompagne d'une augmentation très rapide de la tension de rétablissement. Lorsque la valeur instantanée de cette dernière dépasse la rigidité électrique, la rupture diélectrique aura lieu.

En effet, plusieurs modèles de réallumage par ruptures énergétique et diélectriques ont été élaborés.

II.2.1.1. Modèle par rupture énergétique:

En se basant sur l'équation de Mayr [35], pour un courant sinusoïdal compris entre 0,1 et 1 A, Maikopar [36] a obtenu la relation suivante:

$$\frac{R_m(x)}{R_0(x)} = \frac{2 w^2 \theta^2}{1 + 2 w^2 \theta} \quad (\text{II.21})$$

où θ est la constante de temps de l'arc de l'équation de Mayr, w la pulsation de la tension d'alimentation, $R_0(x)$ la résistance d'arc résiduel à courant nul et $R_m(x)$ la résistance à courant maximal.

Pour la constante de temps θ , l'arc dynamique présente une perte de puissance linéique A .

Concernant cette caractéristique statique de Mayr, Maikopar a choisi deux ensembles de valeurs: θ_1 et A_1 pour la période précédent l'annulation du courant et θ_2 et A_2 pour la période lui faisant suite.

Selon Brown [37], la tension critique peut prendre la forme suivante:

$$V_{cx}^2 = DA_2 R_m(x) x \quad (\text{II.22})$$

où D est une constante représentant la diffusivité thermique, x la longueur de l'arc, A₂ la puissance linéique pour la période suivant l'annulation du courant et V_{cx} la tension critique nécessaire pour l'entretien d'un arc de courant crête I.

Ainsi, la tension critique est liée au courant crête par la relation suivante:

$$V_{cx} = \frac{x A_2}{I} \sqrt{\frac{(1 + 4 w^2 \theta_1^2) (1 + 4 w^2 \theta_2^2)}{2 w^2 \theta_1^2 \quad 2 w^2 \theta_2^2}} \quad (\text{II.23})$$

où θ₁ (respectivement θ₂) est la constante de temps pour la période précédent (respectivement suivant) l'annulation du courant.

II.2.1.2. Modèle par rupture diélectrique:

Le modèle le plus représentatif est celui de Rizk [38], qui suppose que la conductance électrique de l'arc résiduel au moment de l'annulation du courant est négligeable.

Dans le cas d'un arc en série avec une résistance de pollution uniforme, Rizk a obtenu l'expression suivante:

$$\frac{V_{cx}}{L} = \frac{x}{L} E_{da} f(I) = \frac{xk}{L i^n} + \left(1 - \frac{x}{L}\right) r I \quad (\text{II.24})$$

où L est la longueur de la ligne de fuite d'un isolateur, n et k des constantes caractéristiques, E_{da} le gradient disruptif à la température ambiante, r la résistance de pollution par unité de longueur de fuite et I la valeur crête du courant alternatif.

A partir de graphiques donnant V_{cx} en fonction de x/L pour différentes valeurs de r , la tension minimale V_c nécessaire pour entretenir un arc prend la forme suivante:

$$\frac{V_c}{L} = 23 I^{0.4} V_{peak} / cm \quad (II.25)$$

II.2.2. Modèles expérimentaux:

Hurley et Limbourn [39] ont fondé leur modèle sur une relation empirique donnant la tension minimale nécessaire pour entretenir, un espace entre deux tiges, un arc dans de longueur x en série avec une résistance $R(x)$. Cette expression est la suivante:

$$V_{cx} = const x^{\frac{2}{3}} R(x)^{\frac{1}{3}} \quad (II.26)$$

La tension critique de contournement est donnée par:

$$V_c = const r^{\frac{1}{3}} L_a^{\frac{2}{3}} L^{\frac{1}{3}} \quad (II.27)$$

où L_a est la longueur d'arc minimale.

Claverie et Porcheron [2] ont proposé un modèle plan recouvert d'une couche continue de pollution (Fig. 2.8).

L'expression empirique donnant la tension d'entretien d'un arc de longueur x pour un courant de fuite i est la suivante:

$$V_{arc} = \frac{800x}{\sqrt{i}} \quad (II.28)$$

La tension de contournement a la forme suivante:

$$V_c = 90 [x_c^2 R(x)]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{II.29})$$

où $R(x)$ peut s'exprimer par une relation de la forme:

$$R(x) = \rho F(x) \quad (\text{II.30})$$

avec ρ représente la résistivité superficielle, $F(x)$ la fonction de répartition de la couche polluante et x_c est la racine de:

$$\frac{d}{dx} [x^2 F(x)] = 0 \quad (\text{II.31})$$

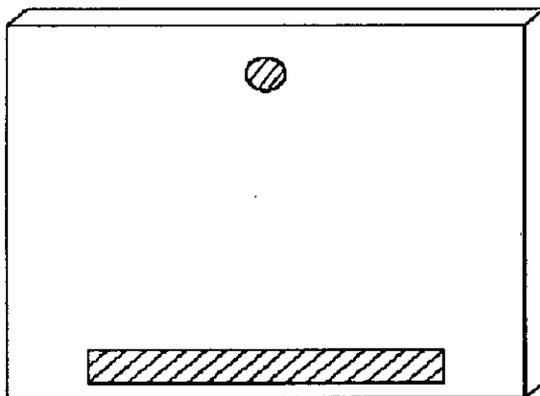


Fig. 2.8. - Dispositif expérimental utilisé par Claverie et Porcheron [2].

Dans le cas d'un modèle linéaire, la longueur d'arc critique est donnée par:

$$x_c = \frac{2L}{3} \quad (\text{II.32})$$

La tension de contournement dans ces condition est:

$$V_c = 47,6 r^{\frac{1}{3}} L \quad (\text{II.33})$$

II.3. CONCLUSION:

Les considérations théoriques qui viennent d'être présentées sont d'une grande utilité pour le dimensionnement des isolateurs. Elles conduisent à dégager les grandes lignes du comportement des isolateurs sous pollution. Elles sont cependant insuffisantes lors du passage à l'application pratique principalement à cause des hypothèses simplificatrices rendues nécessaires par traitement mathématique: géométrie de la surface isolante, homogénéité de la pollution,

De plus, la modélisation fait un appel à des paramètres qu'il y a lieu de mesurer. Enfin, il est clair que lorsqu'il s'agit de comparer les performances de divers types d'isolateurs afin de sélectionner ceux qui présentent le meilleur comportement sous pollution, l'étude expérimentale constitue en définitive le meilleur garant d'un jugement objectif.

CHAPITRE 3

ETUDE MATHEMATIQUE DES ISOLATEURS POLLUES BASEE SUR LE MODELE DE CLAVERIE ET PORCHERON

Afin de faire des estimations préliminaires des contraintes critiques et des courants critiques et pour tenter d'expliquer qualitativement les phénomènes d'arcs observés sur les surfaces polluées en particulier, nous avons établi un programme basé sur le modèle de Claverie et Porcheron [2].

Dans le but d'éviter les incidents engendrés par le contournement, il est très intéressant pour l'exploitant, de disposer d'un moyen de surveillance du degré de pollution des isolateurs afin d'intervenir à temps.

En effet, notre étude permet de montrer qu'il est possible de surveiller le degré de pollution des isolateurs d'un ouvrage, en mesurant simplement le niveau des pointes du courant de fuite.

III.1. FORMULATION MATHÉMATIQUE DU MODÈLE:

III.1.1. Etablissement des équations fondamentales:

Le modèle considéré dans l'étude du développement de l'arc électrique, est constitué par une surface isolante plane, polluée et partiellement contournée (Fig. 3.1).

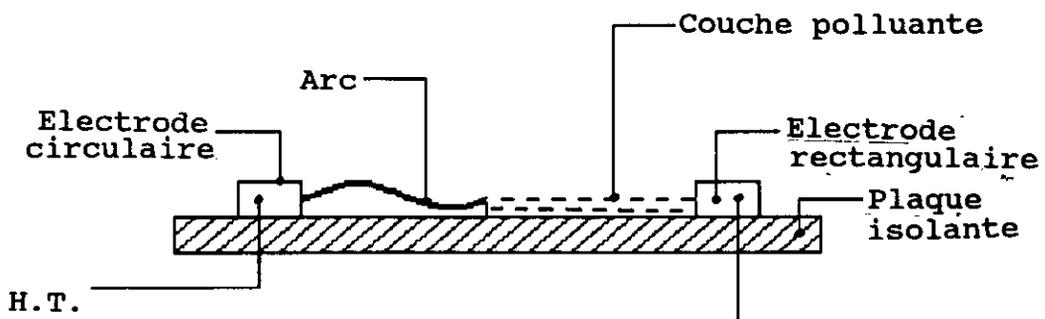


Fig. 3.1. - Circuit considéré dans l'étude du développement de l'arc électrique.

III.1.1.1. Equation du circuit:

Entre les électrodes, le circuit électrique est constitué d'un arc de longueur x en série avec la résistance de la couche polluante $R(x)$ et parcouru par un courant de fuite i (Fig. 3.2).

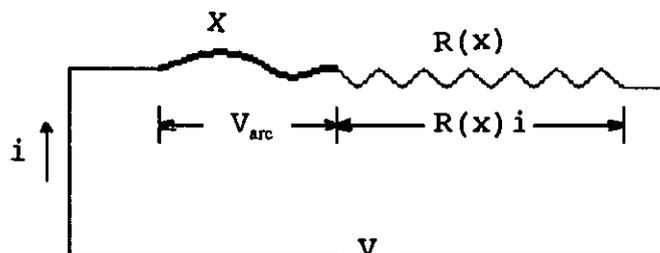


Fig. 3.2. - Circuit électrique équivalent.

La tension V est la somme de la tension d'arc et celle aux bornes de la résistance constituée par la couche polluante; soit:

$$V = V_{\text{arc}} + R(x) i \quad (\text{III.1})$$

III.1.1.2. Tension d'arc:

Des mesures effectuées en courant alternatif, en établissant un arc entre une tige métallique et la surface libre d'une solution de chlorure de sodium [17], ont permis d'établir la relation approchée donnant la tension d'arc en fonction du courant de fuite et de la longueur d'arc:

$$V_{\text{arc}} = \frac{100x}{\sqrt{i}} \quad (\text{III.2})$$

III.1.1.3. Fonction caractéristique de répartition de la couche polluante:

La résistance de la couche polluante $R(x)$, en série avec l'arc, dépend de la longueur, de la position, ainsi que de la direction de l'arc. Dans ce qui suit, nous considérons que le développement de l'arc se fait le long de l'axe $\alpha\alpha'$ (Fig. 3.3).

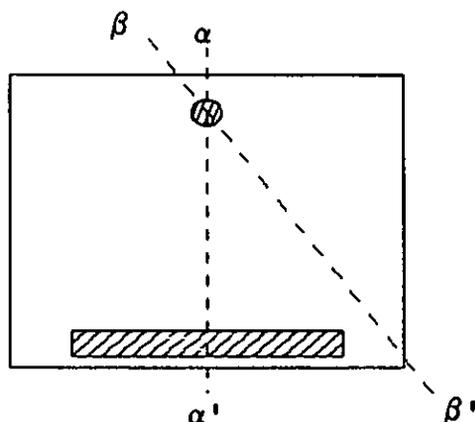


Fig. 3.3. - Modèle plan considéré pour l'étude de la propagation des arcs électriques.

Si, en tous points de la surface polluée, la résistivité ρ de la couche polluante est la même, la fonction caractéristique de répartition de la couche polluante $R(x)$ peut être considérée comme étant le produit de la résistivité ρ par une certaine fonction $F(x)$, dite "fonction de répartition de la couche polluante". Cette fonction de répartition $F(x)$ dépend des caractéristiques géométriques de la surface isolante, de la répartition de la pollution et de la direction de l'arc le long de cette surface. Ainsi, nous pouvons écrire:

$$R(x) = \rho F(x) \quad (\text{III.3})$$

Cette relation est similaire à celle donnée par la Commission Electrotechnique Internationale (CEI-60-1) [14].

En utilisant les fonctions qui viennent d'être définies, nous sommes en mesure d'écrire l'équation du circuit sous la forme suivante:

$$V = \frac{100x}{\sqrt{i}} + R(x) i \quad (\text{III.4})$$

ou encore:

$$V = \frac{100x}{\sqrt{i}} + \rho F(x) i \quad (\text{III.5})$$

III.1.2. Condition limite de maintien de l'arc électrique en courant alternatif:

Sous tension alternative, la forme d'onde du courant de fuite a l'allure représentée à la figure 3.4.

A la fin de chaque alternance le courant est interrompu puis réapparaît quelques instants plus tard lorsque la tension est suffisante pour provoquer le réamorçage de l'arc.

Ce réamorçage correspond, en fait, à une brusque augmentation de la conductivité du canal ionisé qui demeurerait après extinction de l'arc précédent.

On conçoit bien que ce réamorçage ne s'effectue pas dans tous les cas et que l'arc ne pourra se maintenir ou se développer que sous certaines conditions (conductivité, phénomènes d'échange thermique, ...).

Suivant certaines considérations basées sur de nombreuses études relatives à la densité ionique dans le canal ionisé [40], [41], aux phénomènes d'échanges thermiques, ..., Claverie et Porcheron ont établi la condition de réamorçage suivante:

$$V \geq \frac{kx}{i^n} \quad (\text{III.6})$$

où V la tension appliquée aux bornes des électrodes, k et n sont des constantes caractéristiques qui peuvent être déterminées à partir de la mesure du courant de fuite sous différentes tensions d'essais.

Avant le réamorçage de l'arc électrique, le courant i étant négligeable. En effet, le terme $R(x)i$ est peu différent de zéro.

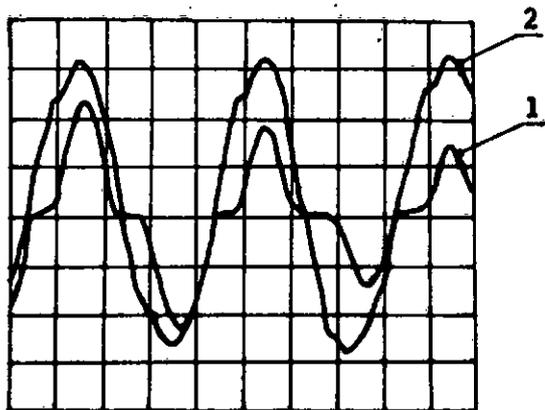


Fig. 3.4. - 1: Courant de fuite dans l'arc.
2: Tension appliquée à la plaque isolante.

III.1.3. Hypothèse simplificatrice:

Notons que rien ne justifie physiquement le fait que les exposants associés au courant de fuite dans les expressions de

la tension d'entretien de l'arc (III.2) et de la tension de réallumage (III.6) doivent avoir la même valeur. Seule une raison pratique peut justifier un tel choix: simplifier les calculs analytiques [5].

Ainsi, la tension appliquée entre les deux électrodes peut s'écrire sous la forme:

$$V = \frac{100X}{i^n} + R(X) i \quad (\text{III.7})$$

III.1.4. Longueur d'arc maximale en fonction de la tension et de la pollution:

La condition de réamorçage n'est remplie que si la tension donnée par l'expression (III.7) vérifie la relation (III.6). Cependant, ces relations permettent d'analyser le mécanisme d'apparition, puis de développement de l'arc sur les surfaces polluées.

En se basant sur l'étude de Claverie et Porcheron, nous pouvons déduire que la tension V , le courant maximale I et la longueur maximale d'arc X , pour une résistivité ρ donnée, seront liés par la relation fondamentale suivante:

$$VI^n = kX \quad (\text{III.8})$$

Cette relation est valable quelques soient la conductivité et la répartition de la couche polluante.

III.1.5. Tension appliquée en fonction de la pollution:

La relation entre la tension V en fonction de la longueur d'arc maximale X et la résistance de la couche polluante $R(X)$

s'obtient en éliminant $I(=i)$ entre les équations (III.7) et (III.8):

$$V = \frac{k}{(k-100)^{\frac{n}{n+1}}} \left[X^{\frac{1}{n}} R(X) \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{III.9})$$

Cette relation peut encore s'écrire:

$$\frac{V}{\rho^{\frac{n}{n+1}}} = \frac{k}{(k-100)^{\frac{n}{n+1}}} \left[X^{\frac{1}{n}} F(X) \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{III.10})$$

Ces relations lient donc la longueur d'arc maximale X à la tension V et aux caractéristiques de la couche de pollution (résistivité ρ et répartition de cette couche à la surface de l'isolateur $F(X)$).

III.1.6. Contournement:

Les expressions (III.9) et (III.10) sont considérées comme fonctions de X uniquement, car la résistivité ρ de la couche polluante étant constante. Elles présentent un même maximum V_c pour la valeur de la longueur d'arc $X=X_c$. Pour les valeurs de tensions appliquées inférieures à V_c , nous avons établi un régime stable.

Les valeurs de tensions, courants et longueurs d'arcs sont reliées par les relations (III.8) et (III.9) ou (III.10). Dès que la tension dépasse V_c , l'arc se développera et atteindra l'autre électrode en provoquant le contournement du dispositif; c'est le régime instable. La limite entre le régime stable et le régime instable est dite "état critique".

A l'état critique correspond donc une tension critique, ou tension de contournement V_c , qui apparaît comme la tension qui ne serait être dépassée sans que le contournement du dispositif isolant ne se produise. Cet état peut être caractérisé par l'ensemble des relations suivantes:

$$V_c = \frac{k}{(k-100)^{\frac{n}{n+1}}} \left[X_c^{\frac{1}{n}} R(X_c) \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{III.11})$$

$$V_c I_c^n = k X_c \quad (\text{III.12})$$

où X_c est la racine de:

$$\frac{d[X^{\frac{1}{n}} R(X)]}{dX} = 0 \quad (\text{III.13})$$

ou également:

$$\frac{V_c}{\rho^{\frac{n}{n+1}}} = \frac{k}{(k-100)^{\frac{n}{n+1}}} \left[X_c^{\frac{1}{n}} F(X_c) \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{III.14})$$

$$V_c I_c^n = k X_c \quad (\text{III.15})$$

et X_c est la racine de:

$$\frac{d[X^{\frac{1}{n}} F(X)]}{dX} = 0 \quad (\text{III.16})$$

III.1.7. Corrélation entre courant de fuite et tension de contournement - Coefficient de sécurité de l'isolement pollué:

Si la fonction de répartition de la couche polluante $F(X)$ est connue, il est possible de définir un coefficient de sécurité de l'isolement pollué. Ce coefficient est donné par le rapport de la tension appliquée V à la tension de contournement V_c correspondant au degré de pollution actuel de l'isolement considéré. L'écart séparant la tension appliquée et la tension de contournement caractérise en fait la marge de sécurité du dispositif isolant.

En effet, d'après les relations (III.10) et (III.14) nous pouvons écrire:

$$C_s = \frac{V}{V_c} = \left[\frac{X^{\frac{1}{n}} F(X)}{X_c^{\frac{1}{n}} F(X_c)} \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{III.17})$$

Le coefficient C_s apparaît donc comme étant une fonction de X seulement, car X_c est constante lorsque $F(X)$ demeure inchangée.

Nous définissons P comme étant le produit de la tension V par le courant I élevé à la puissance n , soit par le produit de la constante k par la longueur d'arc X :

$$P = VI^n = kX \quad (\text{III.18})$$

Par suite, le produit critique P_c est tel que:

$$P_c = V_c I_c^n = kX_c \quad (\text{III.19})$$

A partir des relations (III.18) et (III.19), il est clair que X peut s'exprimer en fonction du rapport P/P_c puisque:

$$X = \frac{P}{P_c} X_c \quad (\text{III.20})$$

En définitive, le coefficient de sécurité pourra donc être considéré comme étant une fonction du rapport P/P_c:

$$C_s = \frac{V}{V_c} = \left[\frac{\left(\frac{P}{P_c}\right)^{\frac{1}{n}} F\left(\frac{P}{P_c} X\right)}{F(X_c)} \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{III.21})$$

III.1.8. Caractéristiques des couches polluantes naturelles:

Nous pourrions, à première vue, penser que le degré de pollution d'un isolateur peut être caractérisé par la résistivité (ou la conductivité) superficielle de la couche polluante qui le recouvre.

Cependant, cette façon de faire supposerait implicitement que la couche polluante est uniformément répartie, ce qui n'est évidemment pas exact pour la plupart des isolateurs pollués naturellement.

Pour tenir compte de la répartition de la couche de pollution, il est donc bien préférable de caractériser l'état de l'isolateur pollué par la caractéristique R(X). Comme nous l'avons vu, cette fonction définit parfaitement le comportement de l'isolateur. En effet, elle permet de caractériser l'état critique, en calculant la tension de contournement, la longueur d'arc critique et le courant critique.

III.1.8.1. Détermination de la fonction caractéristique de la couche polluante:

Pour déterminer la fonction caractéristique de la couche polluante $R(X)$ sur un isolateur pollué, deux méthodes peuvent être utilisées. La première consiste en une méthode de mesure directe dans laquelle le contact de la racine d'arc avec la couche polluante est simulé au moyen d'une électrode auxiliaire que l'on déplace sur la surface de l'isolateur [2]. La seconde est une méthode indirecte basée sur l'interprétation des mesures de courant de fuite.

Dans ce qui suit, du moment que notre sujet représente une étude mathématique, nous nous intéressons à la méthode indirecte.

Les valeurs de la fonction $R(X)$ peuvent être déterminées à partir de mesures de courants de fuites. Le système constitué par les équations (III.7) et (III.8) permet de calculer X et $R(X)$ à partir de V et I puisque:

$$X = \frac{VI_c^n}{k} \quad (\text{III.22})$$

et

$$R(X) = \frac{k-100}{k} \frac{V}{I} \quad (\text{III.23})$$

Ainsi pour déterminer la fonction $R(X)$, il suffira de mesurer le courant de fuite maximal I sous différentes tensions d'essais V . Cette méthode de mesure, plus facilement utilisable que la méthode directe, conduit évidemment à des résultats analogues [2]. Elle peut être utilisée sur un site aussi bien qu'en laboratoire.

III.1.8.2. Propriétés des fonctions de répartitions des couches polluantes:

Les déterminations de $R(X)$ pour différents types d'isolateurs, provenant de sites pollués divers, ont conduit à définir les propriétés suivantes des couches polluantes naturelles:

- La fonction $R(X)$ peut être décomposée en un produit de deux termes ρ et $F(X)$.

- La fonction de répartition $F(X)$ est indépendante du site donc du type de pollution, et dépend essentiellement de la forme géométrique de l'isolateur considéré et de la répartition de la couche polluante sur les surfaces des isolateurs.

- Dans un même site, la résistivité de l'électrolyte constituant la couche polluante ρ atteint après une assez longue période d'exposition une valeur maximale limite identique pour tous les types d'isolateurs. Cette résistivité maximale est variable d'un site à l'autre.

Autrement dit, $R(X)$ s'écrit pour la plupart des isolateurs pollués:

$$R(X) = \rho F(X) \quad \text{(III.24)}$$

$F(X)$ étant une fonction, de répartition de la couche polluante, liée à l'isolateur et ρ un paramètre lié au site.

La généralisation de ces deux propriétés peut, à priori, paraître discutable. Il est certain, qu'elles ne sont pas strictement vérifiées dans tous les cas. Cependant, la fonction $F(X)$ peut, pour un même type d'isolateur, varier légèrement d'un site à l'autre. De même ρ n'est pas exactement identique pour tous les isolateurs d'un site.

L'expérience montre qu'en admettant que toutes les couches polluantes naturelles possèdent les propriétés précédentes, les résultats pratiques que l'on obtient sont suffisamment proches de la réalité pour que l'on puisse considérer ces approximations comme justifiées [2].

En se basant sur les expressions précédentes ((III.23) et (III.24)), la fonction de répartition des couches polluantes $F(X)$ peut s'écrire sous la forme:

$$F(X) = \frac{1}{\rho} \frac{k}{k-100} \frac{V}{I} \quad (\text{III.25})$$

Sachant que la longueur d'arc est donné par la relation (III.22).

III.1.8.3. Caractérisation du degré de pollution d'un site - Salinité équivalente:

Pour établir la représentativité d'un essai artificiel, il sera bien préférable de comparer les fonctions caractéristiques $R(X)$ correspondant aux pollutions artificielle et naturelle au lieu de se borner à des comparaisons de tensions de contournement qui ne peuvent à elles seules garantir cette représentativité avec certitude.

Afin d'être en mesure de dimensionner convenablement les isolateurs susceptibles d'assurer un service sans défaillance dans un site pollué, il est indispensable de savoir caractériser quantitativement la sévérité de la pollution de ce site.

En se référant à titre d'exemple à l'essai sous pollution saline artificielle, il est possible, en fait, de caractériser plus simplement et avec une meilleure précision la sévérité de la pollution du site considéré.

En effet, à 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 sera ainsi caractérisée par la "salinité équivalente".

Cependant, la détermination de la sévérité d'un site telle qu'elle vient d'être définie consiste, en fait, à rechercher la concentration de la solution saline de l'essai artificiel qui donne, pour tous les différents types d'isolateurs des fonctions caractéristiques $R(X)$ qui soient identiques à celles que l'on observe dans le site considéré.

Compte tenu des propriétés des couches polluantes naturelles et artificielles d'une part, et de la représentativité de l'essai de laboratoire d'autre part, on peut assurer que l'identité des fonctions $R(X)$ (propre à chaque type d'isolateur) est obtenue si l'on vérifie l'égalité des valeurs de $R(X)$ pour une seule valeur de X . Or, l'égalité des valeurs de $R(X)$ entraîne pour deux isolateurs identiques, alimentés sous la même tension, l'égalité des courants de fuite.

En effet, d'après les relations (III.8) et (III.23) pour un isolateurs pollué naturellement:

$$V_1 I_1^n = kX_1 \quad (\text{III.26})$$

$$R_1(X) = \frac{k-100}{k} \frac{V_1}{I_1} \quad (\text{III.27})$$

et pour le même isolateur essayé sous pollution saline:

$$V_2 I_2^n = kX_2 \quad (\text{III.28})$$

$$R_2(X) = \frac{k-100}{k} \frac{V_2}{I_2} \quad (\text{III.29})$$

Si sous tension: $V=V_1=V_2$; $I_1=I_2=I$, nous déduisons: $X_1=X_2=X$; $R_1=R_2=R$ et réciproquement.

En pratique, la salinité équivalente d'un site sera déterminée de la manière suivante:

- dans le site pollué, les courants de fuite maximaux seront mesurés sur deux ou trois types d'isolateurs, alimentés sous une tension voisine de leur tension normale d'utilisation.

- Des essais seront effectués en laboratoire sur des isolateurs de même type, toujours alimentés sous leur tension d'utilisation. On mesurera le courant de fuite pour plusieurs concentrations de la solution pulvérisée.

- La salinité équivalente du site correspondra à la concentration pour laquelle les courants de fuite sont voisins de ceux mesurés in situ.

III.2. SIMULATION NUMERIQUE:

Afin d'intervenir à temps pour éviter les incidents provoqués par le contournement, notre étude a pour intérêt de disposer d'un moyen de surveillance du degré de pollution des isolateurs pollués. La détermination du coefficient de sécurité de l'isolement pollué apporte une solution à ce problème.

Le modèle mathématique élaboré dans notre étude, concernant le développement de la décharge électrique sur une surface d'un isolateur pollué, est basée surtout sur la connaissance de la fonction caractéristique $R(X)$, donc de la fonction de répartition de la couche polluante $F(X)$. Celles-ci représentent la clé de

notre travail.

Les essais au laboratoire permettent de mesurer les courants de fuite et les longueurs d'arcs sur les surfaces polluées, pour différents niveaux de tensions d'application et éventuellement pour différentes résistivités.

A partir de ces valeurs expérimentales pour une résistivité donnée, nous avons la possibilité de déterminer les valeurs des constantes caractéristiques statiques de l'arc.

Pour cela, nous avons utilisé le logiciel EUREKA permettant de déterminer ces constantes, à partir des valeurs expérimentales de la tension d'essai, du courant de fuite et de la longueur d'arc, avec une précision de 10^{-5} .

En effet, nous pouvons déterminer les valeurs de la fonction caractéristique de la couche de pollution $R(X)$ à l'aide de l'expression (III.23).

Connaissant les valeurs de X et $R(X)$, nous pouvons ainsi déterminer, à l'aide d'une méthode approximative (Householder ou moindres carrés [42] à titre d'exemple), les coefficients de la fonction $R(X)$ permettant la formulation d'un polynôme simple et linéaire.

Ce polynôme de degré $(T=M-1)$ défini sur $X \in [0, L]$ (L étant la longueur de fuite totale de l'isolateur), peut être représenté par la relation suivante:

$$R(X) = C_1 + C_2 X + C_3 X^2 + \dots + C_M X^{M-1} \quad (\text{III.30})$$

où C_j , j variant de 1 à M , sont les coefficients du polynôme simple $R(X)$.

Le degré $T=M-1$ du polynôme considéré varie progressivement de 1 à T_{\max} jusqu'à avoir la plus faible erreur possible [42]. Cette erreur consiste en la valeur absolue de la différence entre la fonction réelle et celle approchée (de l'ordre de 10^4).

En supposant que la résistivité ρ est la même en chaque point de la surface polluée, nous pouvons déduire le polynôme de la fonction de la répartition de la couche polluante $F(X)$ à partir de la relation (III.25).

Une fois le polynôme de la fonction caractéristique $R(X)$ (respectivement de la fonction de répartition de la couche de pollution $F(X)$) est déterminé, il est facile d'estimer la valeur de la longueur critique de l'arc qui représente la racine de la relation (III.13) (respectivement de la relation (III.16)) par une méthode itérative de type $P(x)=0$. Dans notre cas, nous avons utilisé la méthode de dichotomie [42] approximant la racine X_c à une erreur de 10^{-6} près.

Nous évaluons en suite la tension critique V_c , le courant critique I_c , le produit P , le produit critique P_c , ainsi que le coefficient de sécurité de l'isolement pollué C_s pour chaque longueur d'arc X d'après les relations (III.11), (III.12), (III.18), (III.19) et (III.21) respectivement.

En faisant varier la résistivité de la couche polluante ρ , nous pouvons tirer les différentes valeurs de la tension d'essai et du courant de fuite (la fonction de répartition de la couche de pollution $F(X)$ demeure inchangée).

Enfin, nous sommes en mesure de tracer toutes les caractéristiques décrivant les phénomènes de contournement sur des surface polluées.

En effet, les principales étapes déterminant l'algorithme de simulation sont:

- Etape 1:** Détermination des constantes caractéristique k et n à partir des valeurs expérimentales de la tension d'essai V , du courant de fuite I et de la longueur d'arc X , à l'aide de la relation (III.8).
- Etape 2:** Calcul de la fonction caractéristique de la couche polluante $R(X)$ pour chaque valeur de X à l'aide de l'expression (III.23).
- Etape 3:** Détermination des coefficients C_j (j variant de 1 à M) de la fonction caractéristique à partir des valeurs de X et $R(X)$ à l'aide d'une méthode itérative. Le choix de M correspond à erreur minimale de modélisation commise sur le calcul de ces coefficients
- Etape 4:** Formulation d'un polynôme $R(X)$ simple et linéaire de degré $(M-1)$ d'après la relation (III.30).
- Etape 5:** Dédution du polynôme de la fonction de répartition $F(X)$ à partir de l'expression (III.25), en supposant que la résistivité ρ est la même en tout point de la surface polluée.
- Etape 6:** Détermination de la valeur de la longueur critique de l'arc représentant la racine des relations (III.13) ou (III.16).
- Etape 7:** Evaluation de la tension critique V_c , du courant de fuite critique I_c , du produit P , du produit critique P_c , et du coefficient de sécurité C_s d'après les relations (III.11), (III.12), (III.18), (III.19) et (III.21) respectivement.
- Etape 8:** Evaluation de la tension d'essai et du courant de fuite pour différentes résistivités (la fonction de $F(X)$ demeure inchangée).

Etape 9: Exploitation des résultats.

III.3. VALIDATION:

Une étude expérimentale en laboratoire a été effectuée par Claverie et Porcheron [2] pour étudier les processus d'apparition et de développement des arcs électriques à la surface d'une plaque isolante polluée de préférence à un isolateur réel. Ce dispositif facilite en effet, les observations et les mesures nécessaires à l'analyse des phénomènes.

III.3.1. Dispositif expérimental:

Ce dispositif est constitué d'une plaque de porcelaine vernie munie de deux électrodes en cuivre l'une circulaire mise à la haute tension et l'autre rectangulaire mise à la terre.

La couche polluante est réalisée en pulvérisant à la surface de la plaque une solution de chlorure de sodium dont la conductivité désirée est obtenue suivant la concentration de la solution considérée (Fig. 3.5).

La tension alternative (de fréquence 50 Hz) appliquée entre les deux électrodes est réglable à une valeur comprise entre 5 et 100 kV.

Le courant de fuite est mesuré ou enregistré à travers une résistance 50Ω insérée dans le retour de terre de la plaque isolante.

En outre, l'enregistrement du développement de la décharge est réalisé par l'intermédiaire d'un appareil photographique classique ou d'une caméra ultra-rapide, synchronisés avec le dispositif d'enregistrement du courant.

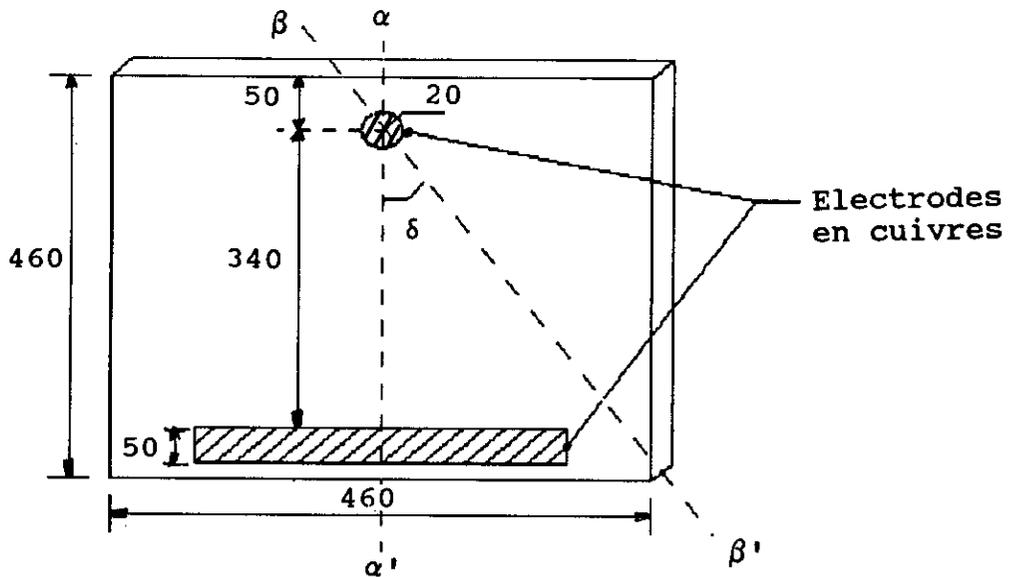


Fig. 3.5. - Dispositif expérimental utilisé par Claverie et Porcheron [2].

III.3.2. Résultats obtenus par simulation:

Claverie et Porcheron ont effectué des essais au laboratoire. Ces essais ont été basés sur les mesures du courant de fuite et des longueurs de décharges électriques sur les surfaces polluées pour des niveaux de tensions et des résistivités superficielles ($\rho = 25, 50, 100, 200$ et $400 \Omega \cdot \text{cm}$) différents.

En injectant, pour une résistivité donnée, leurs valeurs expérimentales de la tension d'essais, de la longueur d'arc du courant de fuite, ainsi que les valeurs des constantes caractéristiques dans le programme élaborés, nous avons pu tracer les caractéristiques des figures 3.6. à 3.11.

Les constantes caractéristiques k et n ont été trouvées respectivement égales à 800 et 0,5.

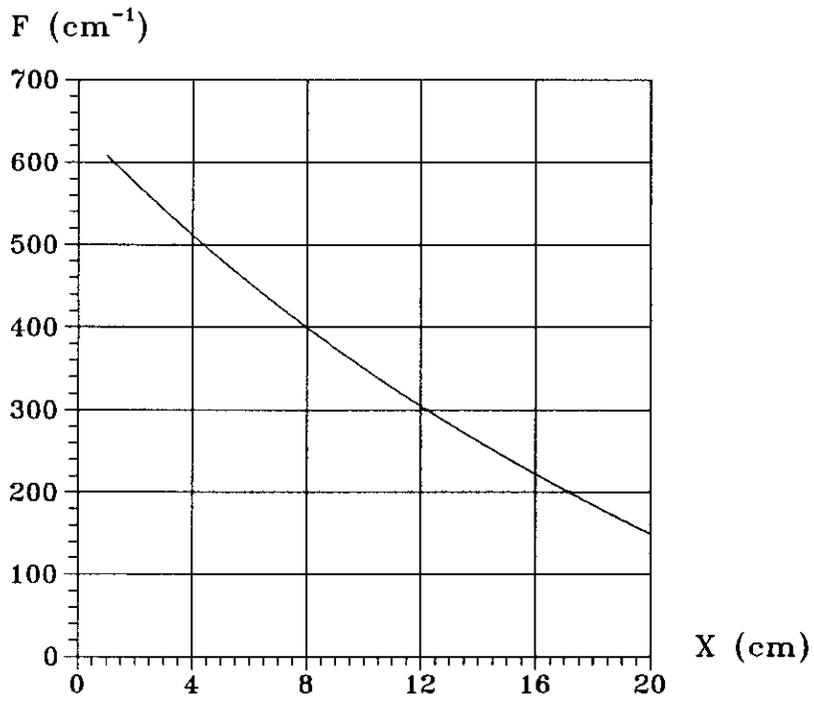


Fig. 3.6. - Fonction caracteristique de repartition de la pollution en fonction de la longueur d'arc.

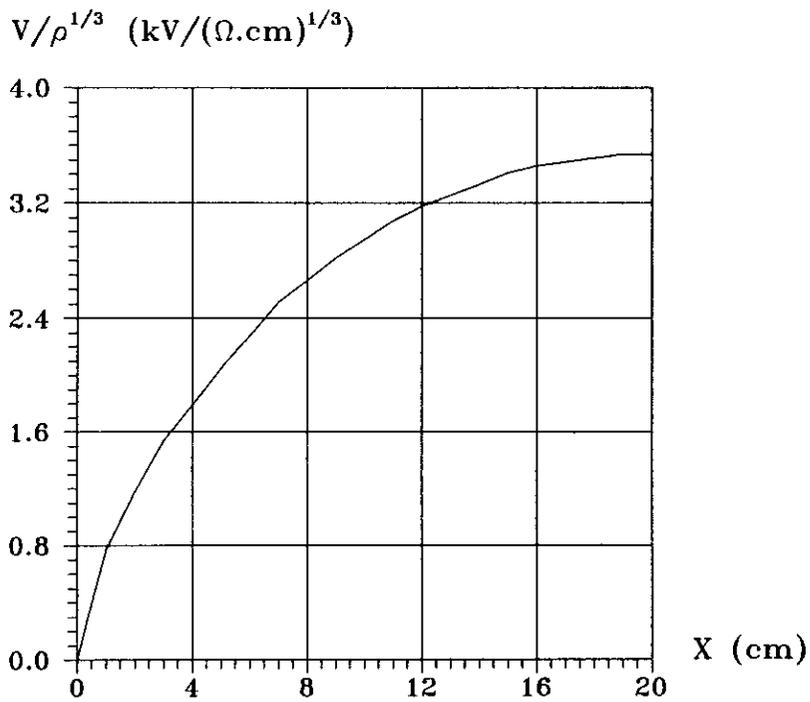


Fig. 3.7. - Tension d'essai sur la resistivite elevee a la puissance 1/3 en fonction de la longueur d'arc.

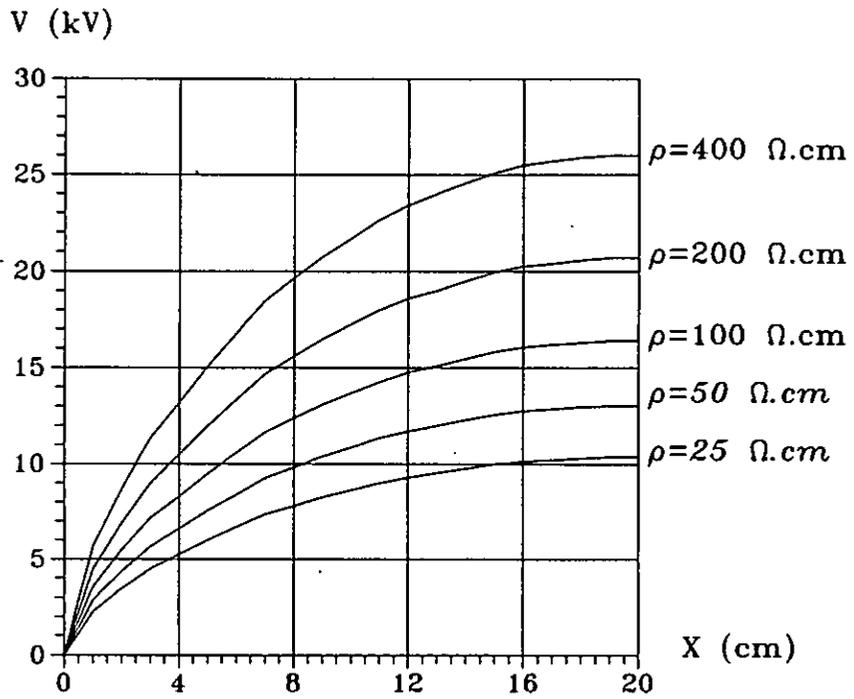


Fig. 3.8. - Tension d'essai en fonction de la longueur d'arc pour differentes resistivites.

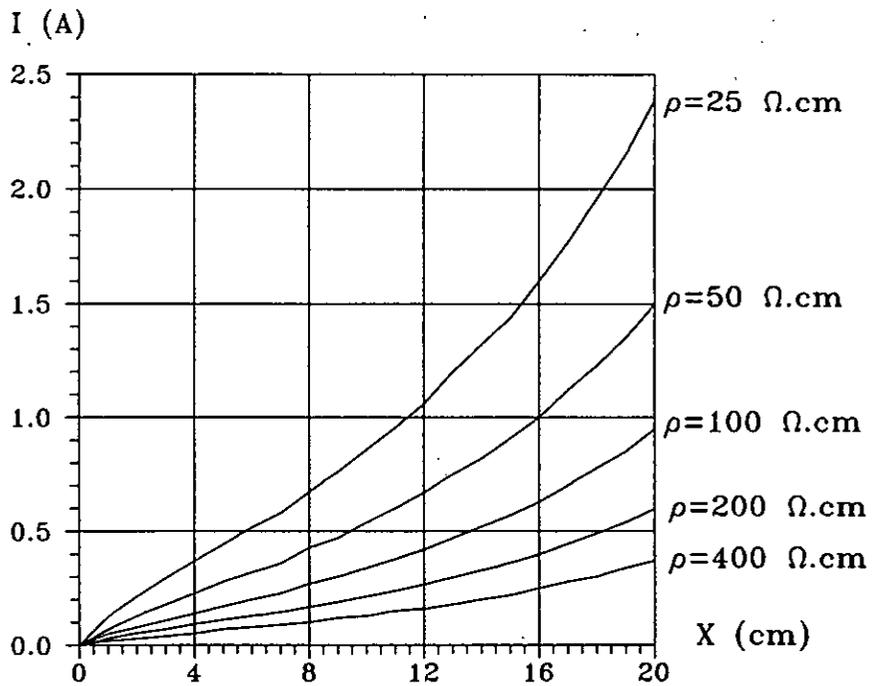


Fig. 3.9. - Courant de fuite en fonction de la longueur d'arc pour differentes resistivites.

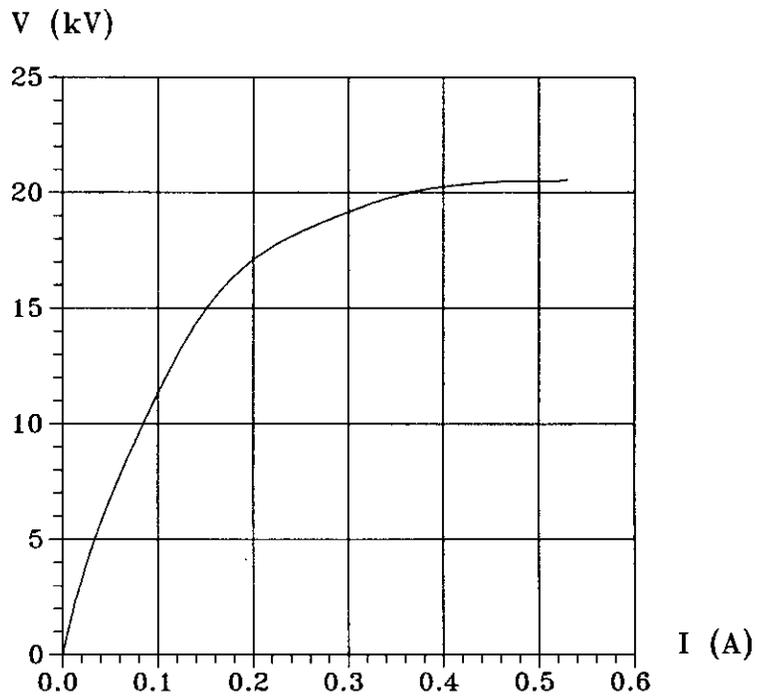


Fig. 3.10. - Tension d'essai en fonction du courant de fuite ($\rho=200 \Omega.cm$).

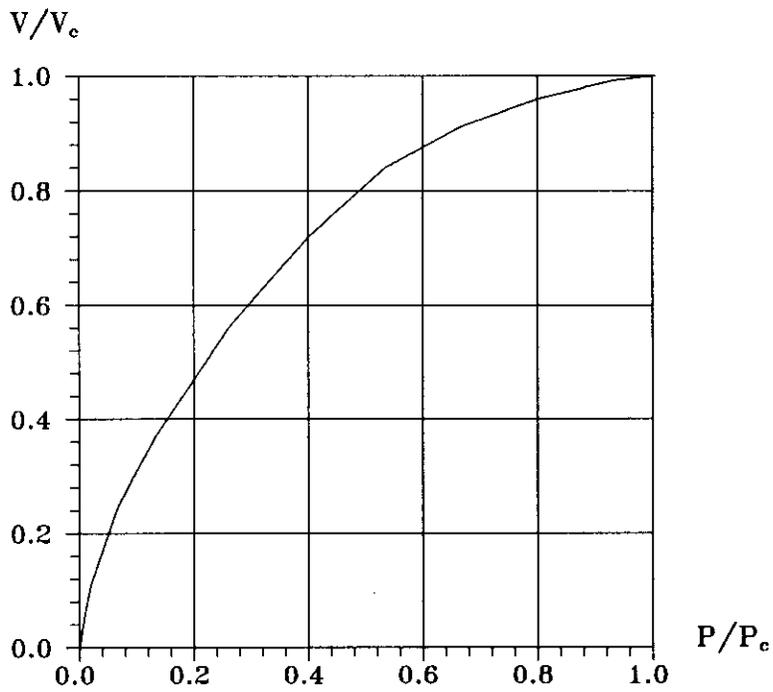


Fig. 3.11. - Coefficient de securite en fonction du produit relatif.

III.4. CONCLUSION:

Nous constatons, à partir de cette étude numérique:

- qu'il existe une longueur d'arc critique indépendante de la résistivité de la couche polluante.

- que le contournement, d'une façon générale, dépend de la résistivité de la pollution ainsi que de la répartition de la couche polluante.

- que le coefficient de sécurité est évalué à partir d'une mesure du courant de fuite uniquement.

- que le produit critique est indépendant de la résistivité de la couche de pollution et dépend seulement de la répartition de cette couche polluante donc des caractéristiques géométriques de l'isolateur.

Notre modèle mathématique, ainsi que ceux proposés par d'autres chercheurs [5], se basent sur des hypothèses simplificatrices. En ce qui concerne notre cas, la résistivité de la couche polluante doit être la même en tout point de la surface polluée. En effet, le modèle proposé n'est valable que dans un cas de configuration où la couche de pollution recouvre entièrement la surface de l'isolateur: c'est le cas de la couche de pollution continue et uniformément répartie.

En outre, le modèle proposé, basé sur le modèle de Claverie et Porcheron, nous a permis en fait d'obtenir les différentes caractéristiques concernant le développement de l'arc électrique sur une surface isolante polluée.

La concordance entre les caractéristiques expérimentales et celles obtenues par simulation justifie la validité du programme élaboré. Par conséquent, nous pouvons l'utiliser pour d'autres configurations; il s'agit de la pollution désertique qui

représente l'objectif du chapitre suivant.

Notons que pour les besoins de l'étude mathématique, nous avons considéré le développement d'un arc le long de l'axe $\alpha\alpha'$. Cependant il est possible d'effectuer une étude similaire pour toute autre direction, par exemple l'axe $\beta\beta'$ (Fig.3.3). Nous obtiendrons ainsi des relations analogues à celles que nous avons déjà établies. Les valeurs numériques seront évidemment différentes puisque la fonction de répartition de la couche polluante dépend de la direction considérée.

CHAPITRE 4

ETUDE MATHEMATIQUE DE LA PROPAGATION DE L'ARC ELECTRIQUE SUR DES SURFACES POLLUEES EN REGIONS DESERTIQUES AU SAHARA SEPTENTRIONAL EST ALGERIEN

En Algérie, certains travaux ont été déjà effectués au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, en collaboration avec la SONEGAS, pour différentes zones du pays [43], [44]. Ces travaux avaient pour but d'observer l'impact de la pollution sur l'isolement des ouvrages de haute tension pour différents types de pollution.

Ce chapitre a pour objectif d'obtenir les différentes caractéristiques pour les ouvrages installés en zones désertiques, se trouvant au Sahara Septentrional Est Algérien; il s'agit de la région électrique de Hassi-Messaoud et celle de Hassi-R'mel. Ceci est valable pour deux configurations: cas de la couche de pollution continue et celui de la couche discontinue. En effet, une analyse des incidents dûs aux contournements (défaut sur les lignes de haute tension) [6] a permis de relever 28 incidents à Hassi-Messaoud et 45 à Hassi-R'mel. Ces incidents sont tous de type "contournements évidents".

La région électrique de Hassi-Messaoud est constituée de quatre (04) zones: Hassi-Messaoud, Ouargla, Tougourt et El-Oued. Tandis que celle de Hassi-R'mel, elle comporte six (06) zones: Hassi-R'mel, Laghouat, Ghardaïa, Djelfa, M'Sila et Boussaâda. Ces régions ont été alimentées par des lignes de 220 kV et les problèmes posés par la pollution seraient plus ressentis qu'en moyenne tension.

IV.1. INFLUENCE DES FACTEURS CLIMATIQUES SUR LE COMPORTEMENT DES ISOLATEURS:

Une étude climatique, ayant été faite sur une période de 28 années (1960 - 1987), présente des statistiques concernant les facteurs climatiques régnant dans ces deux régions électriques [6], [7]. Cependant, les principaux facteurs qui ont une influence directe sur le comportement des isolateurs, sont les suivants:

- Les hautes températures favorisent le séchage des couches polluantes, donc favorisent l'évaporation de la couche humide se formant sur les surfaces isolantes et augmentent ainsi leur résistivité superficielle. Cependant, à la suite de refroidissement qui se produit durant la nuit, l'humidité relative augmente considérablement, surtout pendant les premières heures du matin. Ceci donne naissance à la rosée.

- La formation de la rosée sur la surface des isolateurs (lorsque la température chute brusquement pendant la nuit) et les fines pluies (qui peuvent éventuellement y avoir lieu) constituent les deux principaux facteurs favorisant l'humidification des couches polluantes), et par voie de conséquence, le contournement des chaînes d'isolateurs. Cette humidification est nocive pour la bonne exploitation du réseau haute tension, car elle augmente la conductivité superficielle des isolateurs. Cependant, les fortes pluies permettent en général de nettoyer les surfaces polluées des isolateurs.

- L'influence du vent sur l'amorçage des isolateurs pollués paraît très complexe. Il est clair que le vent constitue l'agent assurant le transport de la poussière, qui peut se déposer sur la surface des isolateurs. D'autre part, en l'absence de forte pluie, le vent peut se comporter comme l'unique agent d'auto-nettoyage.

- Ces régions sont caractérisées, en outre, par des tempêtes de sable assez fréquentes. Ce genre de vents violents, ayant lieu le plus souvent durant le printemps, sont à l'origine de la propagation de la pollution. Ce qui favorise le contournement de chaînes d'isolateurs.

IV.2. SOURCES DE POLLUTION:

Les régions électriques considérées étant désertiques, le sable est l'agent polluant le plus important à prendre en

considération. En outre, elles comportent des zones à forte concentration industrielles. On y trouve, plus particulièrement, des usines d'industrie pétrochimique. La présence de torchères a un rôle important dans la pollution de l'équipement électrique.

L'analyse granulométrique des échantillons prélevés sur des isolateurs pollués, basée sur un classement des éléments donné par l'Association Internationale de la Science du Sol (A.I.S.S.) [6], a montré que tous les échantillons analysés sont constitués par des grains de sable en majorité fins (plus de 85 %), du fait que leur diamètre est très faible et compris entre 0,05 mm et 0,2 mm ($0,05 \text{ mm} \leq \phi \leq 0,2 \text{ mm}$).

La conductivité de ces échantillons de sable est comprise entre $0,4 \mu\text{S/cm}$ et $13,7 \mu\text{S/cm}$. Cependant, la conductivité moyenne diffère d'une région électrique à l'autre. En effet, le sable de la région électrique de Hassi-Messaoud est plus conducteur (la conductivité $\gamma \approx 3 \mu\text{S/cm}$) que celui de la région de Hassi-R'mel ($\gamma \approx 1 \mu\text{S/cm}$) [6].

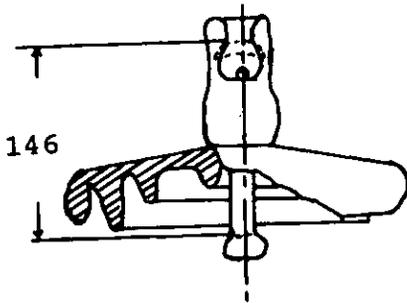
Des analyses chimiques des différents échantillons [6] ont permis d'y détecter la présence de certains éléments tels que: K^+ , Mg^{++} , Ca^{++} , Na^+ , Cl^- et SO_4^{--} .

IV.3. TYPES D'ISOLATEURS UTILISES:

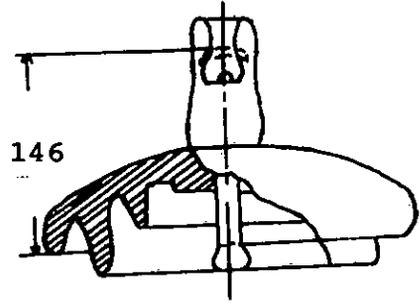
Pour l'isolement des lignes de haute tension installés dans les régions électriques à étudier, différents types d'isolateurs sont utilisés par la SONELGAZ. Nous pouvons citer notamment: NGK, F12R, 1512L et F120P. Ces isolateurs utilisés sont tous du type capot et tige (Fig. 4.1).

Le nombre d'isolateurs utilisés dépend principalement du niveau de tension de service. En effet, pour un niveau de 30 kV, on emploie trois éléments dans les alignements et quatre pour les angles et les arrêts. Pour le niveau de tension de 60 kV, on

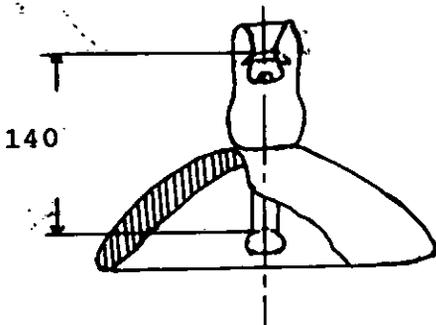
emploie cinq éléments pour les chaînes d'alignement et six dans les angles et les arrêts. Par contre pour le niveau de tension de 220 kV, le nombre d'isolateurs peut changer d'une région à l'autre (12 à 18 éléments).



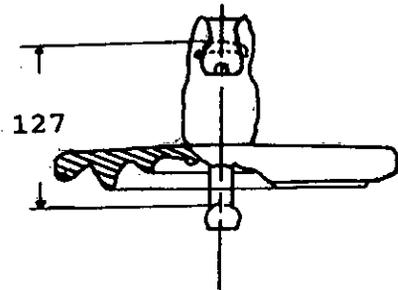
Diamètre $\phi = 254$ mm
 Type: NGK
 Ligne de fuite L = 432 mm



Diamètre $\phi = 280$ mm
 Type: F 120P
 Ligne de fuite L = 445 mm



Diamètre $\phi = 255$ mm
 Type: F 12R
 Ligne de fuite L = 292 mm



Diamètre $\phi = 255$ mm
 Type: 1512L
 Ligne de fuite L = 292 mm

Fig. 4.1. - Types d'isolateurs utilisés par SONELGAZ.

Suivant la facilité de réalisation des montages, les chaînes d'isolateurs peuvent avoir différentes dispositions par rapport à la surface du sol (verticale, horizontale, inclinée). En effet, les isolateurs d'alignement sont disposés verticalement, tandis que ceux des angles et des arrêts ont une disposition horizontale ou inclinée.

Des essais effectués sur des chaînes d'isolateurs pollués dans les conditions naturelles d'exploitation [6] concernant les régions considérées, ont permis de constater que l'isolateur du type 1512L en verre présente une meilleure rigidité relativement à sa longueur de fuite. En effet, ce type d'isolateurs est le plus utilisé par la SONEGAS.

IV.4. MODELE EXPERIMENTAL UTILISE - METHODE D'ESSAIS:

Afin de faciliter toutes les observations et les mesures nécessaires à l'analyse de phénomènes de contournement, on utilise un dispositif simple sur lequel on a essayé de reproduire des couches polluantes semblables à celles observées sur ces isolateurs dans les conditions naturelles d'exploitation. En effet, le modèle utilisé simule l'état de surface de l'isolateur à étudier.

IV.4.1. Réalisation du modèle:

Le dispositif expérimental utilisé [6], en vue d'étudier les phénomènes de développement de l'arc électrique sur la surface polluée des isolateurs, est simple et semblable à ceux considérés notamment par Claverie et Porcheron [2] et Danis [22].

Il est constitué d'une plaque isolante en bakélite, qui a la propriété de mieux résister à la chaleur engendré par l'arc électrique, lors des essais.

Cette plaque est munie de deux électrodes, l'une circulaire mise à la haute tension et l'autre rectangulaire mise à la terre. La distance entre électrodes étant égale à 292 mm. Celle-ci correspond à la ligne de fuite de l'isolateur du type 1512L.

IV.4.2. Méthode d'essais:

Etant donné qu'aucune norme ne précise la méthode d'essais dans le cas de la pollution désertique, il a été nécessaire pour l'expérimentateur d'en définir une au laboratoire. En effet, la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) ne recommande de normes d'essais que pour la pollution industrielle et celle marine [14].

La méthode d'essais utilisée est celle d'humidification des couches polluantes à la vapeur d'eau initialement avant l'application de la tension. En effet, cette méthode donne, selon les essais sur les isolateurs pollués dans les conditions naturelles, de meilleurs résultats que celle d'humidification continue [6].

La répartition de la couche de sable, sur la plaque isolante, s'est effectuée suivant deux types de configuration de la couche de pollution, à savoir le cas de la couche continue et le cas de la couche discontinue.

IV.4.2.1. Cas de la couche continue:

Ce premier cas concerne la répartition d'une couche de sable continue recouvrant toute la surface isolante comprise entre les électrodes.

Ce cas représente, en fait, le cas critique extrême d'un isolateur 1512L pollué. Le modèle plan équivalent est donnée par la figure 4.2.

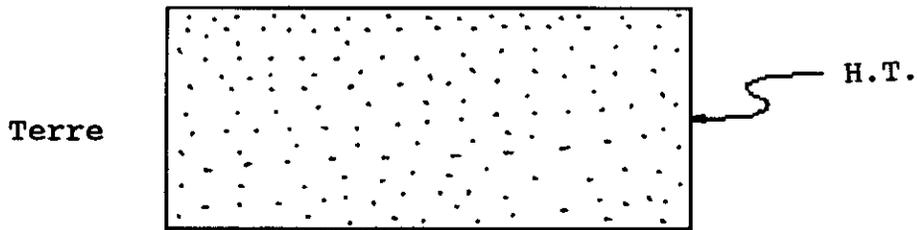


Fig. 4.2. - Modèle de laboratoire représentant la configuration continue [6].

IV.4.2.2. Cas de la couche discontinue:

Ce second cas consiste à reproduire de la manière la plus proche possible l'état de surface polluée de l'isolateur 1512L dans les conditions naturelles.

En effet, pour l'isolateur 1512L (Fig. 4.1), l'accumulation des dépôts polluants représentant les zones polluées se fait surtout autour de la tige et dans les parties de l'isolateur difficilement nettoyables par les agents naturels (vents, fortes pluies, ...).

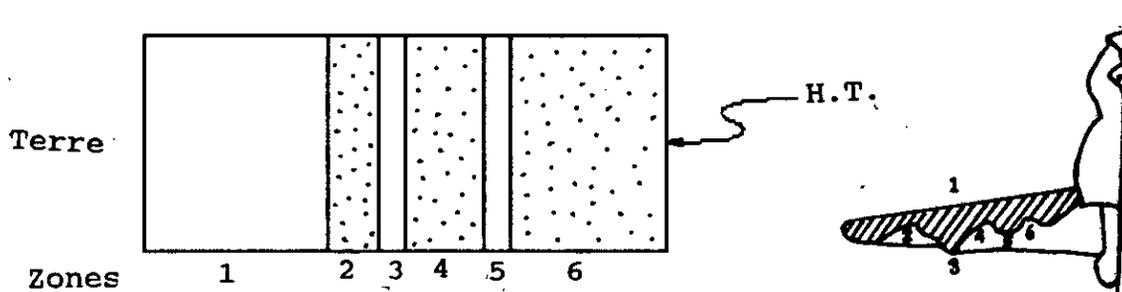


Fig. 4.3. - Modèle de laboratoire représentant la configuration discontinue [6].

Concernant ce modèle plan équivalent, il est clair que les zones 1, 3, 5 sont propres du fait qu'elles sont protégées contre les agents polluants (naturels ou industriels). Cependant les zones 2, 4, 6 sont polluées.

Le modèle plan est caractérisé par les dimensions suivantes des différentes zones:

Hassi-Messaoud:

zone 1: 115 mm, zone 2: 28 mm, zone 3: 7 mm, zone 4: 40 mm, zone 5: 6 mm et zone 6: 96mm.

Hassi-R'mel:

zone 1: 106 mm, zone 2: 30 mm, zone 3: 13mm, zone 4: 52 mm, zone 5: 4 mm et zone 6: 87 mm.

Il est clair que la largeur polluée équivalente globale de la région de Hass-R'mel (169 mm) est légèrement supérieure à celle de Hassi-Messaoud (164 mm).

IV.5. RESULTATS OBTENUS PAR SIMULATION ET INTERPRETATIONS:

En vue d'étudier le développement d'arcs se produisant sur des surfaces planes et polluées concernant les régions électriques considérées, l'expérimentateur a relevé, pour chaque niveau de tension d'essai, le courant de fuite et la longueur d'arc en utilisant un circuit de mesure adéquat [6]. En effet, quatre (04) paliers de tension d'essai ont été utilisés: 16, 18, 25 et 28 kV. Et ce dans les deux configurations de la couche polluante envisagées.

Lors des essais, la conductivité superficielle de l'agent polluant prise est de 3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la région électrique de Hassi-Messaoud et de 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour celle de Hassi-R'mel.

Notre tâche s'est effectuée en deux étapes:

- en première étape, nous avons déterminé les constantes de la caractéristique statique de l'arc k et n à l'aide du logiciel EUREKA. Et ce en injectant les différentes valeurs expérimentales [6] de la tension d'essai V , du courant de fuite I et de la longueur d'arc X , pour les régions électriques considérées.

- dans la deuxième étape, l'ensemble de ces valeurs est injecté ensuite dans le programme élaboré. Ainsi, nous avons pu obtenir les principales valeurs critiques et tracer toutes les caractéristiques représentant les phénomènes de contournement.

Les constantes caractéristiques ont été trouvées pour la région de:

Hassi-Messaoud:

concernant le cas de la couche de pollution:

- * continue: $k = 1990,4$; $n = 0,5$
- * discontinue: $k = 1683,94$; $n = 0,47$

Hassi-R'mel:

Concernant le cas de la couche de pollution:

- * continue: $k = 677,97$; $n = 0,5$
- * discontinue: $k = 1214,93$; $n = 0,46$

IV.5.1. Valeurs critiques:

Dans le but de présenter toutes les informations possibles concernant les valeurs critiques de la tension d'essai V_c , du courant de fuite I_c , de la longueur d'arc X_c et de la fonction de répartition de la couche polluante $F(X_c)$, nous dressons, pour

différentes conductivités ($\gamma = 1, 3, 6, 12$ et $24 \mu\text{S}/\text{cm}$), un tableau propre à chaque région et à chaque configuration envisagées.

IV.5.1.1. Région de Hassi-Messaoud:

IV.5.1.1.1. Pollution continue:

γ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1	3	6	12	24
V_c (kV)	40,45	28,05	22,26	17,73	14,02
I_c (mA)	69,08	143,97	228,11	360,11	574,81
X_c (cm)	3,56				
$F(X_c)$ (cm^{-1})	0,5447				

Tableau 1. - Valeurs critiques principales pour la région de Hassi-Messaoud (pollution continue).

IV.5.1.1.2. Pollution discontinue:

γ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1	3	6	12	24
V_c (kV)	40,40	28,43	22,78	18,78	14,62
I_c (mA)	50,58	106,80	173,31	274,42	439,45
X_c (cm)	5,90				
$F(X_c)$ (cm^{-1})	0,7513				

Tableau 2. - Valeurs critiques principales pour la région de Hassi-Messaoud (pollution discontinue).

IV.5.1.2. Région de Hassi-R'mel:

IV.5.1.2.1. Pollution continue:

γ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1	3	6	12	24
V_c (kV)	28,45	19,05	15,05	12,42	9,86
I_c (mA)	133,14	276,90	439,52	697,65	1107,40
X_c (cm)	15,31				
$F(X_c)$ (cm^{-1})	0,1821				

Tableau 3. - Valeurs critiques principales pour la région de Hassi-R'mel (pollution continue).

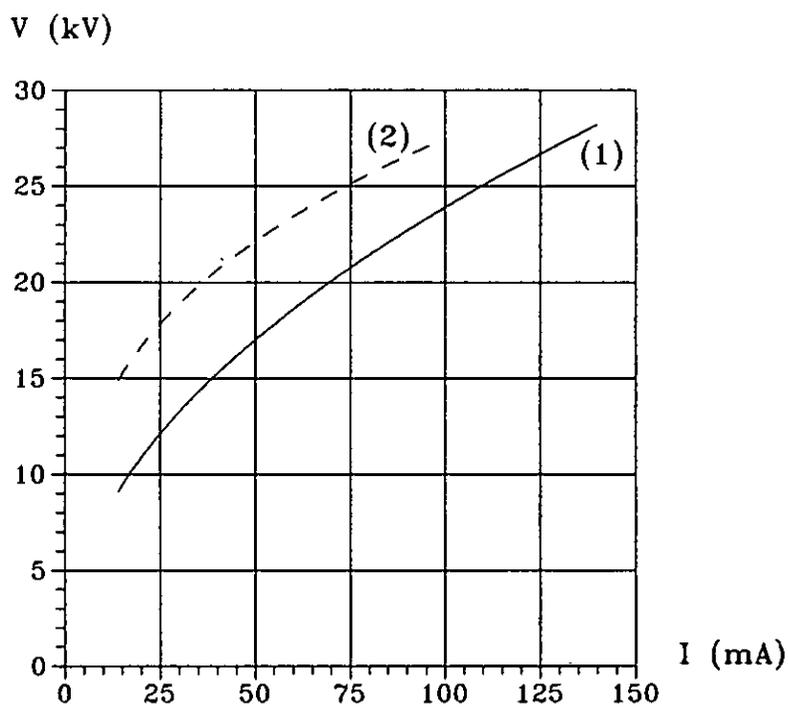
IV.5.1.2.2. Pollution discontinue:

γ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1	3	6	12	24
V_c (kV)	28,07	19,85	15,96	12,83	10,31
I_c (mA)	158,07	335,47	539,32	867,02	1393,84
X_c (cm)	9,81				
$F(X_c)$ (cm^{-1})	0,1658				

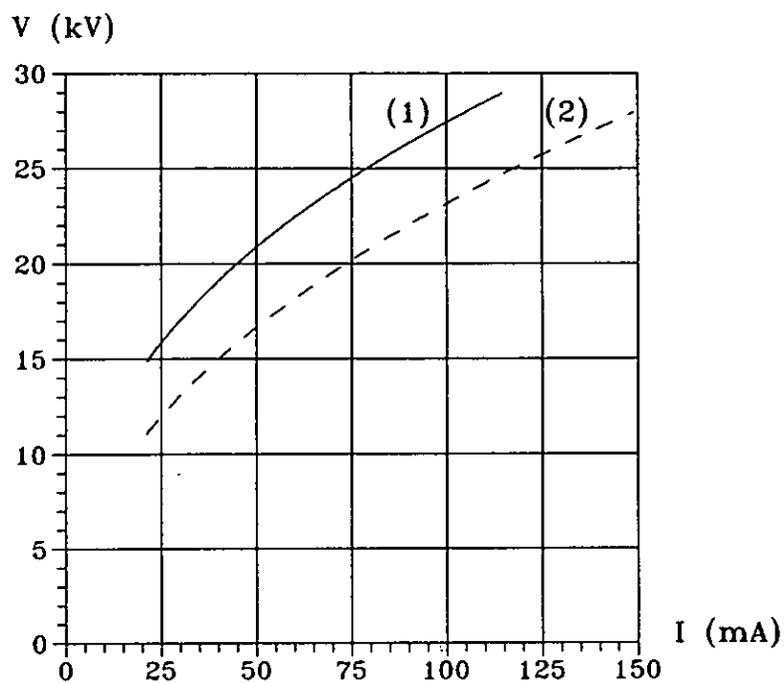
Tableau 4. - Valeurs critiques principales pour la région de Hassi-R'mel (pollution discontinue)

IV.5.2. Caractéristiques obtenues et interprétations:

Les différentes caractéristiques obtenues par simulation, pour les ouvrages installés dans les régions considérées sont:



(a) Region de Hassi-Messaoud



(b) Region de Hassi-R'mel

Fig. 4.4. - Tension d'essai en fonction du courant de fuite:
 (1) Pollution continue, (2) Pollution discontinue.

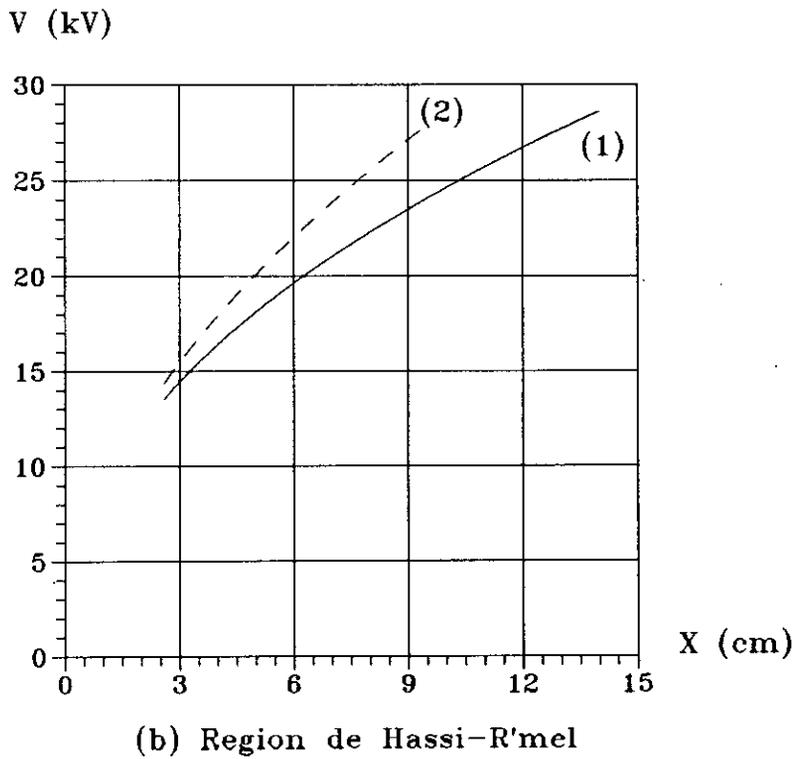
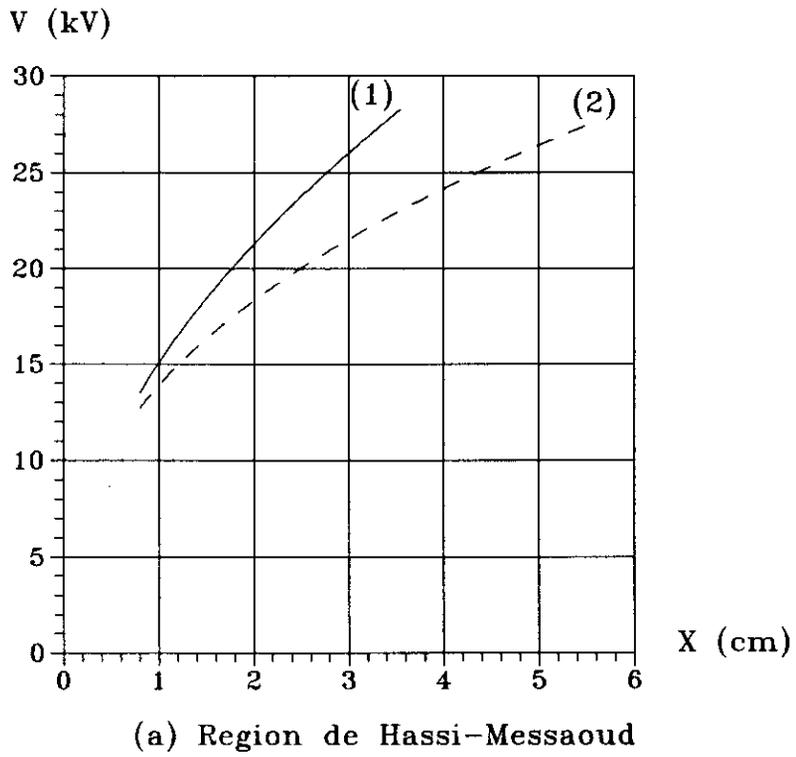
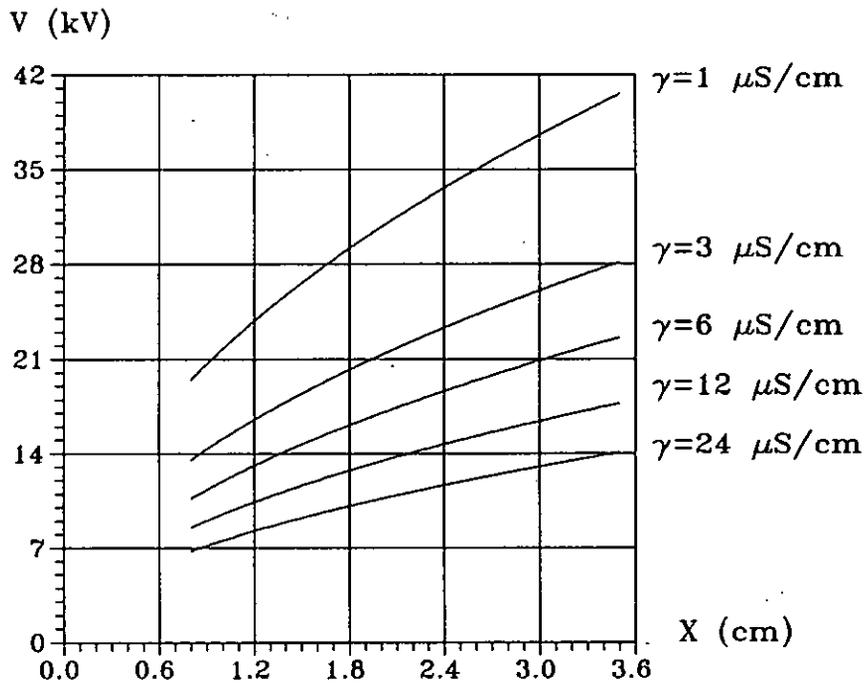
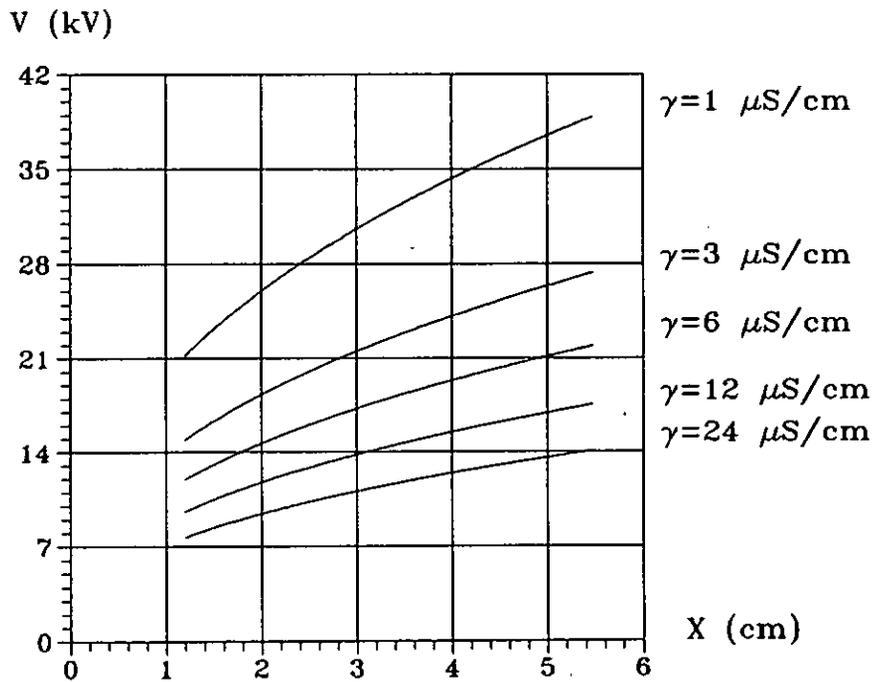


Fig. 4.5. - Tension d'essai en fonction de la longueur d'arc:
 (1) Pollution continue, (2) Pollution discontinue.

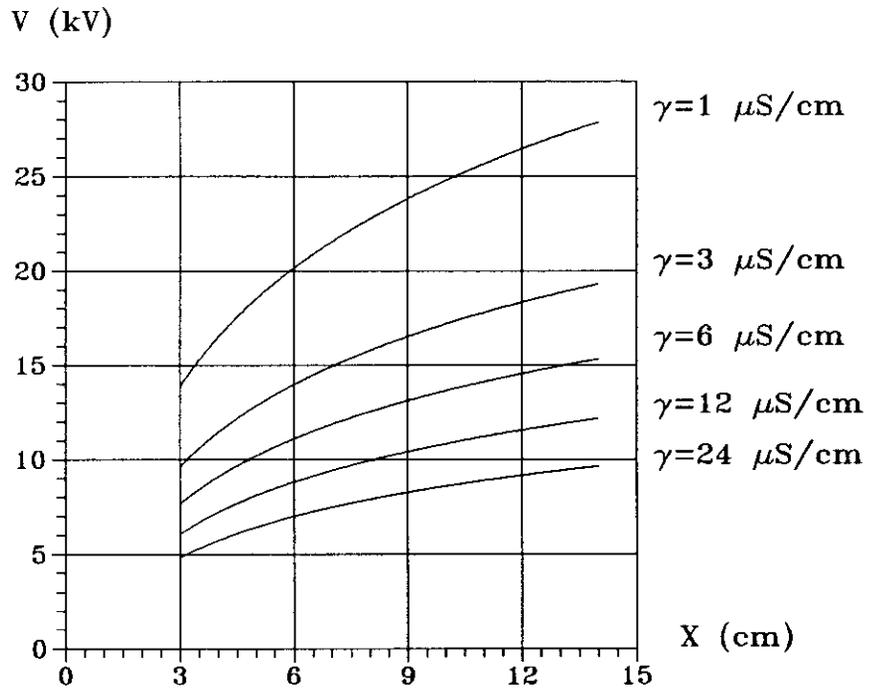


(a) Pollution continue

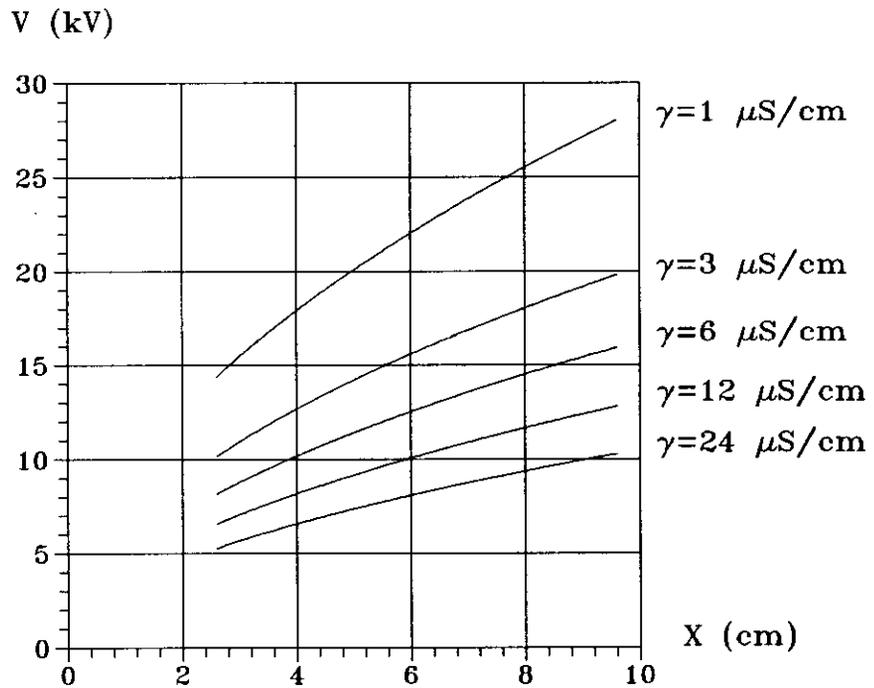


(b) Pollution discontinue

Fig. 4.8. - Tension d'essai en fonction de la longueur d'arc pour differentes conductivites concernant la region de Hassi-Messaoud.

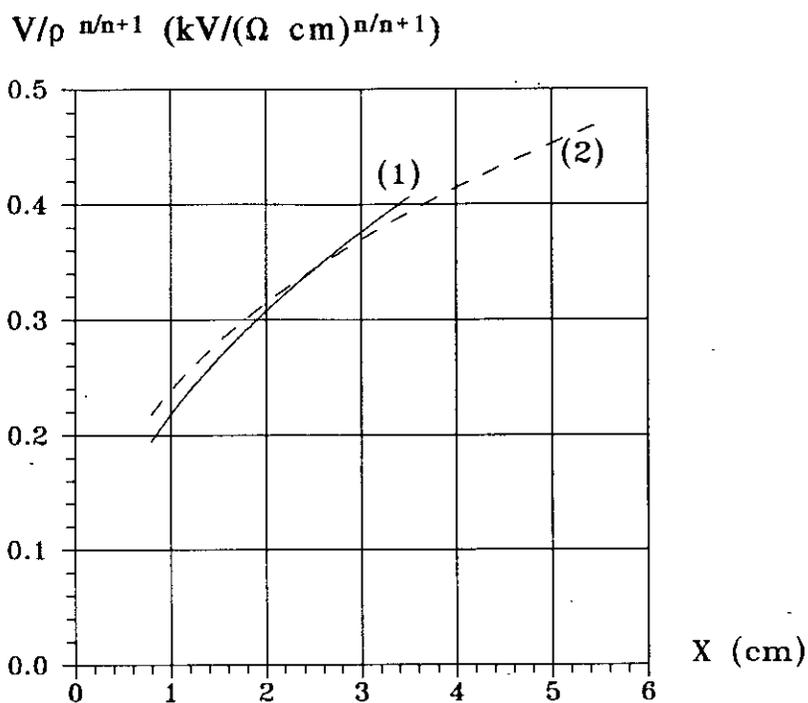


(a) Pollution continue

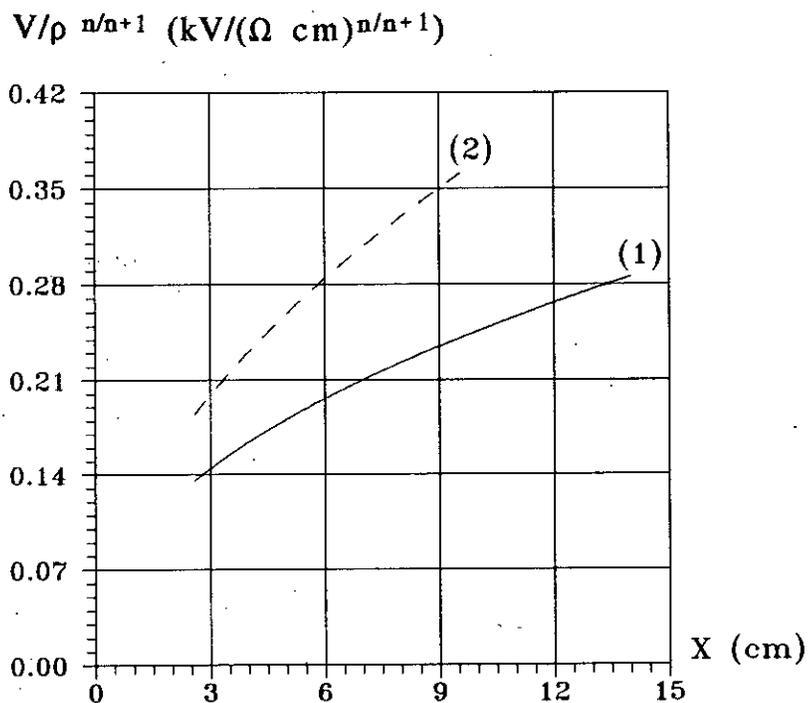


(b) Pollution discontinue

Fig. 4.7. - Tension d'essai en fonction de la longueur d'arc pour differentes conductivites concernant la region de Hassi-R'mel.

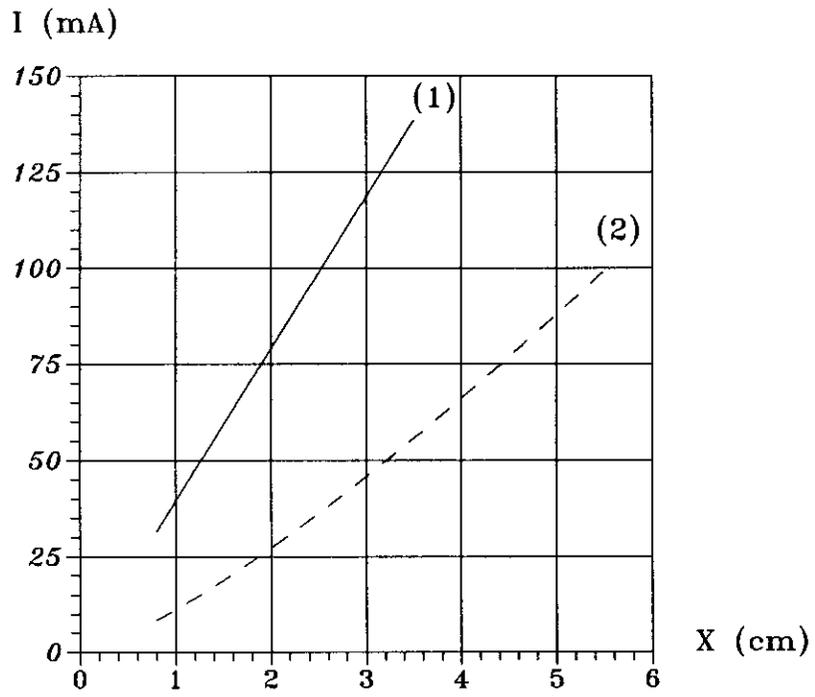


(a) Region de Hassi-Messaoud

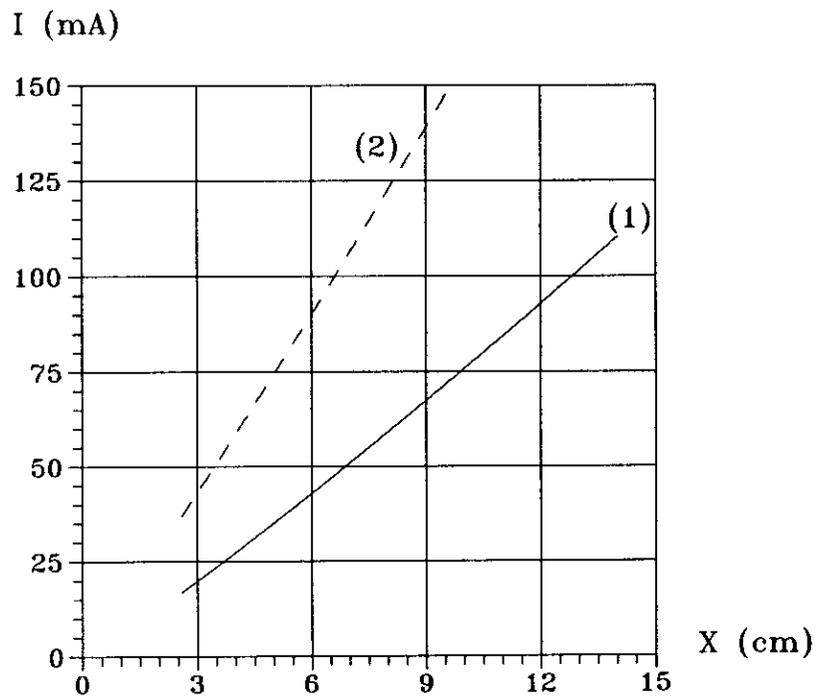


(b) Region de Hassi-R'mel

Fig. 4.8. - Tension d'essai sur la resistivite elevee a la puissance $n/(n+1)$ en foction de la longueur d'arc: (1) Pollution continue, (2) Pollution discontinue.

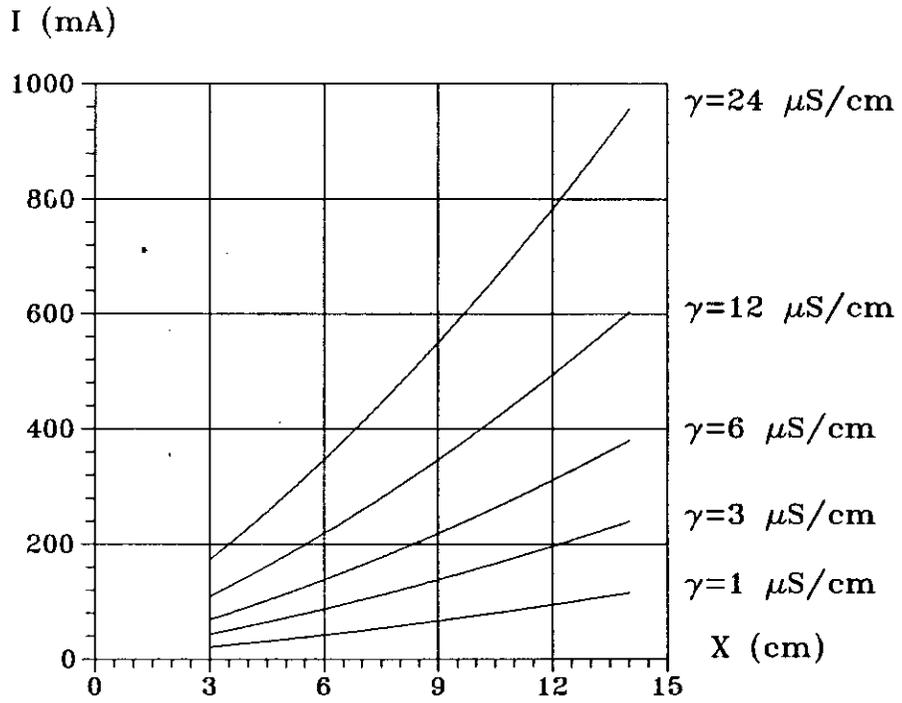


(a) Region de Hassi-Messaoud

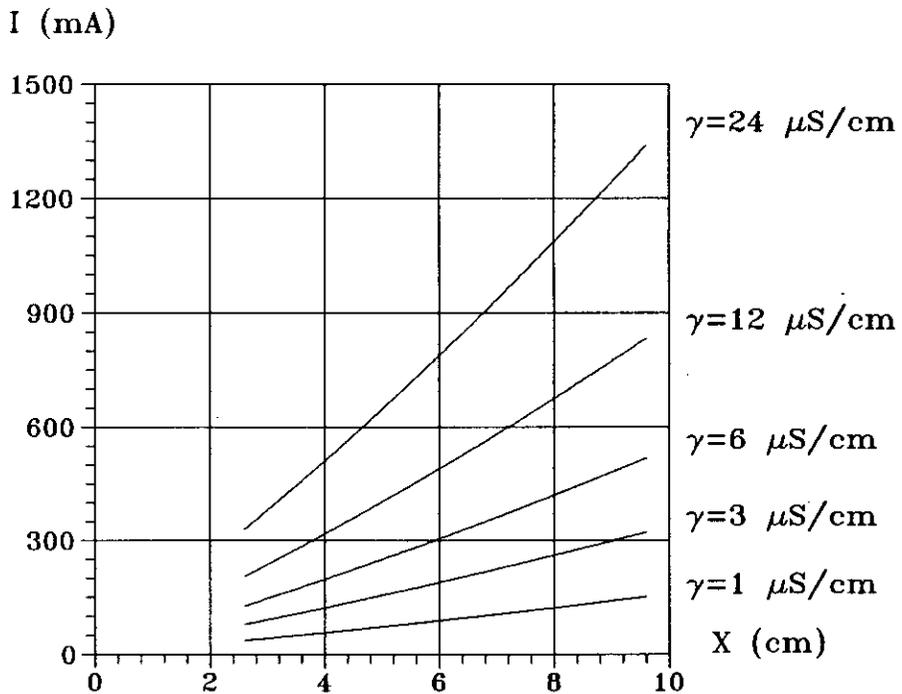


(b) Region de-Hassi-R'mel

Fig. 4.9. - Courant de fuite en fonction de la longueur d'arc:
 (1) Pollution continue, (2) Pollution discontinue.

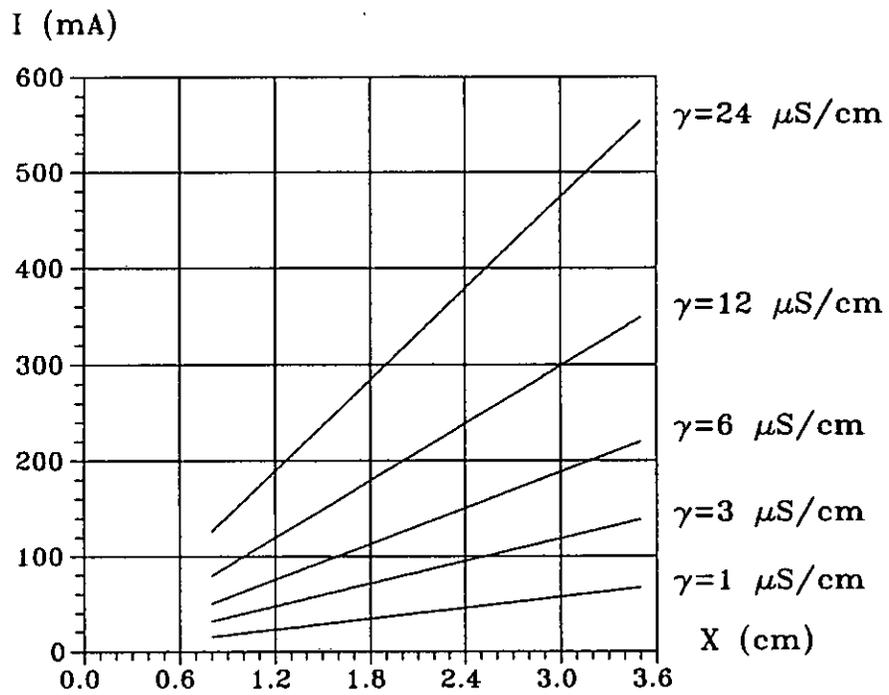


(a) Pollution continue

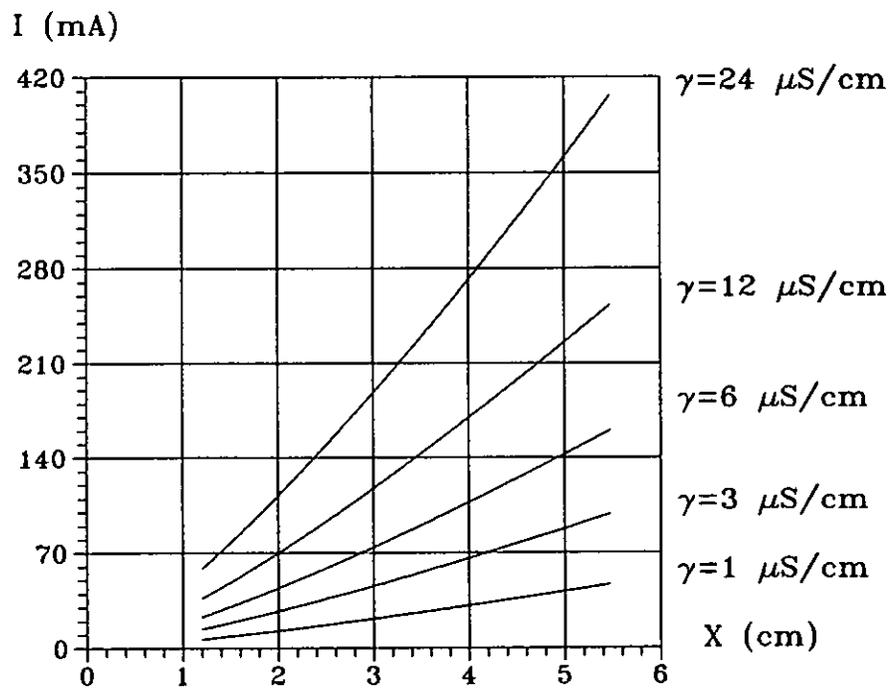


(b) Pollution discontinue

Fig. 4.11. - Courant de fuite en fonction de la longueur d'arc pour différentes conductivités concernant la région de Hassi-R'mel.

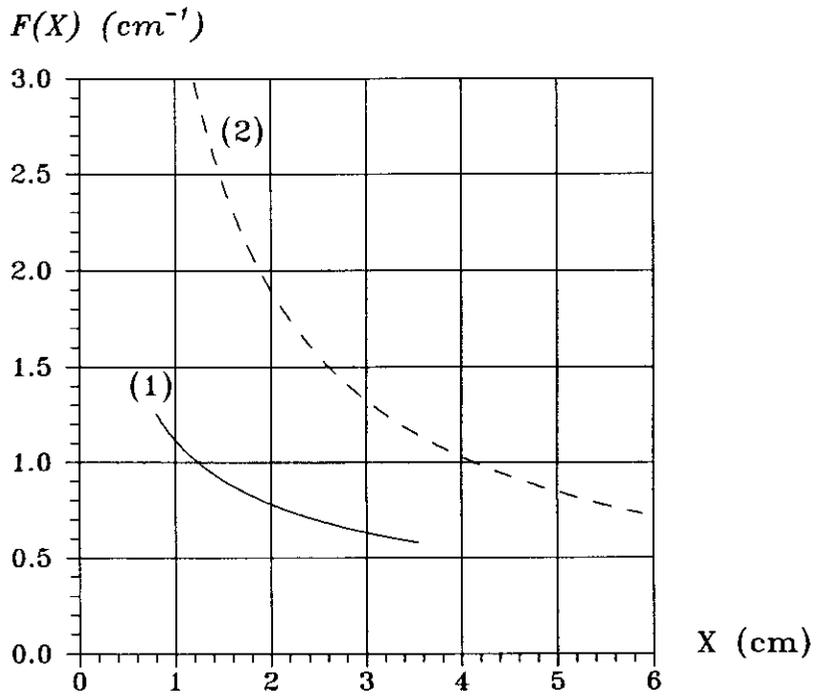


(a) Pollution continue

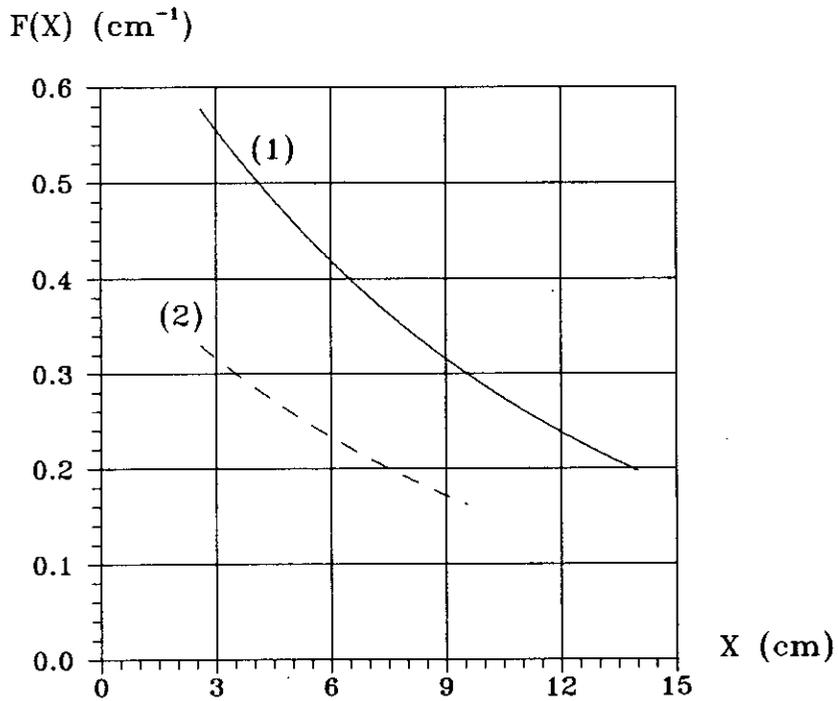


(b) Pollution discontinue

Fig. 4.10. - Courant de fuite en fonction de la longueur d'arc pour différentes conductivités concernant la région de Hassi-Messaoud.

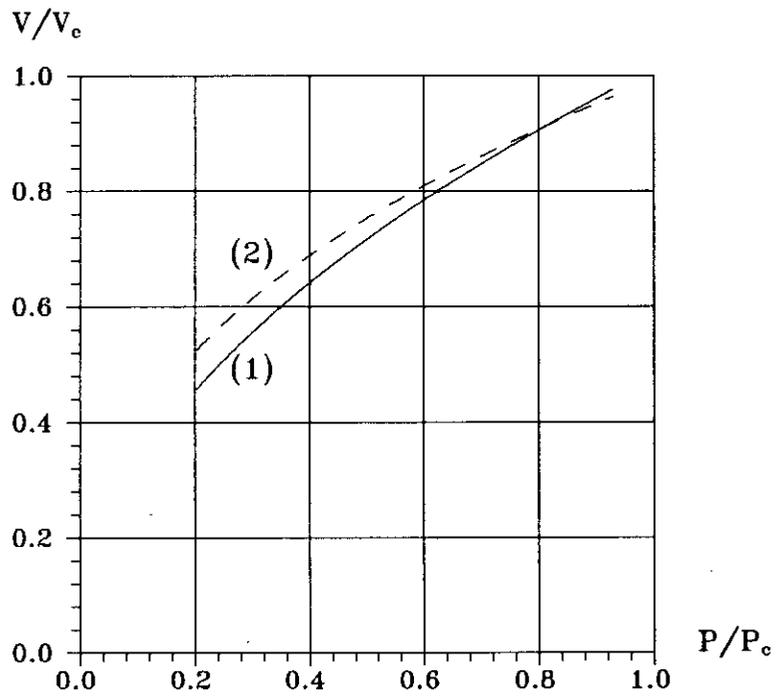


(a) Region de Hassi-Messaoud

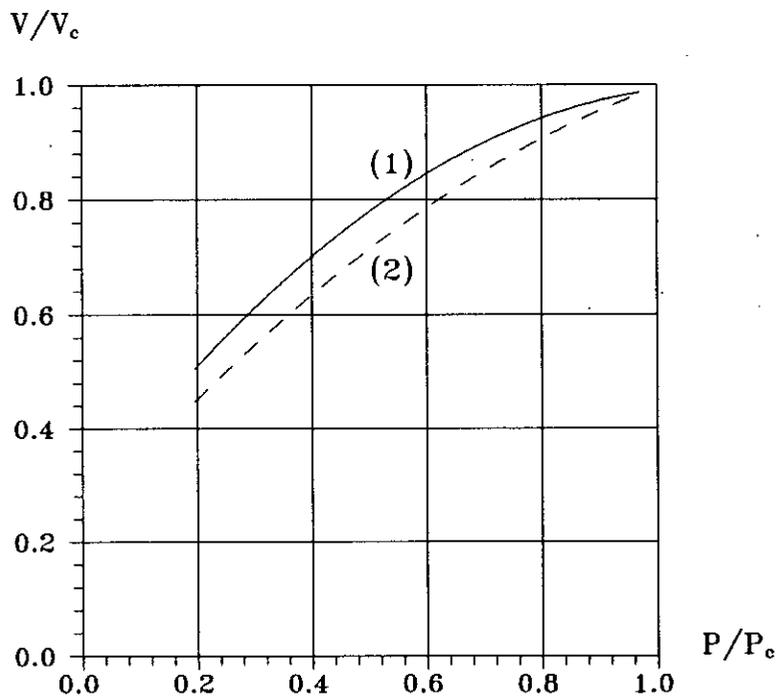


(b) Region de Hassi-R'mel

Fig. 4.12. - Fonction caracteristique de repartition en fonction de la longueur d'arc: (1) Pollution continue, (2) Pollution discontinue.



(a) Region de Hassi-Messaoud



(b) Region de Hassi-R'mel

Fig. 4.13. - Coefficient de securité en fonction du produit relatif: (1) pollution continue, (2) pollution discontinue.

IV.5.2.1. Caractéristiques tension d'essai - courant de fuite:

Pour les régions électriques considérées et pour les deux configurations envisagées, l'augmentation de la tension d'essai engendre l'augmentation du courant de fuite (Fig. 4.4).

En outre, dans le cas de la couche continue (contrairement dans le cas de la couche discontinue), pour un même niveau de tension d'essai, le courant de fuite est plus important pour la région de Hassi-Messaoud. Ceci est dû au fait que l'agent polluant pour cette région est plus conducteur ($\gamma \approx 3 \mu\text{S/cm}$) que celui de Hassi-R'mel ($\gamma \approx 1 \mu\text{S/cm}$).

Les mêmes caractéristiques montrent que pour la région de Hassi-Messaoud, le courant de fuite est plus important, pour un même niveau de tension d'essai dans le cas de la couche continue. Par contre, pour la région de Hassi-R'mel, le courant de fuite est plus important dans le cas de la couche discontinue.

Cependant, le courant de fuite dépendrait non seulement de la tension d'essai mais aussi de la répartition des couches polluantes sur l'isolateur.

IV.5.2.2. Caractéristiques tension d'essai - longueur d'arc:

L'augmentation de la tension d'essai engendre, pour les deux régions et pour les deux configurations, l'allongement de l'arc électrique (Fig. 4.5).

Ces mêmes caractéristiques montrent aussi que pour un même niveau de la tension d'essai, la longueur d'arc est moins importante dans le cas de la région de Hassi-Messaoud.

Pour la région de Hassi-R'mel, les essais effectués [6] montrent que, pour une même tension d'essai, la longueur d'arc est plus importante dans la cas de la couche continue.

Contrairement à celle de Hassi-Messaoud, la longueur d'arc est plus importante dans le cas de la couche discontinue.

Nous constatons également que toute augmentation de la conductivité (donc la diminution de la résistivité) superficielle de la couche polluante, pour une même longueur d'arc, engendre la diminution de la tension d'essai (Fig. 4.6 et 4.7).

IV.5.2.3. Caractéristiques tension sur la résistivité élevée à la puissance $n/(n+1)$ - longueur d'arc:

Nous pouvons résumer les caractéristiques précédentes, par les courbes représentant le rapport de la tension d'essai sur la résistivité élevée à la puissance $n/(n+1)$ (la constante n dépend de la configuration et de la région électrique) en fonction de la longueur d'arc (Fig. 4.8).

Ces caractéristiques sont considérées comme fonctions de la longueur d'arc seulement quelque soit la résistivité. En effet, elles prennent les mêmes allures que celles des caractéristiques tension d'essai - longueur d'arc, pour différentes conductivités de l'agent polluant.

IV.5.2.4. Caractéristiques courant de fuite - longueur d'arc:

De même que précédemment, pour les deux régions et pour les deux configurations, toute augmentation du courant de fuite provoque l'allongement de l'arc électrique.

Puisque la conductivité du sable pour la région de Hassi-Messaoud est plus grande que celle de Hassi-R'mel, le courant est plus important pour une même longueur d'arc, dans la région de Hassi-Messaoud (Fig. 4.9). Ceci est valable pour les deux cas de configuration précités.

Ces caractéristiques montrent que le courant de fuite concernant la région de Hassi-Messaoud, pour une même longueur d'arc, est plus faible dans le cas de la couche discontinue. Par contre, pour la région de Hassi-R'mel, le courant de fuite est plus important dans le cas de la couche discontinue.

Nous constatons aussi, que l'augmentation de la conductivité de la couche polluante entraîne, pour une même longueur d'arc, l'augmentation du courant de fuite (Fig. 4.10 et 4.11).

IV.5.2.5. Caractéristiques fonction de répartition de la couche polluante - longueur d'arc:

Selon le modèle proposée, il est clair que plus l'arc électrique s'allonge plus la zone non court-circuitée par cet arc se rétrécit.

En effet, l'allongement de l'arc électrique provoque la diminution de la fonction de répartition de la couche polluante. Par voie de conséquence, ces deux fonctions sont décroissantes (Fig. 4.12).

Pour une même longueur d'arc, pour les deux configurations, la fonction de répartition est plus importante pour la région de Hassi-Messaoud.

Concernant la région de Hassi-Messaoud, pour une même longueur d'arc cette fonction est plus faible dans le cas de la couche continue. Contrairement à la région de Hassi-R'mel, cette fonction est plus faible dans le cas e la couche discontinue.

Les fonctions caractéristiques de la couche polluante sont équivalentes à celles de répartition à une résistivité prés. Elles prennent, en fait, les mêmes allures quand la résistivité varie.

IV.5.2.6. Caractéristiques coefficient de sécurité - produit relatif:

Le coefficient de sécurité représente l'écart entre la tension appliquée et la tension de contournement. Il caractérise, en fait, la marge de sécurité du dispositif isolant. Cette marge est donc évaluée à l'aide des caractéristiques considérées à partir des mesures de courant de fuite uniquement (Fig. 4.13).

En effet, pour surveiller le degré de pollution des isolateurs d'un poste, par exemple, ces caractéristiques peuvent être utilisées de la manière suivante:

Pour un type d'isolateur d'une zone quelconque, la caractéristique donnant le coefficient de sécurité en fonction du produit relatif, sera déterminée par des essais en laboratoire en utilisant la méthode du brouillard salin par exemple. Pour cela, on mesurera pour les valeurs croissantes de la salinité de la solution:

- le courant de fuite maximal I sous la tension de service V de l'isolateur,
- la tension de contournement V_c .

Ces mesures permettent le calcul du coefficient de sécurité $C_s = V/V_c$ ainsi que le produit relatif P/P_c . En effet, on tracera la caractéristique coefficient de sécurité - produit relatif point par point.

En mesurant en permanence le courant de fuite d'un isolateur identique à celui essayé en laboratoire et en service dans l'ouvrage concerné et en se reportant simplement à la caractéristique précédente, il sera possible à tout moment de connaître la marge de sécurité en évaluant l'écart séparant la tension appliquée de la tension de contournement, sans qu'il soit nécessaire de connaître le degré de pollution de la plaque.

IV-6-CONCLUSION:

Le modèle proposé n'est valable que dans le cas de configuration où la couche polluante est continue. Cependant, l'utilisation du programme élaboré est possible pour le cas de la couche discontinue.

Selon les valeurs critiques obtenues par simulation pour le cas de la couche discontinue, il est clair que la longueur d'arc critique pour la région de Hassi-Messaoud est de 5,9 cm. L'arc ne dépasse donc pas la zone 6 de largeur 9,6 cm (fig. 4.3) sans que le contournement ne se produise. En effet, les couches propres que possède l'isolateur n'interviennent pas.

Pour la région électrique de Hassi-R'mel, et pour la même configuration, la longueur d'arc critique est de 9,81 cm. L'arc électrique se propagera jusqu'à atteindre la zone 4 en traversant entièrement la zone 5 (fig. 4.3). Puisque cette dernière est très étroite (4 mm) par rapport à la longueur d'arc critique, nous avons considéré que son influence sur le développement de l'arc électrique est pratiquement négligeable.

Enfin, nous pouvons conclure que les zones propres, dans le cas de la couche discontinue, n'ont pratiquement pas d'influence sur le comportement des isolateurs soumis à une telle pollution. Par conséquent les résultats obtenus sont admissibles.

Il est à noter que les constantes caractéristiques k et n dépendent de la région et du type de configurations. Pour la configuration continue de la pollution, concernant les deux régions considérées, la constante n est égale à 0,5. Ceci a été obtenu par certains auteurs [2], [46].

Tandis que pour le cas de la couche discontinue, cette constante n'est pas nécessairement égale à 0,5. En effet, pour la région de Hassi-Messaoud (respectivement de Hassi-R'mel) la constante n a été trouvée égale à 0,47 (respectivement à 0,46).

Cependant, cette valeur permet de déterminer les caractéristiques désirées avec une erreur de 6% pour la région de Hassi-Messaoud et de 8% pour celle de Hassi-R'mel.

CONCLUSION GENERALE

Il ressort de notre travail consistant en l'étude par simulation numérique du phénomène de contournement des isolateurs pollués que:

- L'analyse du mécanisme de contournement des isolateurs soumis à la pollution atmosphérique montre que le comportement de l'isolateur est entièrement déterminé par la fonction de caractéristique de la couche polluante $R(X)$, qui représente la résistance en série avec l'arc de longueur X en chaque point de la surface isolante de l'isolateur considéré.

- L'étude des caractéristiques des couches polluantes, continues et uniformément réparties sur la surface des isolateurs pollués, montre que la fonction $R(X)$ peut être décomposée en un produit de deux termes ρ et $F(X)$; ρ représente la résistivité de la couche polluante qui est indépendante du type d'isolateur et varie uniquement avec le site; $F(X)$ est fonction de répartition de la couche polluante qui dépend seulement de la forme géométrique de l'isolateur, de la répartition de la couche polluante ainsi que de la direction de l'arc électrique le long de la surface polluée. Par conséquent le développement de l'arc dépend de la forme géométrique de l'isolateur, de la nature et de la distribution de l'agent polluant sur l'isolateur ainsi que de la direction de l'arc électrique le long de la surface de l'isolateur.

- L'isolement de certaines lignes ou de certains postes des réseaux de transport ou de distribution, sujets à de trop nombreux incidents par la pollution atmosphérique, peut se révéler insuffisant:

* soit parce que l'on n'aura pas tenu compte de la pollution lors de la construction de l'ouvrage ou que la sévérité de la pollution aurait été mal estimée;

* soit, et c'est le cas le plus fréquent, parce que la sévérité de la pollution en constante augmentation depuis la

construction de l'ouvrage, atteint un niveau que l'on ne pouvait prévoir.

- L'étude du processus de contournement sous pollution a conduit à proposer donc une méthode de surveillance du degré de pollution des installations électriques, basée sur l'interprétation des mesures permanentes de courant de fuite. En effet, le contrôle permanent du coefficient de sécurité des isolateurs pollués apporte une aide précieuse pour l'exploitant qui, peut ainsi éviter les défaillances éventuelles des installations en intervenant en un temps opportun, en lavant ou en graissant les isolateurs concernés par exemple.

- Le modèle mathématique proposé, ainsi que tout les modèles élaborés [5] en vue de décrire le contournement des surfaces polluées, sont des outils permettant: 1) de faire des estimations préliminaires des contraintes critiques et des courants critiques des isolateurs pollués, 2) de rationaliser les expériences conçues pour explorer le mécanisme de contournements, 3) d'interpréter et de généraliser les résultats d'essais. Ils ne sont absolument pas destinés à se substituer aux essais qui, demeurent indispensables pour l'obtention des données réelles.

- La nature des modèles mathématiques représentant un contournement engendré par une pollution est forcément idéalisée principalement a cause des hypothèses simplificatrices. Il est entendu donc que de tels modèles ne doivent pas être envisagés que dans la mesure où ils apportent un complément valable à l'expérimentation en milieu naturel.

- Enfin, il est souhaitable que cette étude soit poursuivie pour une modélisation plus complète en étudiant par exemple, les phénomènes de contournement dans les cas d'arcs multiples, en série et en parallèle sur les surfaces polluées.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] R.Pinnet.-"Prévention des incidents dûs à la pollution des isolateurs sur les ouvrages de transport", RGE, Tome 82, N°.3, Mars 1973, p.195-197.
- [2] P.Claverie, Y.Porcheron.-"Les phénomènes de pollution des isolateurs et l'isolement des ouvrages en régions polluées", RGE, Tome 82, N°.3, Mars 1973, p.166-194.
- [3] A.Cimador, M.Cojan, P.Hautefeuille, M.Moreau.-"Méthode de dimensionnement des isolateurs de lignes aériennes en régions polluées", CIGRE, session, Paris, France, 30 Août - 7 Septembre 1978, rapport N°.33-04.
- [4] P.J.Lambeth.-"Effect of pollution on high voltage outdoor insulators", Proc. IEE, Vol.118, N°.9R, Septembre 1971, p.1107-1130.
- [5] F.A.M.Rizk.-"Méthodes mathématiques du contournement des isolateurs sous pollution", Electra N°.78, Octobre 1981, p.71-103.
- [6] A.Mekhaldi.-"Modèle de contournement d'isolateurs pollués dans des conditions désertiques du Sahara Algérien", Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 1990.
- [7] A.Bérroual.-"Les phénomènes de pollution et leurs conséquences sur le transport d'énergie électrique", Cours de post- graduation, Département de Génie Electrique, Laboratoire Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 1992.
- [8] M.Khalifa, M.Abou-Seada, H.El-Ghazaly.-"Laboratory simulation of desert pollution flashover of high voltage insulators", Forth International Symposium of High Voltage Engeneering, Athens, Greece, 5-9

September 1983, rapport N°.46-03.

- [9] C.Huroux, M.A.Aliouchene, M.Izzularab.-"Isolateurs pollués: quelques modèles récents et critères de contournement associés", Laboratoire Génie Electrique (UA 304), Université Paul Sabatier, Toulouse 1985.

- [10] C.Huroux, A.M.Rahal.-"Le contournement des isolateurs haute tension approché à l'aide d'un modèle de laboratoire", RGE, Tome 84, N°.6, Juin 1975, p.425-429.

- [11] W.Heise, M.P.Verma, H.Niklasch, H.Lipken, H.Schreiber, G.F.Luxa.-"Critères de contournement par pollution et ses applications pour le dimensionnement et le contrôle de l'isolation", CIGRE, session, Paris, France, 30 Août - 7 Septembre 1978, rapport N°.33-09.

- [12] P.J.Lambeth, H.Auxel, M.P.Verma.-"Méthode de mesure de la sévérité de la pollution compte tenu de son influence sur le comportement des isolateurs à haute tension", Electra N°.20, Janvier 1972.

- [13] CIGRE groupe de travail du comité d'études N°.33.- "Mesure de la sévérité de pollution des sites et application au dimensionnement des isolateurs pour les réseaux à courant alternatif", Electra N°.64, Mai 1979.

- [14] CEI-60-1.-"Techniques des essais à haute tension première partie, définitions et prescriptions générales relatives aux essais", première édition, 1973, p.1-43.

- [15] P.J.Lambeth, J.S.T.Looms, M.Sforzini, C.Malaguti.- "Recherches internationales sur la pollution des isolateurs", CIGRE, session, Paris, France, 24 Août - 2 Septembre 1970, rapport N°.33-02.

- [16] J.Saferna, R.Kosztaluk.-"Essais d'isolateurs de lignes sur stands de pollution naturelle", CIGRE 1972, rapport N°.33- 03.
- [17] B.F.Hampton.-"Flashover mechanism of polluted insulation", Proc. IEE, Vol.111, N°.5, May 1964, p.985-990.
- [18] W.Heise, G.F.Luxa, G.Reverey, M.P.Verma.-"Estimation de la méthode d'essais sous pollution artificielle par couche solide", CIGRE 1972, rapport N°.33-09.
- [19] F.Obenaus.-"Fremdschichtüberschlag und kriechweglange", Deutsche Elektrotechnik, Vol.4, 1958, p.135-136.
- [20] G.Neumarker.-"Verschmutzungs zustand und kriechweg", Monaster, d. Deut. Akad. wiss, Berlin, Vol.1, 1959, p.352-359.
- [21] L.L.Alston, S.Zoledziowski.-"Growth of discharges on polluted insulation", IEEE Trans., Vol.PAS-110, N°.7, Juillet 1963, p.1260-1266.
- [22] J.Danis.-"A stochastic pollution flashover model", Forth International Symposium on High Voltage Engeneering, Athens, Greece, September 1983, rapport N°.46-12.
- [23] R.Wilkins.-"Flashover voltage of high voltage insulators with uniform surface films", Proc. IEE, Vol.116, N°.3, Mars 1969, p.457-465.
- [24] P.Skurapat.-"Developpement of a discharge on a wet insulator surface with d.c.", N-Trekh. Inf. Byull. Leningrad Polytechnic Inst., Vol.1, 1957, p.41-51.

- [25] S.Hesketh.-"General criterion for the prediction of pollution flashover", Proc. IEE, Vol.114, N°4, 1967, p.531-532.
- [26] A.Remuli.-"The mechanism of flashover of polluted insulation", Ph.D. Thesis, University of Strathelyde, 1967.
- [27] H.Nacke.-"Lichtbogen festigkeit und kriechstrom festigkeit von isolier stoffen", Dissertation, University of Berlin- Charlottenburg, 1962.
- [28] R.Wlikins, A.A.J.Al-Baghdadi.-"Arc propagation along an electrolyte surface", Proc. IEE, Vol.118, N°12, December 1971, p.1886-1892.
- [29] A.M.Rahal, C.Hurax.-"Flashover of high voltage insulators", IEEE Trans., Vol.Pas-98, N°6, November-December 1979, p.2223-2231.
- [30] S.Zoledziowski.-"Discussion contribution", Proc. IEE, Vol.111, N°9, 1964, p.1589-1592.
- [31] H.Boehme, F.Obénaus.-"Essais de contournement sur des isolateurs pollués en laboratoire et en lieu de service du point de vue de la conception d'un modèle d'amorçage pour courant rampant", CIGRE, 1966, N°407.
- [32] T.C.Cheng, D.C.Jolly, D.J.King.-"Surface flashover of water repellent insulators under moist conditions", IEEE Trans., Elect. Ins., Vol.12, N°3, 1977, p.208-213.
- [33] H.H.Woodson, A.J.McElroy.-"Insulators with contaminated surfaces part II: modeling of discharge mechanisms", IEEE Trans., Vol.Pas-89, N°8, November-December 1970, p.1858-1867.

- [34] H.Nacke."Stabilitat der fremdschichtentladungen und theories des fremdschichtuberschlags", ETZ-A, N°.16, 1966, p.577-585.
- [35] O.Mayr.-"Beitrag zur theorie der statischen und der dynamishchen litchbogens", Arch. f. Elecktrotechnik, Vol.37, 1943, p.588-608.
- [36] A.S.Maikopar.-"The open small current arc", Elektichestvo, N°.2, 1905, p.22-25.
- [37] T.E.Browne Jr.-"A study of arc behavior near current zero by means of mathematical models", AIEE Trans., Vol.67, 1948, p.141-153.
- [38] F.A.M.Rizk.-"Analysis of dielectric recovery with reference to dry zone arc on polluted insulators", IEEE conf. p., N°.71C 134 PWR, Winter Power Meeting, New York, January-February 1971.
- [39] J.J.Hurley, G.J.Limbours.-"Correlation of service performance of insulators and lighting arresters under polluted conditions with test results with a view to examining the validity of present criteria for insulator selection and testing", CIGRE, sc. 33, September 1969.
- [40] H.Edels, S.Y.Ettinger.-"Arc interruption and thermal reignition", Proc. Inst. Elect. Engrs, 1962, Tome-109, A, p.89.
- [41] F.W.Cramford, H. Edels.-"The reignition voltage characteristics of freely recovering arc", Proc. Inst. Elect. Engrs, 1960, Tome-107, A, p.202.
- [42] A.Gourdin, M.Boumahrat.-"Méthodes numériques appliquées", Office des Publications Universitaires

1991.

- [43] A.Boubakeur.-"Influence de la pollution atmosphérique sur le transport de l'énergie électrique en Algérie", 5^{ème} Journées Tunisiennes d'Electrotechnique et d'Automatique, rapport N°.11, Tunis, Mai 1984.
- [44] A.Boubakeur. A.Mekhaldi, H.Boudjelthia.-"Influence de la pollution atmosphérique sur le transport de l'énergie électrique dans le Nord-Est Algérien", 6^{ème} Journées Tunisiennes d'Electrotechnique et d'Automatique, rapport N°.8, Tunis, Mai 1985.
- [45] M.A.B.El Kosairy, F.A.M.Rizk.-"Comportement des isolateurs des lignes de transport à très tension dans les conditions de pollution désertique", CIGRE, Paris, France, 1970, rapport N°.33--05.
- [46] J.K.Jaccobsen, C.Lindquist. A.Pedersen, J.K.Rasmussen, H.Henriksen, S.Smedflet.-"Essais au laboratoire et en plein air pour dimensionner correctement les isolateurs axposés à la pollution saline", CIGRE, session, Paris, France, 30 Août-7 Septembre 1978, rapport N°.33-11.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1: PHENOMENES DE POLLUTION ET LEURS CONSEQUENCES SUR LE TRANSPORT DE L'ENERGIE ELECTRIQUE	
I.1. DEFINITIONS	7
I.1.1. Contournement	7
I.1.2. Tension de contournement	8
I.1.3. Courant de fuite - Courant de fuite critique	8
I.1.4. Longueur critique de l'arc	8
I.1.5. Densité du dépôt de sel équivalent	8
I.1.6. Conductance superficielle	9
I.1.7. Contrainte de contournement	9
I.2. FORMATION DES COUCHES POLLUANTES	9
I.3. SOURCES DE POLLUTION	9
I.3.1. Pollution naturelle	10
I.3.1.1. Pollution marine	10
I.3.1.2. Pollution désertique	10
I.3.1.3. Autre types de pollution naturelle	11
I.3.2. Pollution industrielle	11
I.3.3. Pollutions mixtes	12
I.4. CONSEQUENCES DE LA POLLUTION	13
I.4.1. Arc non localisé	13
I.4.2. Arc fixe	13
I.4.3. Contournement des isolateurs pollués	14
I.5. MESURES DE LA SEVERITE DE POLLUTION DES SITES	16
I.5.1. Classification des sites pollués	16
I.5.1.1. Classe 1	17
I.5.1.2. Classe 2	17
I.5.1.3. Classe 3	18
I.5.1.4. Classe 4	18
I.5.2. Méthodes de mesures de la sévérité d'un site	19

I.5.2.1. Densité du dépôt de sel équivalent	19
I.5.2.2. Conductance superficielle	19
I.5.2.3. Courant de fuite	20
I.5.2.3.1. Comptage d'impulsions	20
I.5.2.3.2. Courant de fuite crête	20
I.5.2.4. Contrainte de contournement	21
I.5.2.5. Autres méthodes	21
I.6. METHODES D'ESSAIS SOUS POLLUTION	22
I.6.1. Essais sous pollution naturelle	22
I.6.2. Essais sous pollution artificielle	23
I.6.2.1. Méthode de brouillard salin	23
I.6.2.2. Méthodes des couches solides	24
I.6.2.3. Critiques de ces méthodes d'essais	25
I.7. CONCLUSION	25

**CHAPITRE 2: MODELES DE DEVELOPPEMENT DE L'ARC ELECTRIQUE
SUR DES SURFACES ISOLANTES POLLUEES**

II.1. MODELES A COURANT CONTINU	28
II.1.1. Modèles simples	28
II.1.2. Amélioration des modèles à courant continu	33
II.1.2.1. Modèle de la couche mixte	33
II.1.2.2. Modèle du disque circulaire	36
II.2. MODELES A COURANT ALTERNATIF	39
II.2.1. Modèles théoriques	39
II.2.1.1. Modèle par rupture énergétique	40
II.2.1.2. Modèle par rupture diélectrique	41
II.2.2. Modèles expérimentaux	42
II.3 CONCLUSION	44

**CHAPITRE 3: ETUDE MATHEMATIQUE DES ISOLATEURS POLLUES BASEE
SUR LE MODELE DE CLAVERIE ET PORCHERON**

III.1. FORMULATION MATHEMATIQUE DU MODELE	46
III.1.1. Etablissement des équations fondamentales	46
III.1.1.1. Equation du circuit	47
III.1.1.2. Tension d'arc	47
III.1.1.3. Fonction caractéristique de répartition de la couche polluante	48
III.1.2. Condition limite de maintien de l'arc électrique en courant alternatif	49
III.1.3. Hypothèse simplificatrice	50
III.1.4. Longueur d'arc maximale en fonction de la tension et de la pollution	51
III.1.5. Tension appliquée en fonction de la pollution .	51
III.1.6. Contournement	52
III.1.7. Corrélation entre courant de fuite et tension de contournement - Coefficient de sécurité de l'isolement pollué	54
III.1.8. Caractéristiques des couches polluantes naturelles	55
III.1.8.1. Détermination de la fonction caractéristique de la couche polluante	56
III.1.8.2. Propriétés des fonctions de répartition des couches polluantes	57
III.1.8.3. Caractérisation du degré de pollution d'un site - Salinité équivalente	58
III.2. SIMULATION NUMERIQUE	60
III.3. VALIDATION	64
III.3.1. Dispositif expérimental	64
III.3.2. Résultats obtenus par simulation	65
III.4. CONCLUSION	69

**CHAPITRE 4: ETUDE MATHEMATIQUE DE LA PROPAGATION DE L'ARC
ELCTRIQUE SUR DES SURFACES POLLUEES EN REGIONS
DESERTIQUES AU SAHARA SEPTENTRIONAL EST ALGERIEN**

IV.1. INFLUENCE DES FACTEURS CLIMATIQUES SUR LE COMPORTEMENT DES ISOLATEURS	702
IV.2. SOURCES DE POLLUTION	73
IV.3. TYPES D'ISOLATEURS UTILISES	74
IV.4. MODELE EXPERIMENTAL UTILISE - METHODE D'ESSAIS	76
IV.4.1. Réalisation du modèle	76
IV.4.2. Méthode d'essais	77
IV.4.2.1. Cas de la couche continue	77
IV.4.2.2. Cas de la couche discontinue	78
IV.5. RESULTATS OBTENUS PAR SIMULATION ET INTERPRETATIONS ...	79
IV.5.1. Valeurs critiques	80
IV.5.1.1. Région de Hassi-Messaoud	81
IV.5.1.1.1. Pollution continue	81
IV.5.1.1.2. Pollution discontinue	81
IV.5.1.2. Région de Hassi-R'mel	82
IV.5.1.2.1. Pollution continue	82
IV.5.1.2.2. Pollution discontinue	82
IV.5.2. Caractéristiques obtenues	82
IV.5.2.1. Caractéristiques tension d'essai - courant de fuite	93
IV.5.2.2. Caractéristiques tension d'essai - longueur d'arc	93
IV.5.2.3. Caractéristiques tension d'essai sur la résistivité élevée à puissance $n/(n+1)$ - longueur d'arc	94
IV.5.2.4. Caractéristiques courant de fuite - longueur d'arc	94
IV.5.2.5. Caractéristiques fonction de répartition de la	

couche polluante - longueur d'arc	95
IV.5.2.6. Caractéristiques coefficient de sécurité - produit relatif	96
IV.6. CONCLUSION	97
CONCLUSION GENERALE	99
BLBLOGRAPHIE	102
TABLE DES MATIERES	109