

MODELISATION DYNAMIQUE DU CONTOURNEMENT DES ISOLATEURS POLLUES DES LIGNES AERIENNES EN HAUTE TENSION

H. HADI, S. FLAZI & A. TAIEB

Département d'électrotechnique, Faculté de Génie électrique, Université des sciences et de la technologie USTO- d'Oran, Oran.

Résumé

L'objectif de ce travail est l'étude du phénomène de pollution des isolateurs qui représente une des causes principales des avaries sur le transport de l'énergie électrique. Ce phénomène a été modélisé à l'aide d'un modèle dynamique. L'influence du niveau de la contamination et de la forme géométrique sur la répartition des potentiels au voisinage de l'isolateur et sur la propagation de la décharge électrique sont étudiées. Les paramètres géométriques sont utilisés pour décrire l'influence du profil de l'isolateur sur la tension de contournement.

Le modèle dynamique proposé est basé sur le concept d'Obenaus. Ce modèle tient compte du profil de l'isolateur à chaque instant dans l'élongation de la décharge sur la surface de l'isolateur. La configuration de l'isolateur joue un important rôle dans le processus de contournement des isolateurs pollués.

Les résultats de calcul sont comparés avec des données expérimentales. L'accord dans les résultats suggère que les informations qui peuvent être obtenues à l'aide de ce modèle sont très utiles dans le dimensionnement des isolateurs pour les régions polluées.

Abstract

The objective of this work is the study of the phenomenon of pollution of the insulators which represents one of the principal causes of the damages on the transport of the electric power. This phenomenon was modelled using a dynamic model. The influence of the level of the contamination and the geometrical form on the distribution of the potentials in the vicinity of the insulator and on the propagation of the electric discharge are studied. The geometrical parameters are used to describe the influence of the profile of the insulator on the voltage of flashover.

The dynamic model suggested is based on the concept of Obenaus. This model at every moment takes account of the profile of the insulator in the elongation of the discharge on the surface of the insulator. The configuration of the insulator plays a significant role in the process of flashover of the polluted insulators. The computation results are compared with experimental data. The agreement in the results suggests that information which can be obtained using this model is very useful in the dimensioning of the insulators for the polluted areas.

INTRODUCTION

Les éléments constituant les systèmes de transport d'énergie électrique sont exposés à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution des isolateurs constitue un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie. Quelle que soit leur nature, les polluants posent généralement peu de problèmes lorsqu'ils sont secs.

Cependant humidifiés, les dépôts de pollution deviennent conducteurs. Le courant de fuite qui prend naissance suite à une mise sous tension, conduit à l'échauffement de cette couche provoquant

ainsi son assèchement. Une partie importante de la tension appliquée se trouve alors reportée sur cette bande sèche, sur laquelle une décharge pourra s'amorcer si le champ électrique local (au niveau de cette couche) est suffisant. Selon les conditions électriques, cette décharge s'éteint ou se maintient sur la surface de l'isolateur provoquant l'érosion du diélectrique. Dans le cas extrême, la décharge évolue vers le contournement total de l'isolateur.

La majorité des modèles dynamiques disponibles considère une colonne d'électrolyte qu'un isolateur réel [1]; cela a motivé d'autres

chercheurs[2,3] à développer un modèle dynamique qui prend en considération la géométrie de l'isolateur réel. C'est dans cet objectif que nous allons présenter notre travail qui est basé sur la modélisation dynamique du modèle d'Obenaus appliquée à un isolateur réel

MODELE D'UN ISOLATEUR POLLUE

La plupart des modèles ayant donné les résultats les plus importants sur le contournement peuvent être rapportés au modèle d'Obenaus [4]. Il a représenté le phénomène par un système formé d'une décharge électrique de longueur donnée placée en série avec une résistance, représentant la couche conductrice de pollution sur la surface de l'isolateur. Ce modèle permet une bonne approche paramétrique du problème et peut être représenté par le schéma électrique donné par la figure 2.

SCHEMA D'UN ISOLATEUR POLLUE :

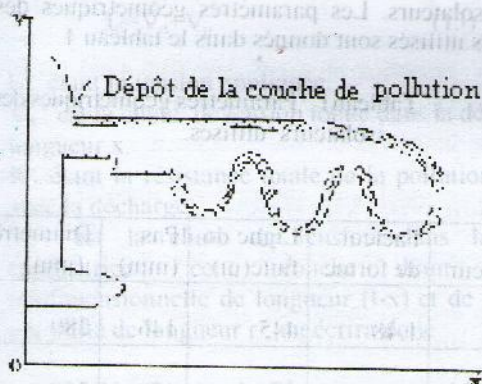


Figure 1: Isolateur réel pollué.

CIRCUIT ELECTRIQUE EQUIVALENT :

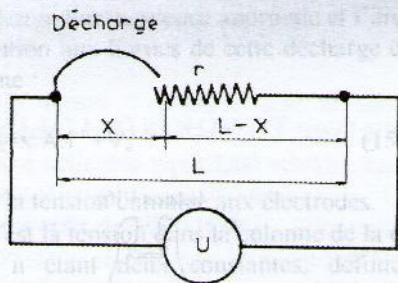


Figure 2: Schéma électrique équivalent d'un isolateur réel pollué.

FORMULATIONS MATHÉMATIQUES DES PARAMETRES DES ISOLATEURS

Pour déterminer la résistance de la couche de pollution, il faut connaître le facteur de forme de l'isolateur qui est défini par la relation suivante :

$$f = \int_0^L \frac{dl}{2\pi \cdot x(l)} \quad (1)$$

où l est l'abscisse curviligne au point de l'isolateur ou longueur de fuite et $x(l)$ est le rayon au point d'abscisse l .

On peut déterminer la résistance de la couche de pollution comme suite:

$$dR = \frac{\rho}{S} dl = \frac{\rho}{2\pi x(l)e} dl \quad (2)$$

on obtient :

$$R = \frac{\rho}{e} \int_0^L \frac{dl}{2\pi \cdot x(l)} = f \cdot \frac{\rho}{e} \quad (3)$$

e : épaisseur de la couche de pollution.

Pour calculer la fonction $x(l)$, pour la longueur totale de la ligne de fuite, il faut déterminer l'ensemble des segments entre deux nœuds consécutifs qui constituent la ligne de fuite totale de l'isolateur. Pour cela, nous avons utilisé la méthode d'interpolation cubique appelée « Spline Cubique » entre deux nœuds de coordonnées (x_i, y_i) et (x_{i+1}, y_{i+1}) qui constituent la géométrie de l'isolateur. De même la détermination de l'élément de longueur dl se fait de la manière suivante :

Soient $A(a, c)$ et $B(b, d)$ deux points de la courbe $y = f(x)$ qui constituent la ligne de fuite de l'isolateur. Si $f(x)$ et sa dérivée $f'(x)$ sont continues sur l'intervalle $a \geq x \geq b$ la longueur de l'arc AB est donnée par:

$$L = \int_{AB} dl = \int_a^b \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (4)$$

D'où

$$L = \int_{AB} dl = \int_a^b \sqrt{1 + f'(x)^2} dx \quad (5)$$

et

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi e} \int_{L_1}^{L_{i+1}} \frac{dl}{x_1(l)} = \frac{\rho}{2\pi e} \int_{L_1}^{L_{i+1}} \frac{\sqrt{1 + f'(x)^2}}{x_1(l)} dx \quad (6)$$

Connaissant la résistance R_i en chaque nœud de la ligne de fuite, on peut calculer les potentiels V_i correspondants par la relation $V_i=R_i.I$ après avoir déterminé auparavant le courant de fuite I qui est déterminé par le rapport entre la tension appliquée à l'isolateur et la résistance totale de la couche de pollution.

$$I=\frac{\sum_{i=1}^m V_i}{\sum_{i=1}^m R_i}=\frac{V}{R}$$

(7)

POLLUTION NON UNIFORME D'UN ISOLATEUR

Dans le cas où la répartition de la pollution est non uniforme, l'isolateur est divisé en m parties à travers sa ligne de fuite L . La densité du dépôt de sel équivalent C en chaque partie est considérée constante.
La conductivité surfacique est :

$$X_s=(395.05\times C+0.42)\times 10^{-6}$$

(8)

où X_s est la conductivité de la surface, X_s est donnée en fonction de la densité du dépôt de sel équivalent C (ESDD). X_s est obtenue en Ω^{-1} . Pour une concentration C , elle est exprimé en mg/cm^2 .

$$D_1=\frac{L}{\pi \cdot f}$$

(9)

Le diamètre équivalent de l'isolateur D_1 est exprimé en centimètres, f est le facteur de forme.
Le facteur de forme de l'isolateur sera considéré d'après l'équation (10) :

$$f=\sum_{i=1}^m \frac{L_i}{\pi \cdot D_m(L_i)}$$

(10)

Où $D_m(L_i)$ est le diamètre moyen de la partie i de l'isolateur. Chaque terme de la somme correspond à un facteur de forme f_i des parties i :

$$f_i=\frac{L_i}{\pi \cdot D_m(L_i)}$$

(11)

le facteur de forme total d'un isolateur s'écrit donc :

$$f=\sum_{i=1}^m f_i$$

(12)

TYPES D'ISOLATEURS UTILISES [9]

Pour les isolateurs choisis (figure 3), deux sont de type anti pollution et le troisième est de type aérodynamique (plat). Nous avons élaboré un programme de calcul numérique basé sur la méthode des éléments finis pour déterminer les caractéristiques de ces isolateurs. Les paramètres géométriques des isolateurs utilisés sont donnés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Paramètres géométriques des isolateurs utilisés.

Type d'isolateur	Facteur de forme	Ligne de fuite(m)	Pas (mm)	Diamètre (mm)
U80AS	1.48	445	146	280
U160AS	1.04	540	170	320
U120AS	0.80	540	146	320

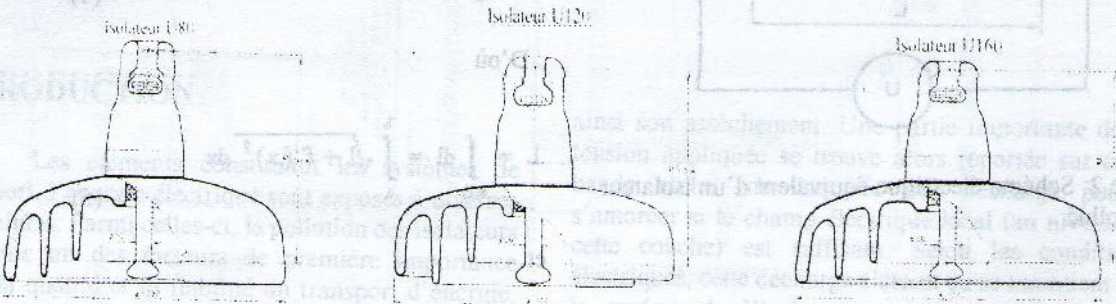


Figure 3: Schémas des isolateurs utilisés dans le programme.

ORGANIGRAMME DE CALCUL

Notre organigramme de travail est réalisé sur la base du circuit électrique de la figure 2 qui est le schéma équivalent de l'isolateur réel pollué représenté par la figure 1.

Le modèle dynamique proposé est basé sur le concept d'Obenaus. Ce modèle tient compte du profil de l'isolateur à chaque instant dans l'élongation de la décharge sur la surface de l'isolateur. La configuration de l'isolateur joue un important rôle dans le processus de contournement des isolateurs pollués. Par rapport à nos prédécesseurs, notre modèle de calcul est basé uniquement sur la connaissance de la tension appliquée de service et de la sévérité de la pollution. L'organigramme de calcul (figure 4) le montre clairement.

D'après le circuit électrique équivalent (figure 2), la distribution de potentiel dans ce circuit s'écrit :

$$U=V_d+V_p \tag{13}$$

U : étant la tension appliquée.
V_d : est la chute de tension totale dans la décharge de longueur x.
R : étant la résistance totale de la pollution en série avec la décharge.
V_p : est la chute de tension dans la couche conductrice : cette couche étant supposée unidimensionnelle de longueur (l-x) et de résistance par unité de longueur r ; on écrira donc :

$$V_p=(l-x).r.I=RI \tag{14}$$

La décharge couramment observée sur les isolateurs dans l'air à la pression atmosphérique est parcourue par un courant qui varie dans la gamme de 10 à 1000mA [7]. Elle est du type intermédiaire entre la décharge luminescence anormale et l'arc. L'équation aux bornes de cette décharge est donc de la forme :

$$V_d=x.A.I^n+V_e \tag{15}$$

V_e est la tension cumulée aux électrodes.
x.A.Iⁿ est la tension dans la colonne de la décharge.
A et n étant deux constantes, définies par les conditions expérimentales. Pour une décharge dans l'air sec, on prend souvent A=63 A/cm, n=0.76 et V_e=900 V; dans une atmosphère saturée en vapeur d'eau on prend : A=530 A/cm et n=0.24. [7]. L'équation électrique complète correspondant au schéma de la figure 2 sera de la forme :

$$U=x.A.I^n+(L-x).r.I+V_e \tag{16}$$

si l'on admet que V_e est constante, et que l'on pose :

$$V=U-V_e \tag{17}$$

L'équation s'écrit alors :

$$V=x.A.I^n+(L-x).r.I \tag{18}$$

r : est la résistance par unité de longueur de la couche de pollution.
Pour un isolateur réel, r est défini par la relation suivante

$$r=\frac{1}{\pi \cdot D_d \cdot X_s} \tag{19}$$

où X_s est la conductivité de la surface et D_d le diamètre équivalent de l'isolateur pollué.

Le courant est donné par la relation suivante :

$$I=\frac{V-A.x.I^n}{R} \tag{20}$$

Pour obtenir le courant I la méthode de Newton est la plus indiquée et fournit la solution de l'équation (20). En effet, soit l'équation F(x) = 0
La résolution de cette équation est déterminée à partir de la relation suivante :

$$X_{n+1}=X_n-\frac{f(X_n)}{f'(X_n)} \tag{21}$$

dans notre cas l'équation (20) s'écrit sous la forme :

$$I.R-(V-A.x_{arc}.I^n)=0 \tag{22}$$

Et la formule (21) pour la solution de l'équation (22) devient alors :

$$I_p=I_{p-1}-\frac{R.I_{p-1}-\left(V-A.x_{arc}.I_{p-1}^n \right)}{R-A.n.x_{arc}.I_{p-1}^{n-1}} \tag{23}$$

Pour résoudre cette équation, la couche de pollution est supposée homogène et uniforme. La résistance est calculée à chaque instant en fonction de l'élongation de la décharge.

Pendant son élongation, la décharge doit trouver des conditions électriques favorables dans son trajet pour qu'elle se déplace sur la pollution, sinon elle s'éteint. Ces conditions favorables sont remplies si le critère de propagation de la décharge est vérifié [5]. C'est à dire si le gradient de potentiel dans la pollution est supérieur au gradient de potentiel dans la colonne de la décharge électrique. l'arc se propage sur la surface conductrice. Ce critère est donné par l'inégalité

$$E_p>E_a \tag{24}$$

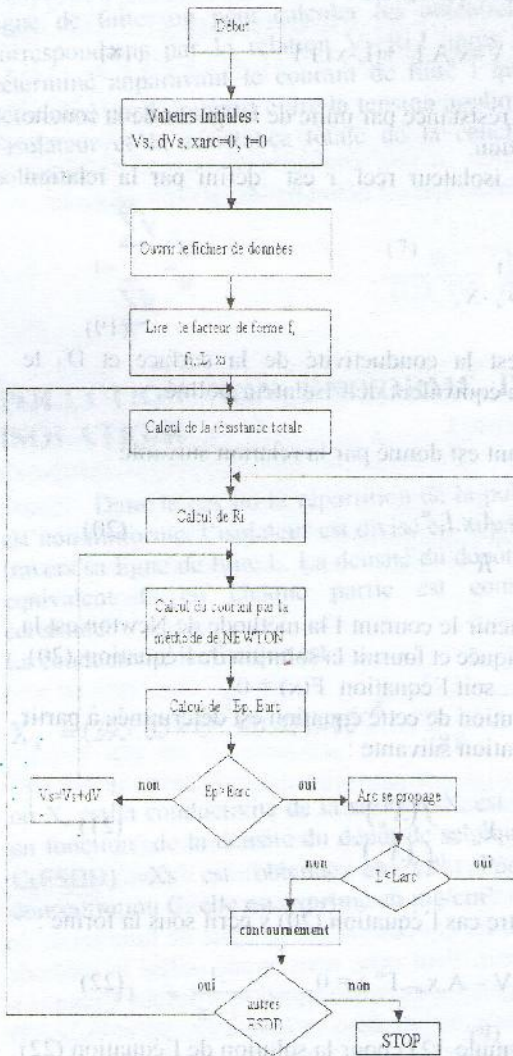


Figure 4: Organigramme de travail

RESULTATS DE CALCUL

La figure 5 présente les tensions de contournement en fonction de la densité du dépôt de sel équivalent (ESDD). Les courbes données dans cette figure montrent la comparaison entre les tensions de contournement expérimentales, les tensions calculées en utilisant le modèle de Sundarajan[2], et les tensions de contournement calculées en utilisant le modèle proposé. Il est relevé que notre modèle donne les tensions de contournement qui s'approchent des tensions expérimentales [8].

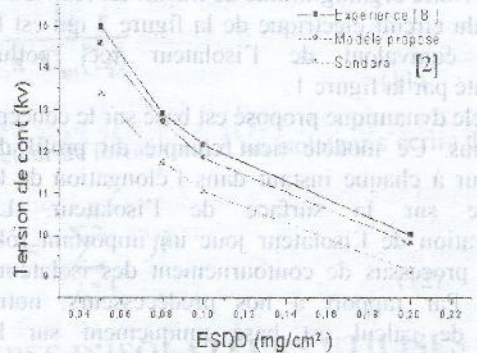


Figure 5: Tension de contournement en fonction de l'ESDD pour un isolateur réel type UI60. Comparaison entre le modèle de Sundara[2], le modèle expérimental [8] et le modèle proposé.

INFLUENCE DE TYPE DE POLLUTION

Nous allons étudier l'influence du type de pollution sur la tension de contournement.

a) Pollution type kieselguhr

La composition de la suspension contaminante est : 100 g de kieselguhr, de 10 g de bioxyde de silicium, de 1000 g d'eau de robinet et d'une quantité adéquate de sel de NaCl.

D'après des mesures expérimentales au laboratoire, il a été obtenu l'expression empirique de la conductivité en fonction du ESDD :

$$\sigma = (395.05.Cs + 0.42).10^{-6} [s]$$

Cs : la densité du dépôt de sel équivalent (ESDD) [mg/cm²]

b) Pollution type TONOKO (KAOLIN)

Cette composition de la suspension contaminante contient : 40 g de kaolin, 1000 g d'eau de robinet et d'une quantité adéquate de sel de NaCl.

D'après des mesures expérimentales au laboratoire, il a été obtenu l'expression empirique de la conductivité en fonction de le ESDD :

$$\sigma = 85.832.Cs^{0.9044} [s]$$

Cs : la densité du dépôt de sel équivalent (ESDD) [mg/cm²].

CONCLUSION

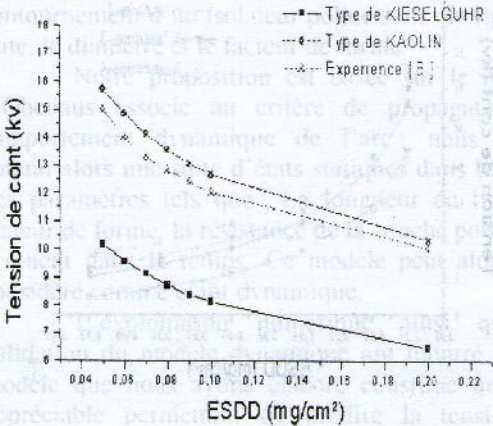


Figure 6: Tension de contournement en fonction de l'ESDD pour différents types de pollution pour un isolateur réel (U160).

D'après les résultats de calculs représentés par la figure 6, nous avons remarqué que le type de pollution influe sur la tension de contournement. Cette différence de la tension de contournement pour un même type d'isolateur et le même ESDD est due à la différence de la résistance de la couche de pollution car pour une même densité du dépôt de sel équivalent la conductivité de la couche de pollution dépend du type de pollution, par conséquent la résistance de contamination en dépendra aussi.

INFLUENCE DE LA GEOMETRIE DU PROFIL DE L'ISOLATEUR

La figure 7 indique que la tension de contournement de l'isolateur type U160 est supérieure à celle des types U80 et U120. La tension de contournement de l'isolateur type U80 est supérieure à celle du type U120.

La figure 8 présente la comparaison de la tension par unité de longueur en fonction de la sévérité de la pollution entre les trois types d'isolateurs. Concernant les valeurs du champ critique pour les trois isolateurs (figure 8), on remarque que l'isolateur U160 possède le champ critique le plus faible. Par contre, l'isolateur U120 possède un champ critique supérieur à ceux du type U160 et du type U80. Cela peut être traduit par l'influence du profil sur la tension de contournement.

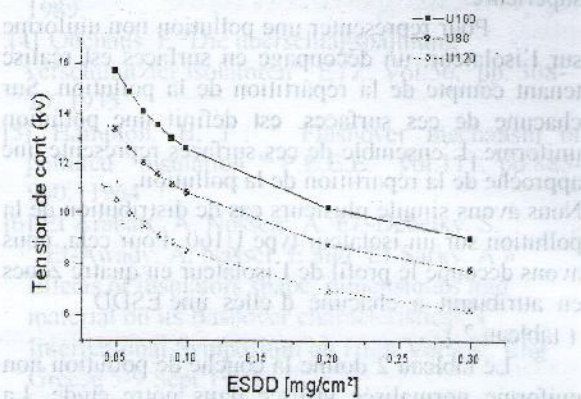


Figure 7: Tension de contournement en fonction de l'ESDD pour différents types d'isolateurs

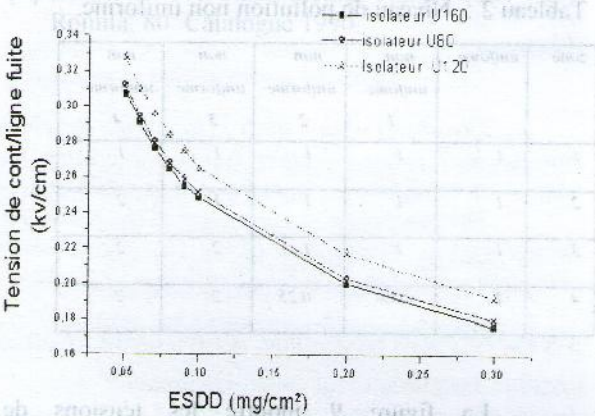


Figure 8: Tension de contournement par ligne de fuite (kV/cm) en fonction de l'ESDD pour différents types d'isolateur.

EFFET DE LA NON UNIFORMITE DE LA DISTRIBUTION DE LA POLLUTION

En réalité, la distribution de la pollution sur une surface d'un isolateur est loin d'être uniforme. La répartition de la non uniformité de la pollution peut être entre la surface supérieure et la surface inférieure de l'isolateur et aussi le long de la longueur de l'isolateur. La répartition de la pollution sur la surface dépend des conditions naturelles. On voit donc généralement que la surface supérieure est moins polluée par rapport à la surface inférieure à cause de l'effet de la pluie qui lave la surface supérieure. El

Arbaty et col[6] ont montré la variation de la pollution à différents endroits de la surface avant et après la pluie. Ces auteurs ont trouvé que la sévérité de la pollution devient très faible à la surface supérieure.

Pour représenter une pollution non uniforme sur l'isolateur, un découpage en surfaces est réalisé tenant compte de la répartition de la pollution. Sur chacune de ces surfaces, est défini une pollution uniforme. L'ensemble de ces surfaces représente une approche de la répartition de la pollution. Nous avons simulé plusieurs cas de distribution de la pollution sur un isolateur type U160. Pour cela, nous avons découpé le profil de l'isolateur en quatre zones en attribuant à chacune d'elles une ESDD (tableau 2).

Le tableau 2 donne la couche de pollution non uniforme normalisée utilisée dans notre étude. La colonne correspondant au cas 1 signifie que la zone 4 possède une sévérité de pollution égale à 50% que les autres zones. De même la colonne 3 montre que les zones 3 et 4 ont une sévérité égale à 200% des autres zones.

Tableau 2 : Niveau de pollution non uniforme.

zone	uniforme	non uniforme	non uniforme	non uniforme	non uniforme
		1	2	3	4
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2
3	1	1	1	2	2
4	1	0.5	0.25	2	2

La figure 9 montre les tensions de contournement obtenues en fonction de la sévérité de la pollution pour l'isolateur type U160. L'étude de l'effet de la répartition non homogène de la pollution le long de la surface de l'isolateur montre que la tension de contournement augmente ou diminue en fonction de la sévérité de la non uniformité de la pollution. Nous remarquons que la tension de contournement dans le cas non uniforme est supérieure au cas où la pollution est uniforme. Cette tension dépend de la nature et de la répartition de la pollution le long de l'isolateur. A partir de ces résultats, on peut dire que si la distribution de la pollution est connue, un dimensionnement de l'isolateur peut être réalisé pour chaque région de pollution.

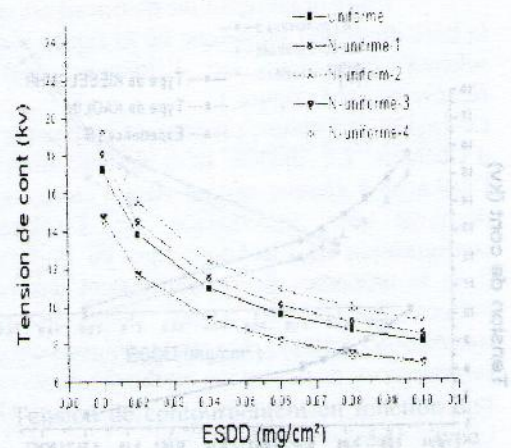


Figure 9: Tension de contournement en fonction de l'ESDD pour un isolateur réel U160

INFLUENCE DU DIAMETRE

Nous avons simulé deux types d'isolateur ayant la même longueur de la ligne de fuite mais leurs diamètres sont différents. On remarque que l'augmentation de la tension de contournement est inversement proportionnelle à l'augmentation du diamètre. Cela peut être expliqué par le fait qu'un isolateur ayant un diamètre grand est beaucoup plus susceptible de retenir l'eau et la pollution ce qui évoque une densité du dépôt élevée, d'où une tension de contournement faible (figure 10).

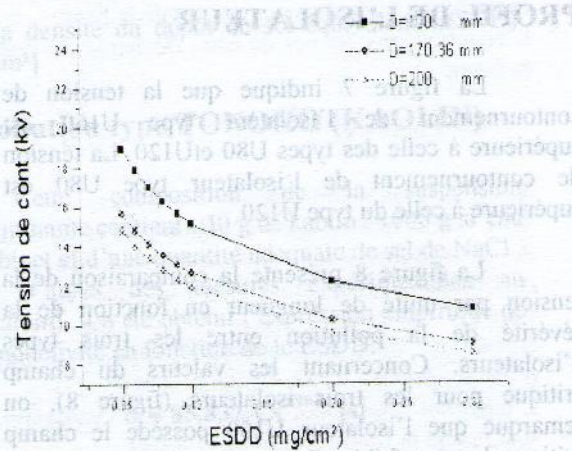


Figure 10: Tension de contournement en fonction de l'ESDD pour différentes valeurs de diamètres.

CONCLUSION

D'après les résultats de calcul que nous avons obtenus, nous pouvons dire que les facteurs géométriques qui influent sur la tension de contournement d'un isolateur pollué sont : la ligne de fuite, le diamètre et le facteur de forme.

Notre proposition est basée sur le modèle d'Obenaus associé au critère de propagation de comportement dynamique de l'arc : nous avons obtenu alors une suite d'états statiques dans lesquels des paramètres tels que : La longueur de l'arc, le facteur de forme, la résistance de la couche polluante, évoluent dans le temps. Ce modèle peut alors être considéré comme étant dynamique.

L'exploitation numérique ainsi que la validation du modèle dynamique ont montré que le modèle que nous avons élaboré constitue un outil appréciable permettant de prédire la tension de contournement et de décrire l'évolution de différentes grandeurs électriques caractéristiques d'un système d'isolation.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] "J.S.P.Filho" Analyse du contournement d'une surface faiblement conductrice par une décharge électrique alimentée en courant continu. Thèse de Docteur d'université. UPS.Toulouse 1986.
- [2] Sundarajan, R. Gorur, R. S. : " Dynamic arc modelling of pollution flashover of insulators under DC voltage." I.E.E.E. Trans. on Elect. Insul. vol.28 . n°2, pp.209-219. April 1993.
- [3] Sanjana, S. Lakshminarasimha, C. : " Computed of flashover voltage insulators using dynamic arc model " 6th International symposium on high voltage engineering, paper 30.09, New Orleans 1989.
- [4] Obenaus, F. "Die überschlagspannung verschmutzter isolatoren". ETZ. Vol.56, pp. 368-70, 1935.
- [5] Hampton, B. F : " Flashover mechanism of polluted insulation " P.E.E.E. vol.111, pp.885-990, 1964
- [6] El Arabaty, A. Nosseir, A. El-Debeiky, S. El-Awady, A. Nasser, E and El-Sarky, A » Effects of insulators shape, dimensions and material on its flashover characteristics» 4th International Symposium on High Voltage, Eng. Greece 5-9 Sept.1983.
- [7] Wilkins, R " Flashover voltage of HV. insulators with uniform pollution films" I.E.E.E. vol.116, pp.54 -64, 1969
- [8] Sundarajan, R. Gorur, R. S. « Dynamic modeling of flashover on dielectric surfaces », Proc. Of the 3rd Int. Conf. On properties and applications of dielectric materials, July 8-12, 1991, Tokyo, Japan.
- [9] Borma, S. PA: Stabilimento, Treme, Italy. Via Romita, 80. Catalogue 1990.