

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
LABORATOIRE DE RECHERCHE EN ELECTROTECHNIQUE

Ecole Doctorale De Génie Electrique
Option : Réseaux Electriques et Haute Tension

Mémoire de Magistère

Présenté par :

Yacine Abderrahmane BENCHERIF
Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Thème

***Elaboration d'un Modèle de Contournement
d'un Isolateur Haute Tension Sous Pollution
Uniforme et Non Uniforme***

Soutenu le 19/12/2011 devant la commission d'examen :

Président : A. BOUBAKEUR, Professeur, ENP.

Rapporteurs : A. MEKHALDI, Professeur, ENP.

Examineurs : M. TEGUAR, Professeur, ENP.

L.NEZLI, Maitre de Conférences, ENP.

R.TAHMI, Maitre de Conférences, ENP.

REMERCIEMENTS

Avant tout je remercie Dieu Le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Je tiens à exprimer mes remerciements et ma gratitude à monsieur **M. MEKHALDI**, professeur à l'ENP, pour avoir assumé la responsabilité de m'encadrer, m'orienter et de me conseiller tout au long de la réalisation de ce travail.

Je remercie vivement tous les enseignants et tous ceux à qui nous devons notre formation.

Des remerciements vont également à tous ceux qui, d'une quelconque façon, ont contribué à l'élaboration de ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents qui m'ont soutenu durant toute la durée de mes études.

À mes très chères sœurs et à ma grande famille.

À tous mes amis.

À tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

À vous.

Yacine.

ملخص

في هذا العمل نقوم بتقديم نموذج لعازل كهربائي متلوث. اقترح في بداية الامر نموذج ديناميكي متنبئ لمميزات القوس الكهربائي الذي يمتد على المساحات العازلة المتلوثه. وذلك بالاعتماد على دارة كهربائية مكافئة و مستعملة لمعيار امتداد هامبتون , تم التحقق من النتائج بالارتكاز على نتائج تجريبية حققت في المدرسة الوطنية متعددة التقنيات بالجزائر, كما اخذت هندسة العازل بعين الاعتبار مستخدمة نمودجا مفتوحا ثنائي الابعاد. فيما بعد, أنشأنا نمودجا جديدا للعازل باستخدام أسلوب هجين للانحدار. أنه يقوم على اسلوب إحصائي للتعلم المشرف عليه وتقنية للتحسين. تم هذا الإجراء قصد تقديم افضل اداء ممكن للنتبؤ بتوتر الإحاطة. أجريت اختبارات للتحقق من جدوى هذا الأسلوب.

الكلمات المفتاحية: عازل, تلوث, الإحاطة, نموذج نظري, نموذج ديناميكي, قوس كهربائي, تراجع, SVM, LSSVM, شدة تيار الإحاطة, التحسين, شبكة, تعلم مشرف عليه, GPS, عبر التحقق من صحة,

Résumé

Dans ce travail nous présentons une modélisation du contournement d'un isolateur haute tension sous pollution. Dans une première étape nous établissons un modèle dynamique prédisant les caractéristiques de la décharge qui se propage sur la surface polluée de l'isolateur. Pour cela nous nous basons sur un circuit électrique équivalent et utilisons le critère de propagation de Hampton. Une validation du modèle a été effectuée en s'appuyant sur des résultats expérimentaux réalisés au sein de l'école nationale polytechnique d'Alger. La géométrie de l'isolateur a été prise en compte par l'utilisation du modèle ouvert. Celui-ci consiste à étaler la surface de l'isolateur sur un plan à deux dimensions.

En second lieu, nous établissons un modèle de l'isolateur qui fait appel à une méthode hybride de régression. Elle se base sur une méthode statistique d'apprentissage supervisé et une technique d'optimisation numérique. Cette dernière sera utilisée pour présenter les meilleures performances et obtenir la meilleure prédiction possible de la tension de contournement de l'isolateur pollué. Des tests et des validations ont été effectués afin de vérifier la viabilité de cette méthode.

Mots clés : Isolateur – pollution – contournement – modèle théorique - modèle dynamique – arc électrique – régression – SVM – LSSVM – GPS – Validation croisée – courant de la décharge – optimisation – maillage – apprentissage supervisé.

Abstract

In This work we present a modelling of a high voltage polluted insulator. Firstly, we made a dynamic model for the prediction of the characteristics of the discharge which propagate on the polluted insulation surface. We based on an equivalent electrical circuit by using the propagation criteria of Hampton. A validation was done by using works which was done at the national polytechnic school of Algiers. The shape of the insulator was considered by using its open model. This open model is a transformation of the insulator profile to a 2D representation.

Secondly, we established a new model of the insulator using a hybrid regression method. It is based on a supervised learning method and an optimisation technique. This procedure was made in order to have the best performances and get the best prediction of the flashover of the polluted insulator. Tests and validations were done in order de check the viability of this method.

Keywords : Insulator – pollution – flashover – theoretical model – dynamic model – electric discharge – regression – SVM – LSSVM – GPS – cross validation – discharge current – optimization – meshing – supervised learning.

SOMMAIRE

Remerciements.....	i
Dédicaces.....	ii
Résumé.....	iv
Sommaire.....	v
Introduction générale.....	01
Chapitre 1 : Principaux modèles théoriques du contournement des isolateurs à haute tension	
1. Introduction	04
2. Modèles statiques de contournement	05
3. Modèles dynamiques de contournement.....	08
3.1. Critères de propagation	08
3.2. Modèles dynamiques.....	09
3.3. Vitesse de propagation	11
4. Modèles se basant sur les méthodes statistiques d'apprentissage supervisées ..	12
5. Conclusion.....	13
Chapitre 2 : Modélisation dynamique de l'arc électrique de contournement d'un isolateur pollué	
1. Introduction	14
2. Hypothèses simplificatrices	15
3. Circuit électrique équivalent	15
4. Propagation de la décharge	16
4.1. Initialisation de la décharge	16
4.2. Critère de propagation de la décharge.....	17
5. Les paramètres du circuit électrique équivalent.....	17

5.1. Equation du circuit électrique équivalent.....	17
5.2. Les caractéristiques de la couche de pollution.....	17
5.3. Les caractéristiques de l'arc.....	19
6. La vitesse de propagation.....	20
7. Le contournement.....	20
8. Simulation numérique.....	20
9. Validation.....	22
9.1. Isolateur avec une surface uniformément polluée.....	22
9.2. Isolateur avec une surface non-uniformément polluée.....	27
10. Conclusion.....	31

Chapitre 3 : Modèle de régression par méthode LS SVM

1. Introduction.....	33
2. Notions de base.....	34
2.1. Hyperplan.....	34
2.2. Vecteur de support.....	34
2.3. Marge.....	35
3. Principes théoriques:.....	36
3.1. Régression par SVM.....	36
3.1.1. Cas linéaire.....	37
3.1.2 Cas non-linéaire.....	38
3.2. Régression par LS-SVM.....	39
4. Conclusion.....	41

Chapitre 4: Validation des résultats de régression par méthode LS SVM

1. Introduction.....	42
2. Validation croisée.....	43
2.1. Principe général.....	43

2.2. Validation croisée par la méthode du « test set ».....	43
2.3. Validation croisée par la méthode « leave-one-out ».....	43
2.4. Validation croisée par la méthode du « k-fold ».....	43
2.5. Avantages et inconvénients.....	44
3. Paramètres d'évaluation	44
3.1. Erreur standard (RMSE)	44
3.2. Coefficient de variation (COV).....	44
3.3. Coefficient de détermination (R^2)	45
4. Optimisation du modèle de régression LSSVM	45
5. Validations des résultats.....	46
5.1. Espaces d'hypothèses	46
5.2. Résultats et discussion	47
6. Optimisation du modèle LS-SVM avec la méthode de recherche par motifs généralisés (GPS)	53
6.1. Principe de fonctionnement de méthode GPS	53
6.2. Résultats et discussion	55
6. Conclusion.....	59
Conclusion générale	61
Bibliographie.....	63

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'énergie électrique devient à l'aube du troisième millénaire un moyen inévitable pour le développement économique, culturel et social de notre civilisation. Ainsi, les moyens de production, de transport et de distribution de cette forme d'énergie acquièrent une importance stratégique. La sécurité d'approvisionnement de l'électricité doit être donc assurée afin de garantir une pérennité à la croissance d'un pays. Les lignes électriques aériennes ou souterraines assurent le transport d'énergie entre les centrales électriques et le consommateur. Elles sont donc un maillon essentiel dans la chaîne d'approvisionnement en électricité. Les lignes conçues, réalisées, entretenues et exploitées conformément aux normes, prescriptions et directives de sécurité sont exposées à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution de l'isolateur constitue un facteur de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie. En effet, la pollution qui recouvre la surface du système d'isolation peut engendrer son contournement par un arc électrique dans le cas où il est soumis à une humidification. Ceci peut endommager l'isolateur ou engendrer la mise hors service de la ligne [1, 2, 3].

La prise en compte de la pollution devient ainsi essentielle dans le dimensionnement d'une isolation adéquate. Différentes sources peuvent être à l'origine de cette pollution : naturelle, industrielle ou mixte. Le degré de pollution devient ainsi une donnée nécessaire au dimensionnement d'un isolateur. Il est donc important de bien quantifier la sévérité de pollution afin d'assurer une continuité de service. Cette sévérité est généralement caractérisée par l'intensité de précipitations ainsi que par la conductivité des dépôts polluants. La connaissance du comportement de la surface polluée de l'isolateur est donc un paramètre essentiel dont il faudra tenir compte lors de la conception des isolateurs extérieurs de haute

tension. Cette connaissance ne peut avoir lieu qu'à travers des tests approfondis en laboratoire. Ces derniers sont coûteux tant en temps qu'en argent. Pour pallier à ce désagrément une simulation du phénomène étudié est une alternative intéressante. Cette simulation ne peut se faire que par l'établissement d'un modèle théorique équivalent [4, 5].

Comprendre les mécanismes physiques régissant le phénomène de contournement d'un isolateur sous pollution est nécessaire afin de mettre en place des modèles simulant ce phénomène physique. Néanmoins, les avancées théoriques qui ont pu être acquises lors des différentes recherches sur le contournement des isolateurs, n'ont pas pu aboutir à une maîtrise réelle du phénomène. Ceci est dû à sa complexité et au grand nombre de paramètres qui le caractérisent.

Notre étude a ainsi pour objectif d'élaborer un modèle simulant le contournement d'un isolateur pollué par une décharge électrique. Pour ce faire, nous allons d'abord, mettre en place un modèle dynamique utilisant un circuit équivalent permettant de prédire les caractéristiques des décharges se propageant sur les surfaces isolantes couvertes de dépôts contaminants de manière uniforme et non uniforme. Ensuite, nous allons utiliser une méthode statistique d'apprentissage supervisé pour l'estimation de la tension de contournement d'un isolateur pollué. Ce modèle prendra en compte la discontinuité de la couche de pollution ainsi que sa distribution le long de sa ligne de fuite. Notre travail s'étalera sur quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous allons présenter les principaux modèles théoriques de contournement rapportés dans la littérature. Ainsi, nous allons les classer en trois catégories ; les modèles statiques, les modèles dynamiques et les modèles se basant sur les méthodes d'apprentissage supervisé. Les critères de propagation de la décharge seront eux aussi traités. Ce chapitre donne alors une vision globale sur les études relatives au contournement des isolateurs à haute tension.

Dans le deuxième chapitre, nous allons élaborer un modèle dynamique en guise de première proposition à notre problématique. Ce modèle permet de calculer la tension de contournement des isolateurs et de décrire la dynamique de l'arc. Seront donc exposées les différentes expressions mathématiques donnant les principales caractéristiques de la décharge. Plusieurs cas de distribution de la pollution seront étudiés. Une validation des résultats avec des travaux expérimentaux sera effectuée.

Le troisième chapitre comprendra une présentation d'une méthode statistique d'apprentissage supervisé. Nous allons donc décrire les fondements théoriques de cette méthode en introduisant les différentes notions nécessaires à sa compréhension. Une déclinaison de la méthode SVM classique sera présentée. Celle-ci est appelée LS-SVM. Un

comparatif entre les deux méthodes sera effectué et un choix sera fait pour garantir les meilleures performances.

Le quatrième chapitre, quant à lui, fera l'objet d'une deuxième proposition à notre problématique. Celle-ci consiste en une validation des résultats réalisés grâce à un modèle se basant sur la méthode LS-SVM. Les performances de ce modèle seront testées sur le plan de la précision d'estimation et la capacité de généralisation. Les résultats expérimentaux de travaux réalisés au sein de l'école nationale polytechnique d'Alger seront utilisés pour cette validation. La méthode de recherche par motifs généralisés (GPS) sera intégrée dans le processus d'optimisation du modèle de régression. Ceci entre dans une démarche globale de mise en place d'un modèle hybride d'estimation de la tension de contournement d'un isolateur donné.

Principaux modèles théoriques du contournement des isolateurs à haute tension

1. Introduction

Depuis une cinquantaine d'années, plusieurs travaux ont été menés pour comprendre les mécanismes conduisant au contournement des isolateurs pollués et ainsi se prémunir d'outils permettant la prédiction de ce phénomène.

Des modèles théoriques simulant le phénomène de contournement sont apparus. Grâce à ce type de modèles, le coût de conception des isolateurs a été considérablement diminué suite à la réduction des essais expérimentaux.

Au cours de ce chapitre, nous allons exposer une synthèse bibliographique des principaux modèles théoriques développés.

2. Modèles statiques de contournement

C'est Obenaus [6] en 1958 qui est à l'origine des premières analyses quantitatives des problèmes d'arcs se produisant sur des surfaces isolantes planes, recouvertes d'une couche polluante, sous tension continue. En partant d'un circuit électrique équivalent constitué d'un arc de longueur X en série avec une résistance R_p (Figure 1.1), cet auteur a pu déterminer les différentes étapes permettant de calculer la tension de contournement du système étudié. Il en a déduit la tension d'arc suivante:

$$V_{arc} = \frac{XN}{I^n} \quad (1.1)$$

Où I est le courant de fuite, n et N sont les constantes de la caractéristique statique de l'arc.

En appliquant la loi d'Ohm à ce circuit, on peut écrire :

$$V = V_e + V_{arc} + R_p(X) \cdot I \quad (1.2)$$

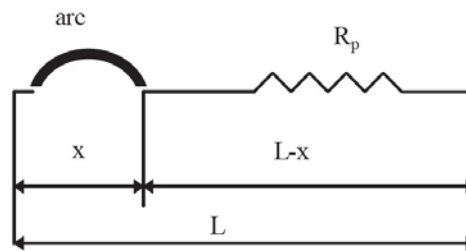


Figure 1.1 - Modèle d'Obenaus. L représente la longueur de fuite totale.

A partir des travaux d'Obenaus [6], et en y ajoutant l'hypothèse d'une couche de pollution de résistivité linéique r_p uniforme le long de la ligne de fuite, Neumarker [7] a pu établir l'expression de la tension aux bornes de l'isolateur en fonction de la résistance de pollution et du courant traversant cette dernière. Il a également établi l'expression du courant et de la longueur critique à partir desquelles le contournement se produit.

Des approches similaires ont été explorées en utilisant des constantes caractéristiques différentes [7,8]. Le tableau 1-1 montre les valeurs des constantes caractéristiques choisies en fonction de l'électrolyte utilisée.

Electrolyte	N	n
NaCl	360	0.59
CaCl ₂	461	0.42
FeCl ₃	270	0.66
CuSO ₄	450	0.49

Tableau 1.1 - Constantes caractéristiques selon Ghosh et al [8].

D'autres études se sont intéressées au calcul de la tension de contournement d'isolateurs réels en les caractérisant par leur facteur de forme et la longueur de leur ligne de fuite [9, 10, 11, 12, 13].

Une tentative de calcul de la tension de contournement d'un isolateur recouvert d'une pollution discontinue a été faite par Wilkins [14]. Il a considéré la variation de la température au niveau de la couche de pollution jusqu'à la formation de la première couche sèche (Figure 1-2). Ainsi cet auteur a déterminé des expressions analytiques de la résistance de la couche de pollution pour le cas d'une bande sèche large et d'une bande étroite. Ces travaux ont permis de calculer la tension de contournement d'un modèle rectangulaire recouvert d'une pollution discontinue sans varier dans le temps.

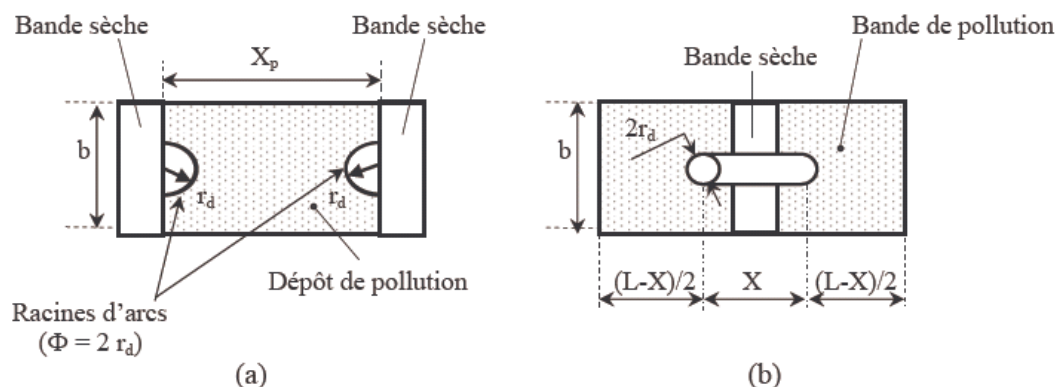


Figure 1.2 - Représentation schématique de la surface d'un isolateur et des pointes de base de l'arc utilisé pour le calcul de la résistance de pollution selon:

(a) Nacke, (b) Wilkins [14].

A partir d'une analyse dimensionnelle, Rizk [15] a décrit le phénomène d'entretien de l'arc et le mécanisme de rupture diélectrique. Il a établi une relation entre la tension de contournement critique V_c , le courant critique I_c , la résistance de pollution linéique r_p et la longueur de fuite L . La méthode de l'analyse dimensionnelle a été utilisée plus récemment dans l'ingénierie de la haute tension pour l'étude des performances de plusieurs types d'isolateurs [14].

Un autre type de modèle a été proposé par Claverie et Porcheron [16]. Ils ont mis au point un dispositif expérimental qui a permis d'établir une corrélation entre le courant de fuite et la tension de contournement. Ils ont montré que l'augmentation de la sévérité de pollution se traduit par une diminution de la résistivité de l'électrolyte. Ainsi, la mesure du courant de fuite permet d'indiquer l'état de la pollution. Le critère de contournement est le suivant : sous une tension donnée, quand la résistivité diminue, le courant croît jusqu'à une valeur critique I_{cr} pour laquelle le contournement se produit.

Dans ses travaux, Rumeli [17] a proposé une nouvelle méthode pour le passage de la forme tridimensionnelle à celle bidimensionnelle d'un isolateur donné (Figure 1.3).

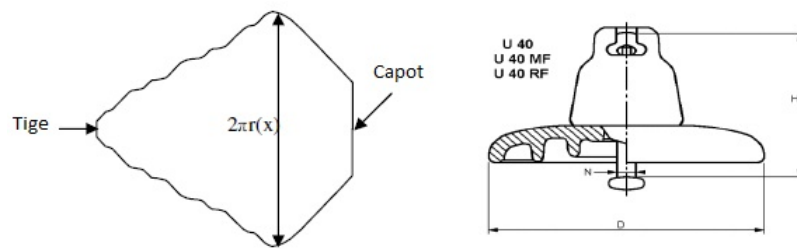


Figure 1.2 – Isolateur à haute tension U-40 et son modèle ouvert en 2D [18].

Cette méthode a été reprise par Marich et Al [18] pour présenter un modèle statique prenant en compte la géométrie de l'isolateur étudié en proposant une nouvelle méthode pour le calcul de la résistance équivalente de la couche de pollution. L'expression de la résistance totale de la pollution devient alors comme suit;

$$R_t = \sum_{i=1}^m \frac{1}{\sigma_s} \int_{l_i}^{l_{i+1}} \frac{dl}{Y(l)} \quad (1.3)$$

Avec

$$Y(x) = 2.\pi.r(x) \quad (1.4)$$

3. Modèles dynamiques de contournement

3.1. Critères de propagation

Les modèles précédemment étudiés sont statiques dans la mesure où ils ne présentent pas de critère de propagation. Les principaux critères de propagation rencontrés dans la littérature, ont été établis sur la base des conditions faisant intervenir soit le champ électrique, soit le courant, soit la puissance, soit l'énergie par source ou encore les impédances [19].

Parmi les principaux critères utilisés, celui de Hampton [20]. Cet auteur a montré que pour que le contournement se produise, le champ E_p dans la pollution doit dépasser le champ E_{arc} au pied de la décharge.

Anjana et Al [21] ont établi, quant à eux, une condition nécessaire à la propagation de l'arc et stipulent que l'énergie totale fournie W_{totale} doit être supérieure ou égale à l'énergie W_{th} nécessaire pour maintenir l'arc à sa température.

Contrairement aux critères précédents Dhahbi, Beroual et Krahenbul [22] proposent un critère analytique de propagation de la décharge en faisant intervenir l'impédance équivalente Z_{eq} d'un circuit électrique (Figure 1.11). Ce dernier simule un isolateur pollué sur lequel une décharge s'est produite.

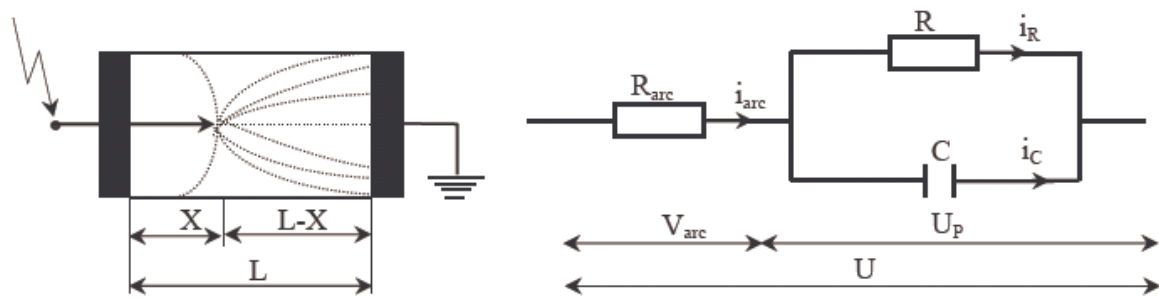


Figure 1.3 - Modèle d'isolateur pollué avec son circuit équivalent

Où i_{arc} est le courant d'arc, i_R et i_C sont les composantes actives et capacitives représentant les courants dans la couche de pollution.

Ainsi, la condition nécessaire à la propagation de l'arc est donnée par :

$$\frac{d|Z_{eq}|}{dx} \leq 0 \quad (1.5)$$

3.2. Modèles dynamiques

Les modèles statiques étudiés ont pour hypothèse que dès la création de la décharge, cette dernière se propage sans s'éteindre. La variation de la résistance de pollution et du courant dans le temps ne sont guère considérées. En réalité, la propagation de l'arc est un phénomène rapidement variable et la décharge ne peut se propager seulement si les conditions sont favorables. Ces imprécisions ont poussé au développement de modèles dynamiques.

Jolly et cheng [23], en 1974, ont été les premiers à proposer un modèle dynamique dont le contournement a lieu sous une tension donnée lorsque le courant de fuite I tend vers la valeur critique I_c . Avec ce modèle il a été possible de prédire le temps de contournement d'une bande d'électrolyte unidimensionnelle. En revanche en passant au cas bidimensionnel et tridimensionnel les résultats ont été guère satisfaisants [24].

Plusieurs auteurs ont proposé des modèles dynamiques tels que celui de Risk [15]. Cependant une amélioration significative n'a eu lieu qu'avec Sundrajan en 1993 [12]. Dans ses travaux, plusieurs facteurs tels que le critère de propagation de l'arc, le changement des paramètres de l'arc dans le temps, l'effet des différents contaminants sur le contournement et l'impact de la géométrie ont été pris en compte.

En considérant des changements instantanés des paramètres de la décharge, Dhahbi-Megrich et Beroual [25] ont développé un nouveau modèle dynamique qui simule la variation du courant, de la résistance de l'arc, de sa vitesse de propagation et du temps au contournement tenant compte de la tension appliquée, de la géométrie de l'isolateur et de la sévérité de la pollution. Ces auteurs considèrent que la décharge peut être représentée par un schéma électrique équivalent comme l'indique la figure (1.4). Sachant que pour chaque saut de l'arc, on obtient une nouvelle cellule ayant les paramètres suivants : R_i , C_i , L_i et U_i .

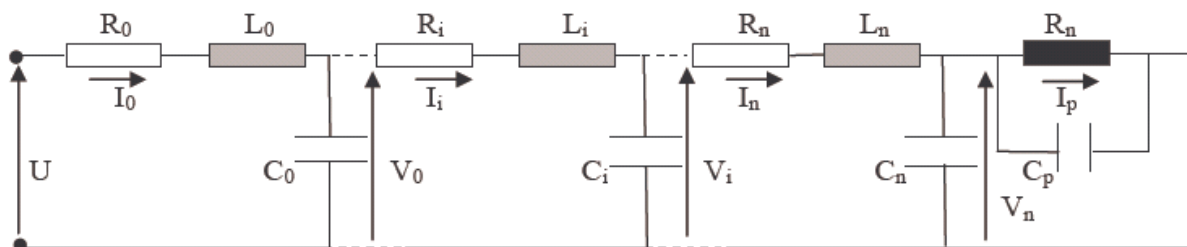


Figure 1.4 -Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge

Un modèle mathématique a été proposé par Gonos et Al en 1999 [26] pour le calcul du champ électrique au niveau d'un isolateur non uniformément pollué en se basant sur la

méthode des éléments finis (Figure 1.5). Cebci et Al [27] en 2004 ont utilisé la même méthode de calcul du champ afin de pouvoir tester le critère de propagation de Hampton. Ils se sont basés sur le modèle d'Obenaus pour étudier la propagation de la décharge et ils ont utilisé le modèle ouvert proposé par Rumeli [17] dans le but de calculer la résistance équivalente de la couche de pollution (Figure 1.6).

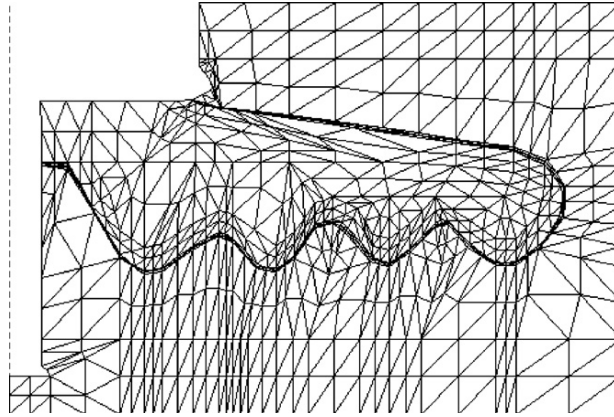


Figure 1.5 – Maillage par la méthode des éléments finis.

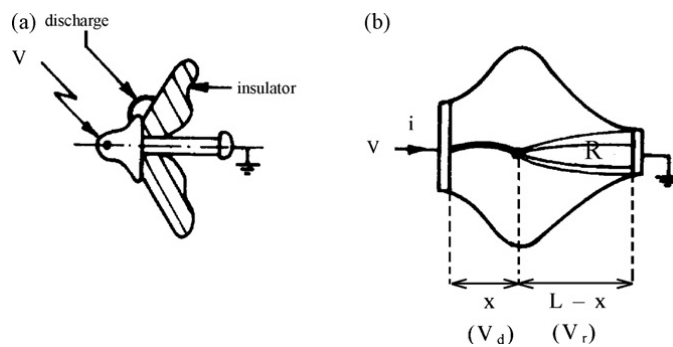


Figure 1.6 – Décharge sur un isolateur (a) et son équivalent sur le modèle ouvert (b).

Tel que nous avons pu le voir, la modélisation du contournement des isolateurs a fait l'objet de plusieurs études. Un des problèmes majeurs dans ces travaux est la détermination des constantes caractéristiques régissant le phénomène de contournement. En 2002, des méthodes utilisant des programmes d'optimisation basée sur les algorithmes génétiques ont été développées par Gonos et al [28], elles ont eu pour but d'affiner la recherche des constantes de l'arc et d'améliorer le calcul de la tension de contournement en terme de diminution de l'erreur relative par rapport aux résultats expérimentaux.

3.3. Vitesse de propagation

Plusieurs mécanismes ont été proposés dans le but d'expliquer la propagation de la décharge sur la surface des isolateurs pollués. Néanmoins, les relations permettant d'évaluer la vitesse de propagation de la décharge restent peu nombreuses. Selon les auteurs nous pouvons trouver des expressions distinctes de la vitesse suite aux différentes approches du problème.

En faisant l'hypothèse que l'allongement de la décharge est lié à la puissance P disponible à sa naissance et à l'énergie nécessaire pour l'obtenir, L.L.Alston et S.Zoledziowski [24] ont établi la relation suivante :

$$v = \frac{dX}{dt} = \frac{U^2}{\sigma r^2 (L - X)^2 Q} \quad (1.6)$$

Où σ est la conductance de la décharge, Q la densité d'énergie linéique de la décharge, X la longueur de l'arc et r_p la résistance linéique de pollution.

Grâce à une caméra ultra rapide, Al Baghdadi [30] a pu établir une relation empirique donnant la vitesse :

$$v = 1,54 \cdot 10^{-4} r_p^{2,5} (i^4 - i_c^4) \quad [\text{cm/s}] \quad (1.7)$$

Où i_c est le courant critique et r_p la résistance linéique de pollution.

Rahal [31] quand à lui, suppose que le déplacement de la charge est gouverné par les ions qui sont extraits et que la vitesse moyenne de ces ions est proportionnelle au champ E_{pr} existant à la racine de l'arc. Une force de rappel provenant de la colonne de la décharge, s'exerce sur ces ions. Le champ total s'exerçant sur les ions est alors égal à la différence entre E_{pr} et E_{arc} , la vitesse aura ainsi l'expression suivante :

$$v = \frac{dx}{dt} = \mu (E_{pr} - E_{arc}) \quad (1.8)$$

Où μ désigne la mobilité des électrons dans l'arc.

L'augmentation de la vitesse de propagation avec la longueur et le courant de la décharge donnée par ce modèle trouve confirmation dans les observations rapportées dans la

littérature [32,33]. Ceci n'est pas le cas avec l'expression de la vitesse en fonction de la mobilité établie ($v=\mu E_{arc}$) [12, 34] laquelle diminue lorsque le courant augmente.

4. Modèles se basant sur les méthodes statistiques d'apprentissage supervisé

Il a été montré expérimentalement que la valeur de la tension de contournement des isolateurs pollués n'est pas constante même avec des conditions identiques. Ceci est dû principalement à l'aspect stochastique du phénomène étudié, car la non uniformité de la pollution sur la surface de l'isolateur et les décharges qui se forment le long des zones sèches constituent un phénomène aléatoire difficile à maîtriser [35].

Ainsi, des méthodes tels que les réseaux de neurones artificiels, ont vu le jour afin de se substituer à des méthodes expérimentales, semi- expérimentales ou analytiques en procédant à l'estimation de la tension de contournement en fonction des différents paramètres relatifs à l'isolateur et aux conditions dans lesquelles il se trouve.

Les réseaux de neurones ont été proposés par Gosh et Al [36] pour l'estimation de la tension de contournement critique en prenant en compte la résistivité et la largeur de la bande de pollution. Les réseaux de neurones ont été préalablement soumis à un apprentissage avec un échantillon tiré d'une étude expérimentale sur un modèle plat d'isolateur et sous fréquence industrielle. Les résultats de ces recherches ont montré l'efficacité de ce type de méthodes.

D'autres études plus détaillées [37] ont été effectuée afin de trouver les paramètres optimaux permettant d'aboutir à un réseau de neurones le plus efficace possible. Des travaux utilisant les réseaux de neurones artificiels avec des paramètres d'entrée différents ont été également proposés [38, 39, 40].

Les réseaux de neurones ont été également utilisés pour le calcul du champ le long de la surface d'un isolateur en ayant seulement pour entrées les coordonnées du point sur lequel on veut connaître le champ ainsi que la tension appliquée sur l'isolateur [41, 42]. Cette méthode permet de se substituer à la méthode des éléments finis qui est très consommatrice en temps de calcul.

Récemment la méthode SVM a été introduite pour la classification et la régression [43]. De par les principes fondamentaux de la théorie des SVM qui sont caractérisés par l'utilisation de fonctions noyau non linéaires et une grande habilité à la généralisation cette méthode offre de meilleurs résultats d'estimation que d'autres méthodes classiques telles que les réseaux de neurones artificiels [44].

Afin de pouvoir exploiter la méthode SVM, il est nécessaire de résoudre un problème d'optimisation quadratique. La matrice utilisée dans ce dernier est proportionnelle à la taille de l'échantillon d'apprentissage utilisé. Ainsi, afin de pallier à la complexité de la résolution du problème, une version modifiée appelée LS-SVM a été proposée.

Gencoglu et Al [45] ont suggéré un modèle faisant appel à la méthode LS-SVM pour la prédiction de la tension de contournement d'un isolateur à haute tension. Des résultats très intéressants ont vu le jour et il a été montré que de meilleures performances sont obtenues par rapport à une estimation se basant sur les réseaux de neurones artificiels.

5. Conclusion

Le phénomène de contournement fait intervenir plusieurs paramètres qui évoluent dans le temps. Dans le souci de développer des modèles statiques puis dynamiques, les auteurs qui se sont intéressés à ce sujet ont émis des hypothèses simplificatrices. Celles-ci ont eu pour effet une déviation entre les résultats réels et ceux simulés.

Afin d'éviter ce type de désagrément, de nouvelles méthodes statistiques ont vu le jour. Celles-ci prennent en compte uniquement les résultats expérimentaux et font abstraction des mécanismes physiques qui peuvent s'y produire. Ainsi, l'erreur d'estimation se trouve minimisée et une plus grande flexibilité de simulation est constatée.

Modélisation dynamique de l'arc électrique de contournement d'un isolateur pollué

1. Introduction

Dans ce chapitre, un outil de simulation du contournement d'un isolateur pollué sera proposé. Cet outil sera basé sur le circuit équivalent de F.Obenaus et utilisera le critère de B.F.Hampton.

La notion de modèle ouvert sera introduite afin de tenir compte de la géométrie de l'isolateur. L'influence de la pollution sur le comportement du modèle sera étudiée. L'évolution temporelle des différents paramètres régissant le phénomène de contournement sera calculée, et les résultats obtenus seront comparés avec d'autres travaux expérimentaux.

2. Hypothèses simplificatrices

Etant donné la complexité du contournement par l'arc électrique qui peut se produire sur les isolateurs de haute tension, il est nécessaire de faire certaines hypothèses simplificatrices. Celles-ci rendent possible la représentation de ce phénomène dans un modèle théorique. Ainsi, les hypothèses suivantes seront adoptées:

- L'isolateur réel est remplacé par un modèle plan équivalent ; il s'agit donc d'une représentation bidimensionnelle suite à la prédominance de la composante transversale du champ électrique.
- Parmi tous les arcs multiples se développant sur la surface de l'isolateur, un seul arc dominant est pris en considération.
- L'arc électrique se développe le long du chemin le plus court entre l'électrode haute tension et l'électrode de terre.
- Les couches de pollution sont représentées par des résistances, leur aspect capacitif étant négligé.
- Pour chaque zone de pollution, la conductivité appropriée est la même en tous points.

3. Circuit électrique équivalent

Dans notre étude, nous nous intéressons au cas du contournement d'un isolateur de type capot-tige (Figure 2.1). En se basant sur le modèle proposé par Obenaus [6], notre circuit électrique équivalent sera constitué de deux résistances en série. La première résistance R_{arc} représente le canal de la décharge, la seconde résistance R_p représente la couche de pollution non court-circuitée (Figure 2.2).

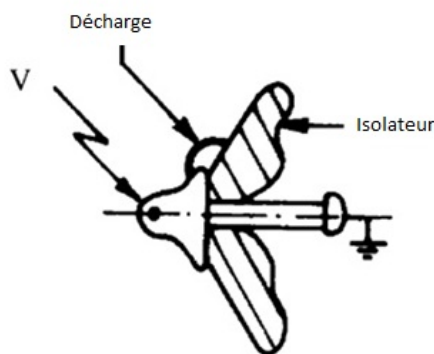


Figure 2.1 – Contournement d'un isolateur à haute tension.

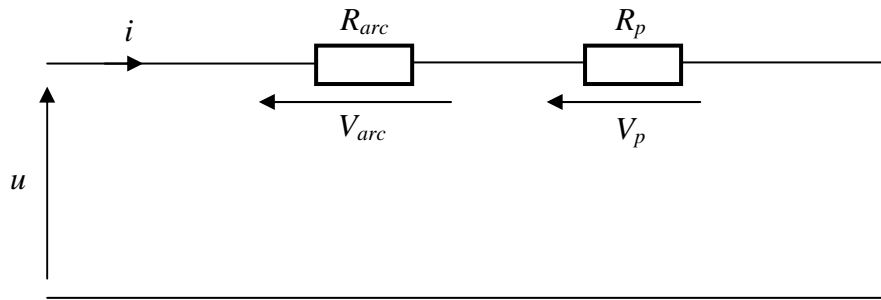


Figure 2.2 - Circuit électrique équivalent de base.

Etant donné que la forme de l'isolateur a pour effet d'engendrer sur sa surface une distribution non uniforme de la pollution. Nous allons estimer que la couche de pollution est constituée de plusieurs bandes de conductivités différentes. De ce fait, nous allons supposer que la résistance R_p est la résultante de plusieurs résistances en série R_i , chacune d'elles correspond à une bande de pollution de conductivité donnée (Figure 2.3).

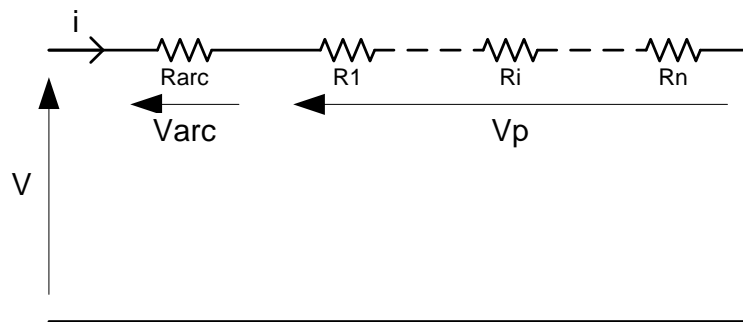


Figure 2.2 - Circuit électrique équivalent relatif au cas de la pollution non uniforme.

4. Propagation de la décharge

4.1. Initialisation de la décharge

Pour initier la décharge, il faut que la tension appliquée soit suffisamment élevée de manière à satisfaire le critère d'initiation d'une décharge de type couronne. Si tel est le cas, une décharge couronne de longueur x_0 prend naissance. Si le canal d'arc est suffisamment alimenté par le courant de décharge couronne, la décharge peut alors se développer. Dans le cas inverse, le canal se refroidit et disparaît.

La valeur initiale de la décharge généralement prise par certains auteurs [46, 47] est égale à 1 % de la longueur de fuite totale de l'isolateur.

4.2. Critère de propagation de la décharge

Le critère de propagation qui a été choisi dans le cadre de cet exposé, est celui proposé par B.F. Hampton [20]. Selon cet auteur, il n'y a de propagation de la décharge que si le champ dans la pollution (E_p) est supérieur à celui au pied de l'arc (E_{arc}) tel que :

$$E_{arc} < E_p \quad (2.1)$$

5. Les paramètres du circuit électrique équivalent

5.1. Equation du circuit électrique équivalent

A partir du circuit équivalent de la figure 2.2 il devient possible d'écrire l'équation électrique suivante :

$$V = e + V_{arc} + V_p \quad (2.2)$$

Avec e la chute de tension aux électrodes, V la tension instantanée, V_{arc} la tension de la décharge et V_p la tension de la couche polluante.

Selon Chung et Nour [9] la chute de tension aux électrodes est estimée à 800V. Celle-ci peut être donc négligée [4]. Ainsi la tension d'alimentation est répartie entre l'arc et la couche de pollution. D'où l'équation électrique :

$$V = V_{arc} + V_p = (R_{arc} + R_p) \cdot I \quad (2.3)$$

Avec R_{arc} la résistance de l'arc, R_p la résistance de pollution qui est la résultante de plusieurs résistances en série, et I le courant de fuite instantané.

5.2. Les caractéristiques de la couche de pollution

Du fait que les dépôts polluants atterrissent sur la surface de l'isolateur, la résistance équivalente de la pollution se trouve directement influencée par sa géométrie. Afin de pallier au problème de la complexité de la forme de l'isolateur (Figure 2.3), le modèle ouvert a été établi. Celui-ci consiste à ouvrir l'isolateur et étaler sa surface sur un plan en deux dimensions (Figure 2.4). La longueur du modèle obtenu est celle de la ligne de fuite de l'isolateur étudié. Quant à sa largeur, elle varie en fonction du rayon sur un point donné de l'objet d'essai. Elle est obtenue à partir de la relation suivante :

$$Y(x) = 2\pi \cdot r(x) \quad (2.4)$$

Avec x la distance entre l'électrode basse tension (Capot) et un point sur la ligne de fuite, $r(x)$ le rayon d'un cercle passant par un point sur la ligne de fuite et $Y(x)$ la largeur du modèle ouvert.

A partir du modèle établi, il devient possible de calculer les résistances élémentaires constituant la couche de pollution ainsi que sa résistance totale [18]:

$$R_i = \frac{1}{\sigma_s} \cdot \int_i^{i+1} \frac{dl}{2\pi \cdot r(l)} \quad (2.5)$$

$$R_T = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_s} \cdot \int_i^{i+1} \frac{dl}{2\pi \cdot r(l)} \quad (2.6)$$

Avec σ_s la conductivité surfacique.

A partir de la relation 2.6, il convient de noter que la résistance totale de la pollution est une résistance équivalente à la mise en série des résistances élémentaires R_i (Figure 2.3). Ainsi, la pollution recouvrant l'isolateur sera divisée en bandes élémentaire de largeur dl . Celles-ci ont une conductivité égale à celle de la zone de pollution où elles se trouvent. La conductivité sera considéré constante le long de la bande de pollution élémentaire. Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressés à l'isolateur 1512 L. En se basant sur le profil numérisé de l'isolateur, nous avons utilisé le logiciel AutoCAD pour la mesure des rayons le long de sa ligne de fuite. Nous avons pu ainsi établir des valeurs d'entrée qui seront utilisées dans notre programme pour le calcul de la résistance de la couche de pollution de l'isolateur étudié.

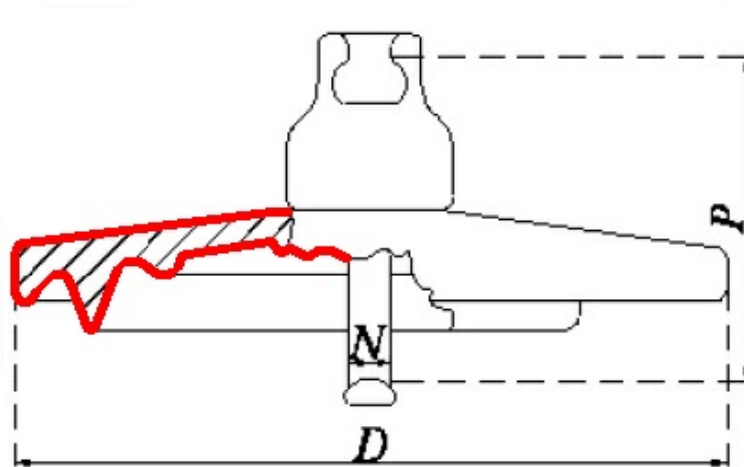


Figure 2.3 – Profil d'un isolateur de ligne haute tension (1512L) [35].

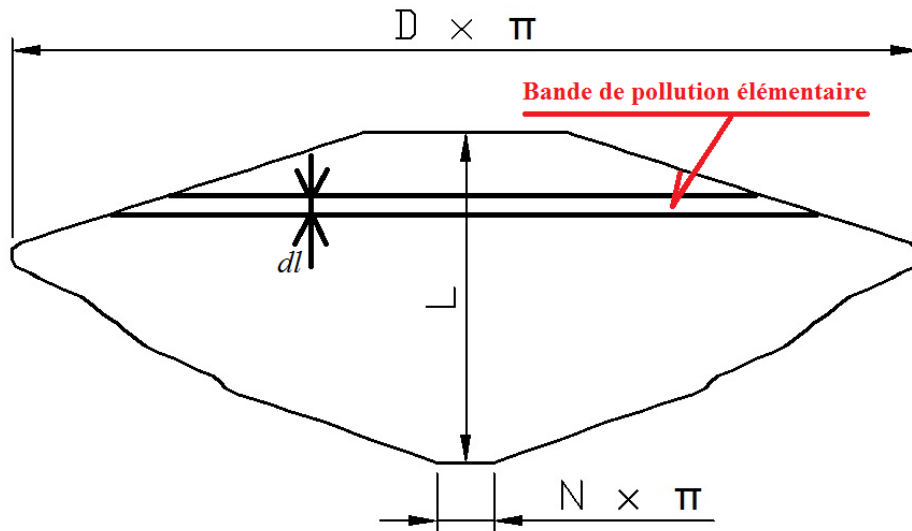


Figure 2.4 – Modèle ouvert d’un isolateur de ligne haute tension (1512L).

5.3. Les caractéristiques de l’arc

F.Obenaus a établi une expression empirique de la tension aux bornes de l’arc, celle-ci s’écrit sous la forme suivante:

$$V_{arc} = \frac{NX}{I^n} = E_{arc} \cdot X \tag{2.7}$$

N et n sont les constantes empiriques qui caractérisent l’état statistique de l’arc, X sa longueur et I son courant [14].

Les valeurs de ces deux paramètres dépendent du milieu dans lequel s’amorce la décharge. Elles varient selon les auteurs (tableau 2.1).

	Auteurs	N	n
Air sec	Obenaus	100	0.7
	Clavrie et Porcheron	100	0.5
	Woodson	200	0.8
	Wilkins	63	0.76
	Jolly	80	0.62
Vapeur d'eau	Hampton	530	0.24
	Rahal et Huraux	530	0.24

Tableau 2.1 - Constantes caractéristiques selon Ghosh et al [8].

Le champ électrique E_{arc} du canal d’arc est donc fonction du courant tel que:

$$E_{arc} = \frac{N}{I^n} \tag{2.8}$$

6. La vitesse de propagation

La vitesse de propagation de la décharge est calculée à partir de la relation de Rahal qui a pour expression [32] :

$$v = \frac{dX}{dt} = \mu(E_p - E_{arc}) \quad (2.9)$$

μ désigne la mobilité des électrons dans l'arc tel que ; $5 \text{ cm}^2/\text{Vs} < \mu < 100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ [43].

7. Le contournement

Différents auteurs ont défini un état critique de la décharge au-delà duquel toute nouvelle augmentation de la tension provoque immédiatement le contournement de l'isolateur. Cet état correspond à une longueur critique de la décharge X_c , qui s'exprime par l'équation suivante [14]:

$$X_c = 0.9L \quad (2.9)$$

8. Simulation numérique

En se basant sur l'hypothèse que la décharge doit s'éteindre au passage de la tension alternative par zéro. Il sera considéré dans cet exposé que le contournement ne peut avoir lieu que durant la première alternance de la tension.

Pour cette simulation, les données du système d'isolation et les conditions d'essai seront préalablement implémentées. Une numérisation du profil de l'isolateur sera effectuée. Le rayon de l'isolateur le long de la ligne de fuite y sera mesuré. Ainsi, les paramètres du circuit électrique équivalent telles que la résistance de la couche de pollution et celle de la décharge seront calculées. Il convient donc de noter que la variation du rayon entre deux points de mesures est considérée comme linéaire. Le calcul de la résistance élémentaire de pollution se trouve par conséquent simplifié.

En fonction des données calculées, le critère de propagation de B.F.Hampton ($E_p > E_{arc}$) sera testé. Si ce critère n'est pas vérifié et si le temps n'a pas atteint la demi-période, la propagation n'aura pas lieu et le temps sera incrémenté. En revanche, si la première alternance est dépassée le temps sera initialisé et l'amplitude de la tension sera incrémentée.

Dans le cas où le critère de propagation est vérifié, il faudra recalculer tous les paramètres à partir des nouvelles valeurs de la longueur de la décharge ($X = X + Vdt$) et du

temps ($t=t+dt$). La fin de la simulation aura lieu quand le critère de contournement sera vérifié ($X>0.9*L$).

Nous aboutissons ainsi au séquençement de la simulation de l'arc de contournement représenté par l'organigramme de la figure 2.5.

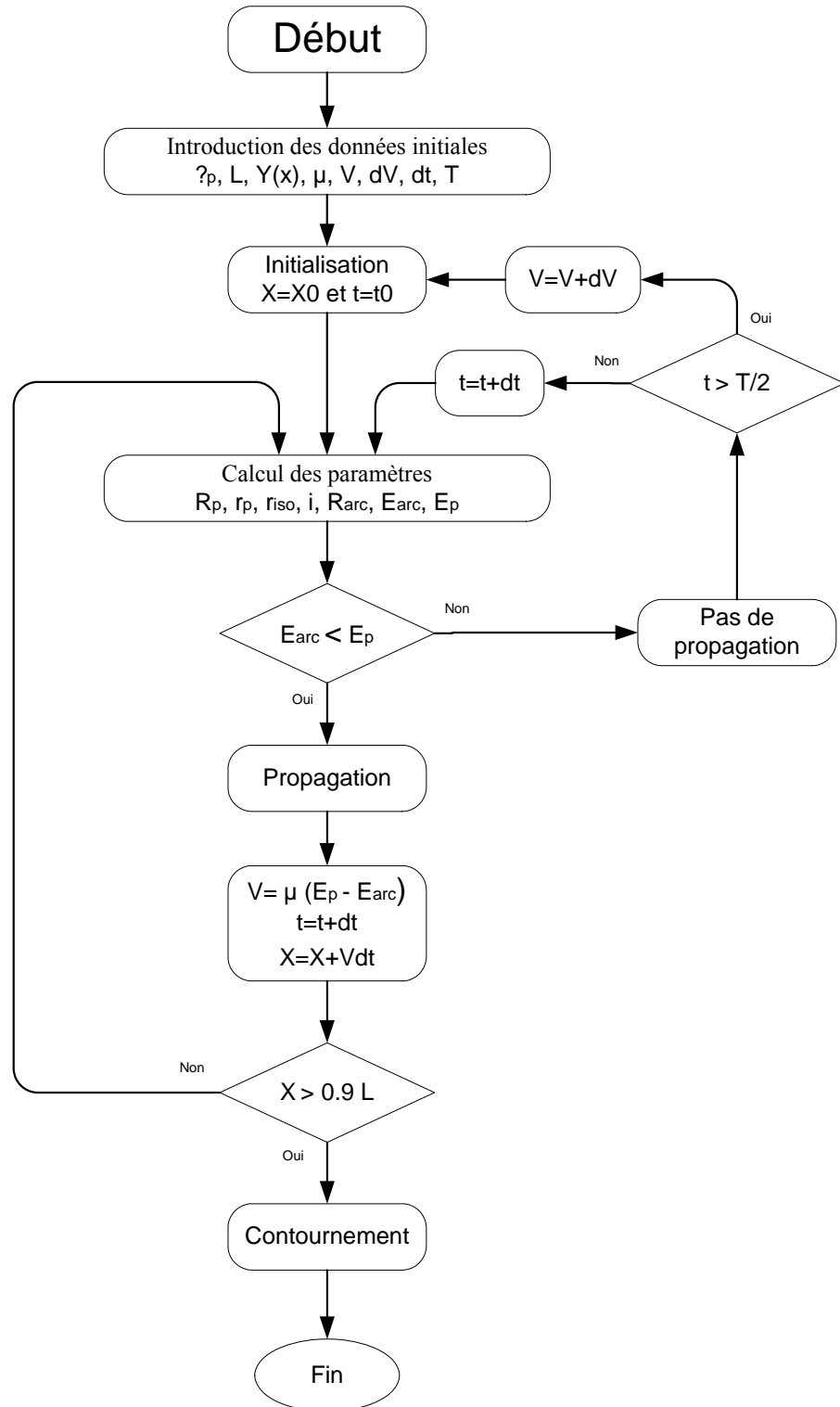


Figure 2.5 - Organigramme de simulation.

9. Validation

Dans le cadre de cette étude nous nous intéressons à un isolateur à haute tension de type 1512L. Afin d'étudier le comportement du modèle établi, la géométrie de l'isolateur sera prise en compte par l'utilisation de son modèle ouvert.

Nous allons dans un premier temps calculer la tension de contournement du modèle dans le cas de la pollution uniforme avec différentes conductivités. Une validation des résultats en tension alternative 50Hz sera effectuée en se basant sur les travaux expérimentaux réalisés au sein du Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger [48]. L'étude de l'évolution temporelle des grandeurs régissant le phénomène de contournement sera également effectuée.

La configuration étudiée consiste en un isolateur de longueur de fuite totale L_f parcourue par une décharge de longueur x , la partie restante sera recouverte intégralement d'une couche de pollution uniforme de conductivité et d'épaisseur données.

Il est à noter que dans le cas d'une couche de pollution uniforme, il sera considéré que la décharge se propage à partir de l'électrode haute tension du modèle ouvert [48]. Cette électrode correspond à la tige de l'isolateur.

En second lieu, dans le cas de la pollution non uniforme, nous allons traiter deux dispositions. Chacune d'elles comprendra deux bandes de pollution de conductivités différentes qui recouvriront la totalité de la surface de l'isolateur ;

- (Disposition1) la couche avec la plus grande résistivité sera placée à partir du capot de l'isolateur,
- (Disposition2) la couche avec la plus grande résistivité sera placée à partir du côté de la tige de l'isolateur.

9.1. Isolateur avec une surface uniformément polluée

Pour le cas de la pollution uniforme nous allons appliquer cinq conductivités différentes à notre modèle ; 0.01 mS/cm, 0.19 mS/cm, 0.71 mS/cm, 1.2 mS/cm, 10 mS/cm. Ces conductivités seront utilisées pour la simulation de la décharge de contournement. Les résultats ainsi obtenus seront comparés à des travaux expérimentaux réalisés avec les mêmes conductivités.

Ainsi, il a été possible de constater que la simulation est en accord avec les mesures empiriques, la tension de contournement calculée étant relativement proche des valeurs expérimentales.

D'après les résultats de simulation (Figure 2.6), nous pouvons constater que la tension de contournement varie de manière non-linéaire et inversement proportionnelle à la conductivité de la couche de pollution. Le courant critique de la décharge (Figure 2.7) lui est proportionnel car il est évident que la décharge progresse plus facilement quand la résistance est réduite.

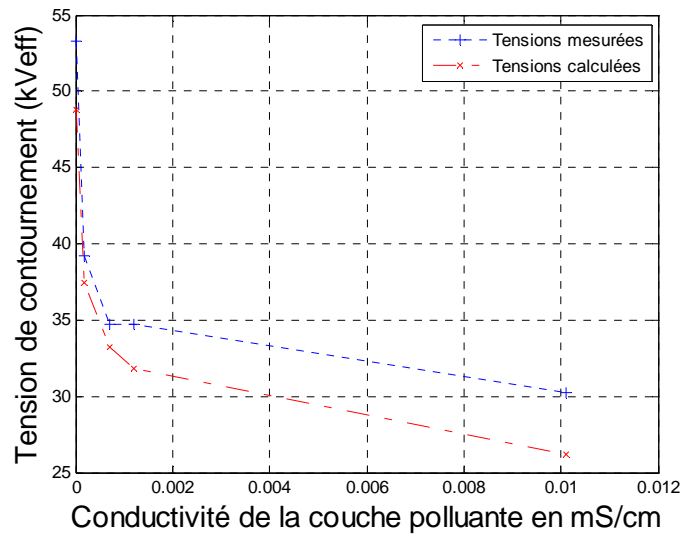


Figure 2.6 – Tension de contournement en fonction de la conductivité de la pollution.

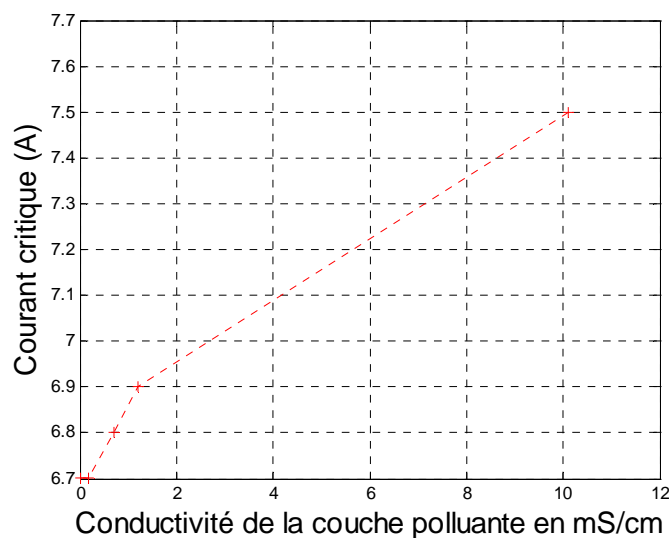


Figure 2.7 – Courant critique en fonction de la conductivité de la pollution.

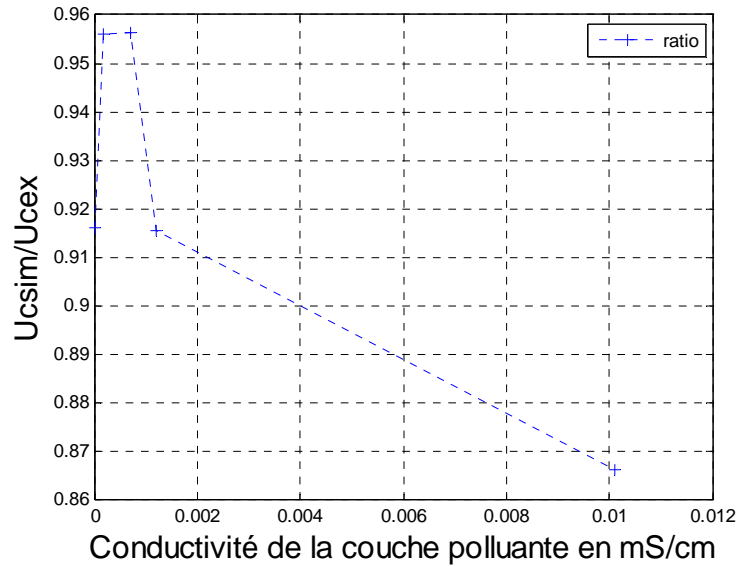


Figure 2.8 – Rapport de la tension calculée sur la tension mesurée en fonction de la conductivité de la pollution.

Nous constatons que l'augmentation de la conductivité de la couche de pollution a pour effet de diminuer le rapport de la tension calculée sur la tension mesurée (*Figure 2.8*). Ceci est dû au fait que la pollution subit une évaporation progressive au cours de l'essai. Cette évaporation est d'autant plus importante que la conductivité est élevée. Ainsi ce phénomène a pour effet de changer les conditions initiales de l'état de pollution. En contrepartie, notre modèle suppose que l'état de la couche de pollution reste inchangé au cours de l'essai. La non prise en compte de la formation d'arcs multiples influe également sur l'inexactitude des résultats.

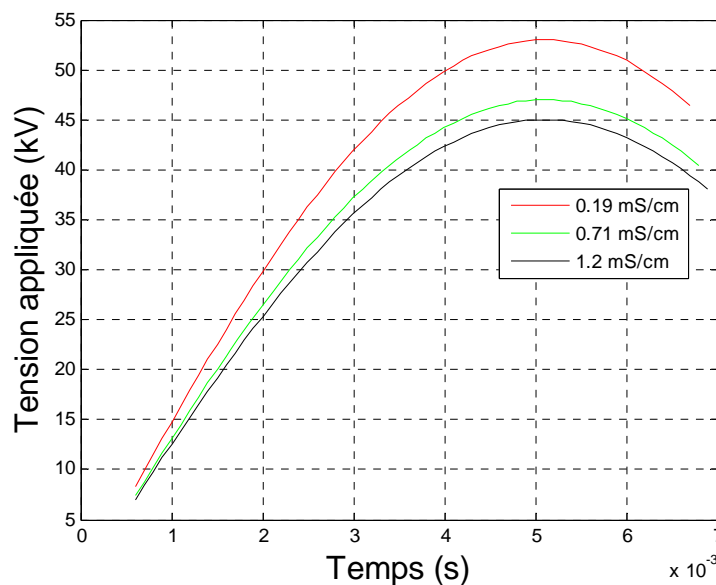


Figure 2.9 – Evolution temporelle de la tension appliquée.

L'étude de l'évolution temporelle de la tension appliquée (*Figure 2.9*) montre que le temps au contournement (*Figure 2.10*) est proportionnel à la conductivité de la couche de pollution. Quand la conductivité de la pollution est importante, des décharges partielles ont tendance à se former plus facilement. Le temps nécessaire pour leur développement jusqu'au contournement est donc plus important que dans le cas des conductivités faibles où il y a contournement direct sans apparition de décharges partielles.

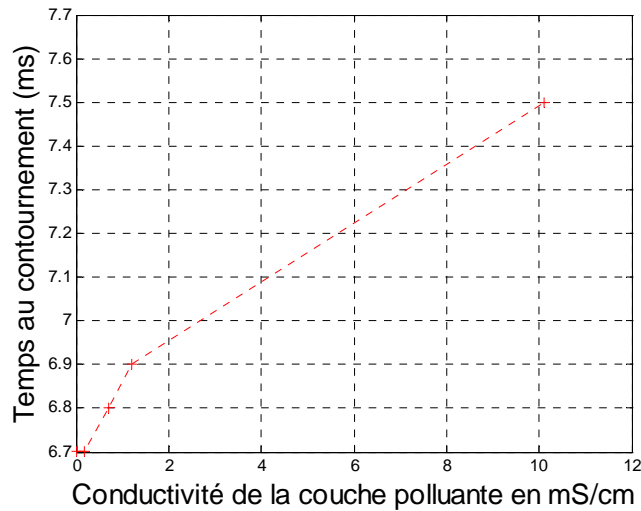


Figure 2.10 – Temps au contournement en fonction de la conductivité de la pollution.

A partir de la *figure 2.11* nous constatons que la résistance de la couche de pollution reste constante tant que le critère de propagation n'est pas vérifié. En revanche, dès que la propagation de l'arc a lieu, nous constatons une diminution de sa valeur. Ceci est dû à la diminution de la longueur de la bande de pollution au profit de celle de la décharge.

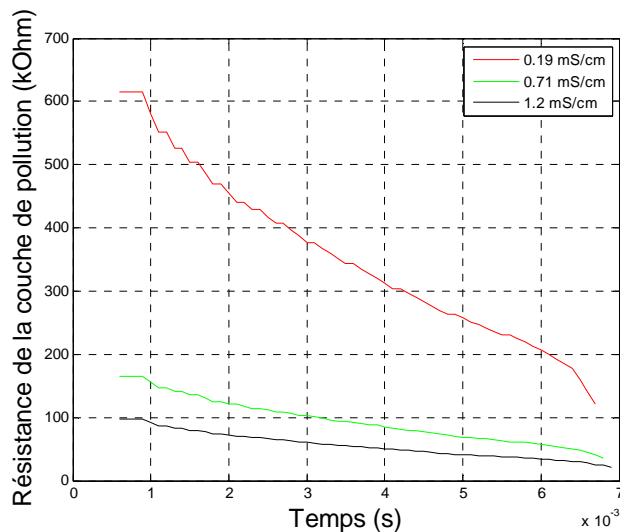


Figure 2.11 – Evolution temporelle de la résistance de la couche de pollution.

Quant à la résistance de la décharge (Figure 2.12), nous remarquons qu'elle diminue avant la propagation, car elle est inversement proportionnelle au courant. Dès la vérification du critère de propagation, la résistance de l'arc augmente de par sa proportionnalité à la longueur de l'arc. A la phase de contournement, nous remarquons que la résistance diminue brutalement. Ceci est dû à l'augmentation brutale du courant de décharge par rapport à la lente variation qui le précède (Figure 2.13). Il est constaté également que la résistance de l'arc est inversement proportionnelle à la conductivité de la pollution. Ceci est dû à l'augmentation du courant de la décharge suite à la diminution de la résistance de pollution.

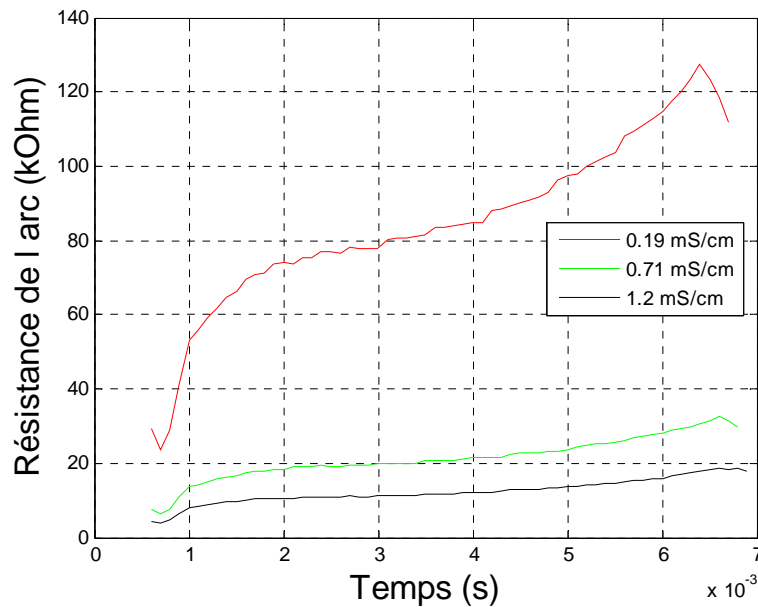


Figure 2.12 – Evolution temporelle de résistance de la décharge.

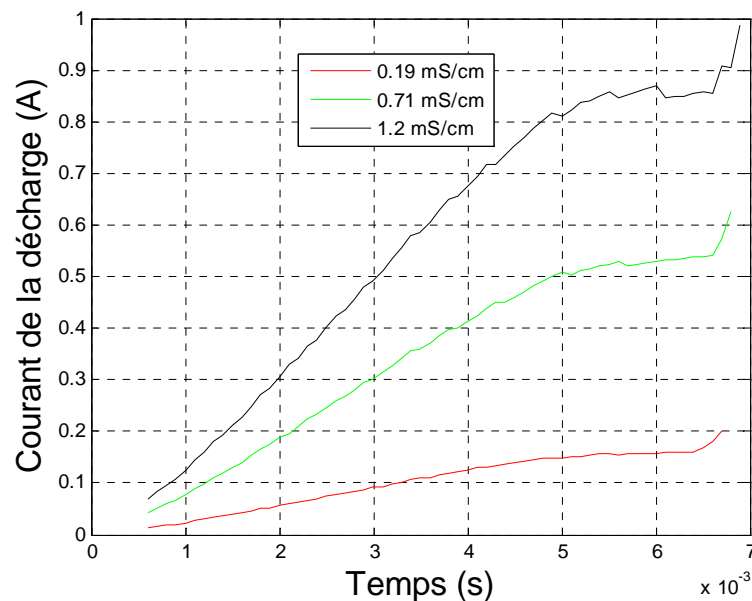


Figure 2.13 – Evolution temporelle du courant de la décharge.

9.2. Isolateur avec une surface non uniformément polluée

Nous allons considérer un isolateur dont la surface est recouverte d'une couche de pollution non uniforme (Figure 2.14). Ainsi, nous allons étudier l'influence de la dimension et la position de cette distribution non uniforme sur la rigidité du système d'isolation.

L'isolateur étudié est de type capot –tige 1512L, il possède une longueur de fuite de 29,2cm. Les bandes les plus fortement polluées auront des largeurs (A , A') égales à 5, 10, 15, 20 et 25 cm et seront disposées dans un premier temps du côté de la tige de l'isolateur (Disposition 01 de la figure 2-14), ensuite, du côté de son capot (Disposition 02 de la figure 2-14). La conductivité de la pollution est égale à $\gamma_1 = 420 \mu\text{S/cm}$ pour les couches fortement conductrices et à $\gamma_2 = 42 \mu\text{S/cm}$ pour les couches faiblement conductrices. Notons qu'en se basant sur des études utilisant des modèles expérimentaux équivalents [25, 4], nous avons considéré que la décharge se propage à partir de l'électrode haute tension.

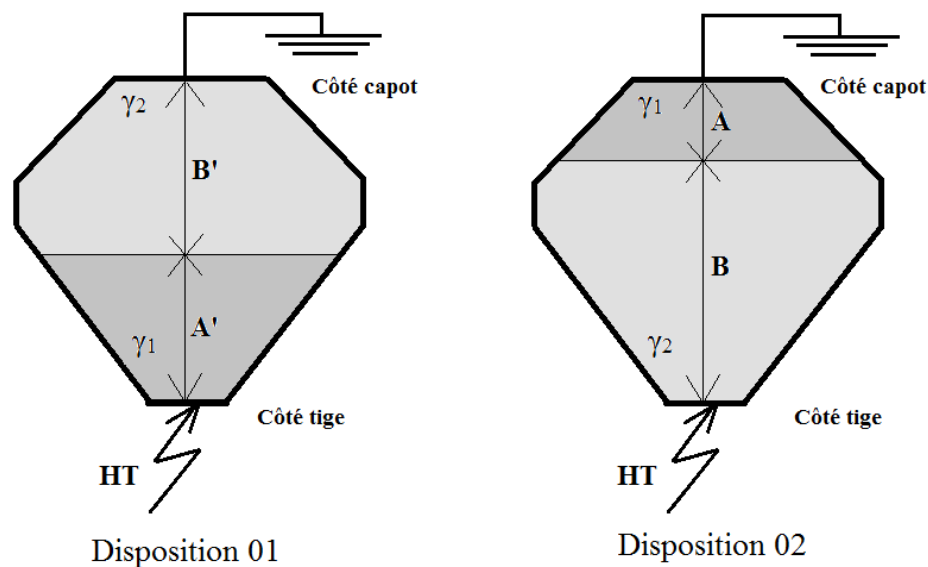


Figure 2.14 – Evolution temporelle de la résistance de la décharge.

D'après les résultats de calcul (Figure 2.15), il est constaté que la tension de contournement des configurations étudiées varie de manière inversement proportionnelle à la largeur de la bande la plus polluée. Ceci peut être expliqué par la variation de la résistance équivalente de la partie non contournée, laquelle lui est inversement proportionnelle.

Nous remarquons également que la position de la bande de pollution a une influence sur la rigidité du système d'isolation. Dans notre simulation, cette différence est accentuée du fait de la non symétrie de notre modèle (Figure 2.4).

Ainsi, en comparant la distribution spatiale de la résistance équivalente de la partie non contournée (*Figure 2.16*), il apparait clairement que la disposition de la pollution a une influence sur la rigidité du modèle. Car une résistance équivalente réduite favorise la formation de l'arc de contournement et donc une tension de claquage plus petite.

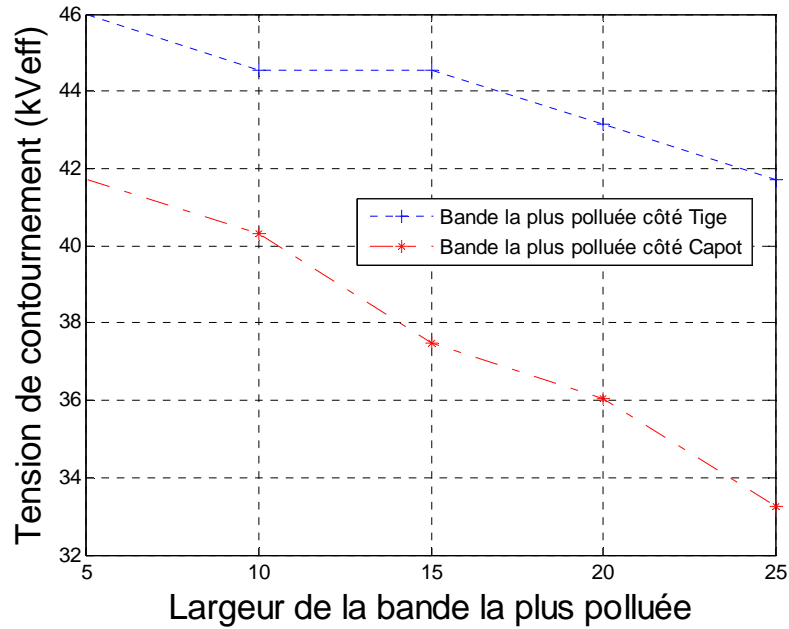


Figure 2.15 – Tension de contournement en fonction de la largeur de la bande la plus polluée.

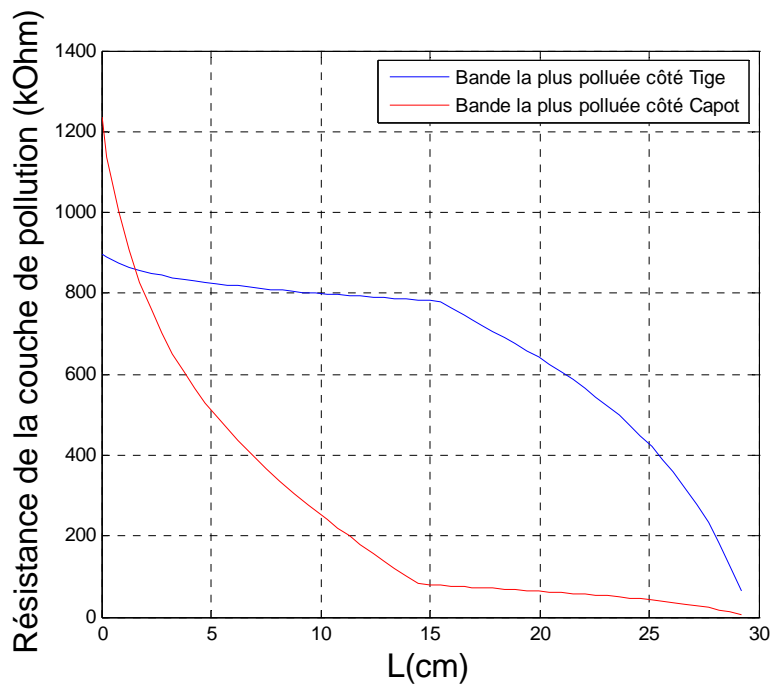


Figure 2.16 – Distribution spatiale de la résistance de la partie non contournée de la couche de pollution pour le cas de le cas : $A=A'=15\text{cm}$.

Pour les mêmes raisons que dans le cas de la pollution uniforme, nous remarquons que le temps au contournement est plus important quand la bande polluée est du côté capot. Dans ce cas, la résistance équivalente de la pollution est plus réduite, d'où la facilité de former des décharges partielles. Le temps de la formation de la décharge principale se trouve augmenté (Figure 2.17). Dans la même logique nous pouvons constater que la décharge progresse plus rapidement dans le cas où la bande la plus polluée est du côté de la tige de l'isolateur (Figure 2.18).

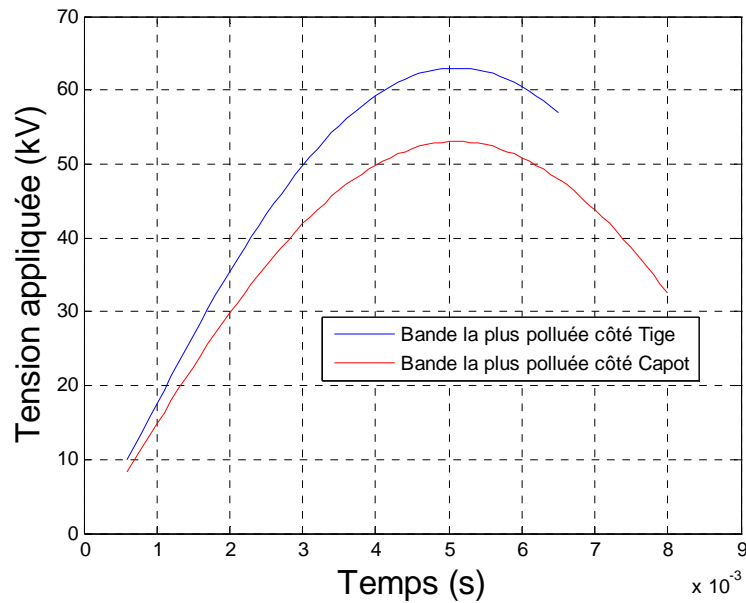


Figure 2.17 – Evolution temporelle de la tension appliquée pour le cas : $A=A'=15\text{cm}$.

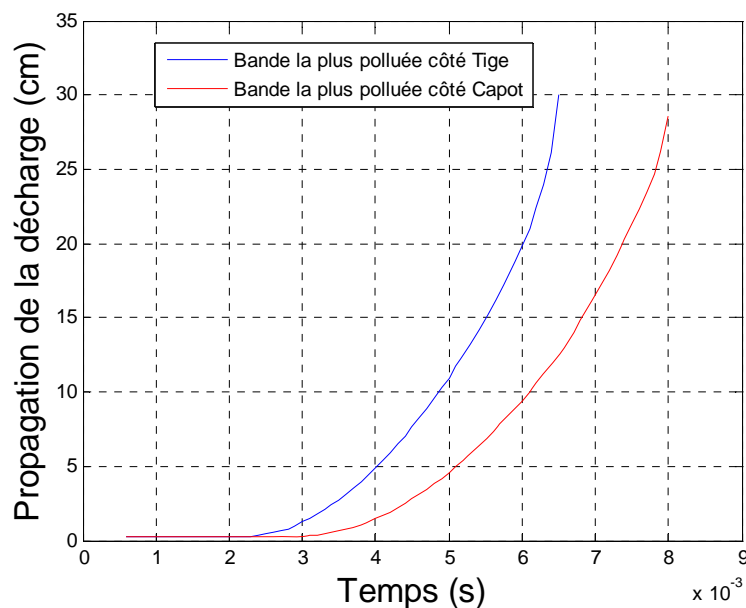


Figure 2.18 – Evolution temporelle de l'allongement de la décharge pour le cas : $A=A'=15\text{cm}$.

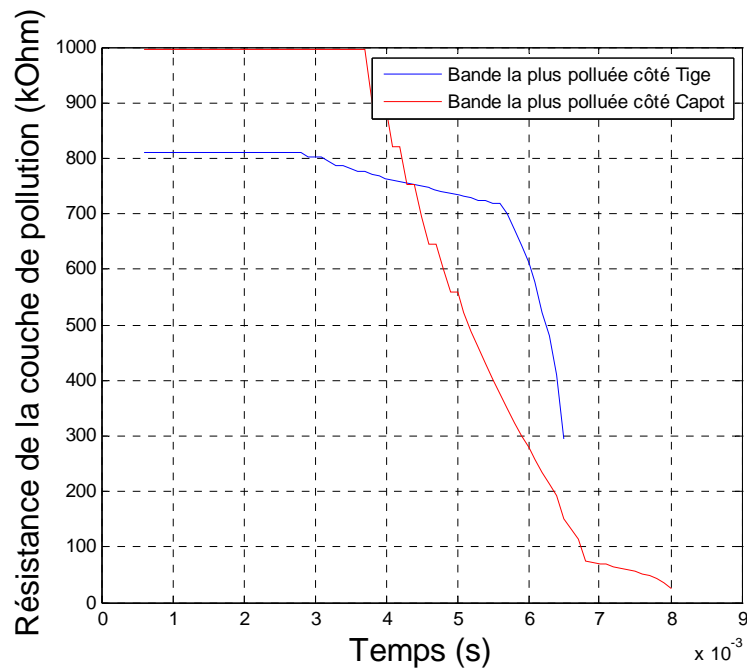


Figure 2.19 – Evolution temporelle de la résistance de la partie non contournée de la couche de pollution pour le cas: $A=A'=15\text{cm}$.

A travers l'étude de l'évolution temporelle de la résistance de la partie non contournée de la couche de pollution (*Figure 2.19*), nous pouvons constater que tant que le critère de propagation n'est pas satisfait, la décharge ne progresse pas, d'où une résistance équivalente constante dans le temps. Dès que le critère est satisfait, nous constatons que la pente de progression de la résistance est plus importante quand la conductivité diminue.

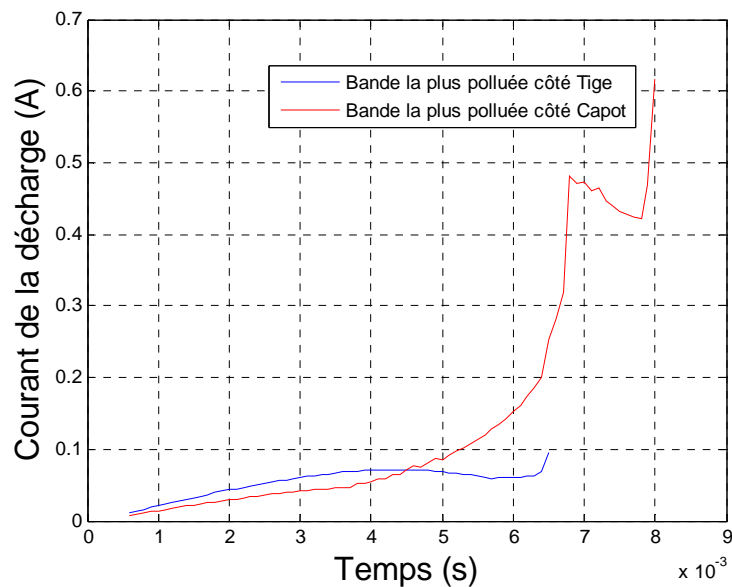


Figure 2.20 – Evolution temporelle du courant de fuite de la décharge pour le cas: $A=A'=15\text{cm}$.

De même que pour le cas uniforme, nous constatons que la variation du courant de la décharge se fait en deux étapes. La première est lente, elle correspond à la propagation de la décharge. La deuxième, est plus brutale, elle correspond à la phase de contournement. Il est à noter que lorsque la décharge atteint une zone de conductivité différente, nous constatons un changement de la variation du courant. Dans le cas où la conductivité accroît, nous constatons une diminution du gradient de variation du courant. Dans le cas contraire, le gradient augmente (Figures 2.20 - 2.21).

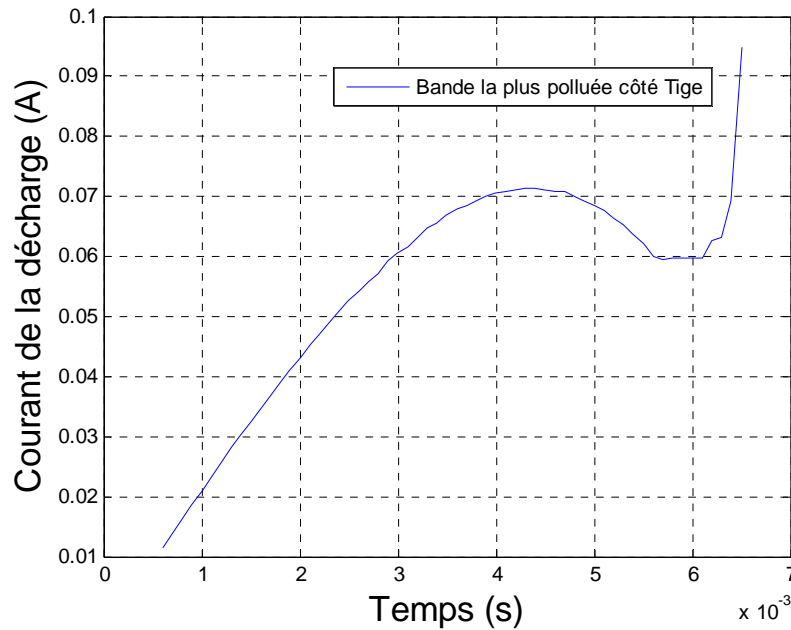


Figure 2.21 – Evolution temporelle du courant de fuite de la décharge pour le cas: $A=A'=15\text{cm}$.

10. Conclusion

Dans le cadre de cette étude, nous avons mis en place un modèle dynamique d'un isolateur de haute tension de type 1512L. Nous avons pris en compte dans ce modèle les paramètres géométriques de ce dernier pour le calcul de sa tension de contournement. L'intégration de l'influence de la forme de l'isolateur a abouti à des résultats de simulation concordants avec les résultats expérimentaux.

L'influence de la résistivité de la pollution a été elle aussi mise en évidence. Nous avons pu constater que la non prise en compte de la variation temporelle de la conductivité de la pollution durant l'évolution de la décharge a pour effet une déviation par rapport aux résultats expérimentaux. Cette déviation augmente avec l'accroissement de la conductivité de la pollution, car avec une plus faible résistance, le courant de décharge croît et l'évaporation

de l'électrolyte est plus grande. Ainsi, la variation avec les conditions initiales devient plus importante.

La distribution non uniforme de la pollution a été, elle aussi, abordée. Celle-ci consiste en deux couches de pollution de conductivités différentes qui recouvre la totalité de la surface de l'isolateur. Nous avons pu alors constater l'influence sur la tension de contournement de la variation de la largeur d'une bande polluée par rapport à une autre qui l'est moins sévèrement.

Modèle de régression par méthode LS SVM

1. Introduction

La méthode SVM a été introduite en 1995 par Vapnik dans le but de résoudre des problèmes de classification [43]. Plus récemment, cette méthode a été utilisée avec succès pour la régression. Elle est devenue par la suite de plus en plus populaire grâce à des performances satisfaisantes. Cette méthode se base sur le critère de minimisation de risque structurel. Celui-ci étant bien meilleur que la traditionnelle minimisation du risque empirique utilisé entre autres dans les réseaux de neurones [49].

La méthode SVM standard étant très consommatrice en temps de calculs, différentes approches ont été introduites afin de pallier à ce désagrément. Ainsi, la méthode LS-SVM a vu le jour. Le fondement théorique de cette dernière sera amplement détaillé tout au long de ce chapitre.

2. Notions de base

Ce chapitre s'intéresse aux notions théoriques de la méthode SVM et son application à la régression. Il est, par conséquent, utile d'introduire le vocabulaire et notions de bases nécessaires à la compréhension de la théorie d'apprentissage statistique faisant l'objet de notre étude.

2.1. Hyperplan

Dans le cas de la classification, il est nécessaire de trouver un classificateur séparant les données. La méthode SVM a pour but de maximiser la distance entre les deux classes avec un classificateur linéaire appelé hyperplan (Figure 3.1) [44].

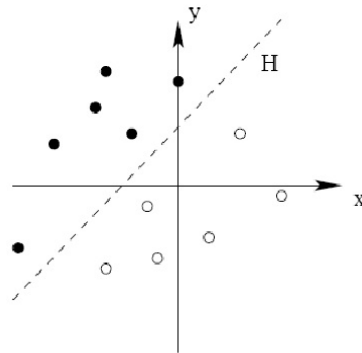


Figure 3.1 – Hyperplan de classification.

2.2. Vecteur de support

Les points les plus proches de l'hyperplan sont les seuls à être utilisés pour sa détermination, ils sont appelés vecteurs de support (Figure 3.2) [44].

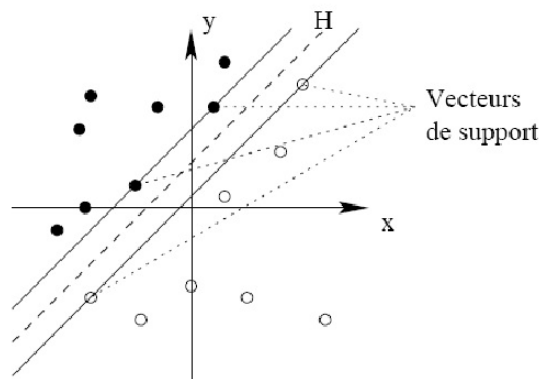


Figure 3.2 – Vecteurs de support de l'hyperplan de classification.

2.3. Marge

Une multitude d'hyperplans peut être trouvée pour la classification. Néanmoins, les SVM ont pour but de trouver un hyperplan optimal. Un hyperplan passant par le « milieu » des points des deux classes d'exemples sera donc privilégié. Cela revient à chercher l'hyperplan « le plus sûr » [44].

Autrement dit, les SVM consistent à rechercher un hyperplan dont la distance minimale aux exemples d'apprentissage est maximale. Cette distance est appelée « marge » entre l'hyperplan et les exemples. L'hyperplan séparateur optimal est celui qui maximise la marge. La notion de *Séparateur à Vaste Marge (SVM)* est donc introduite (Figure 3.3). La formulation *Machines à Vecteurs supports* existe aussi dans la littérature, celle-ci est la traduction littérale de l'expression anglaise ; *Support Vector Machine*.

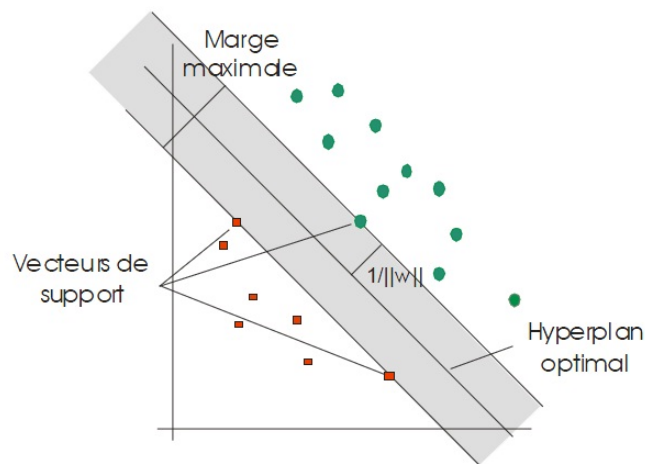


Figure 3.3 – L'hyperplan séparateur est celui qui maximise la marge [41].

Parmi les populations où l'on doit effectuer une classification, il existe des cas linéairement séparables et d'autres non linéairement séparables (Figure 3.4). Les premiers sont les plus simples car ils permettent de trouver facilement le classificateur linéaire. En revanche, dans la plupart des problèmes réels il n'y a pas de séparation linéaire possible entre les données. Pour surmonter cet inconvénient, l'idée des SVM est de changer l'espace des données. La transformation non linéaire des données peut permettre une séparation linéaire des exemples dans un nouvel espace. Ce nouvel espace est appelé « espace de re-description » (Figure 3.5) [44].

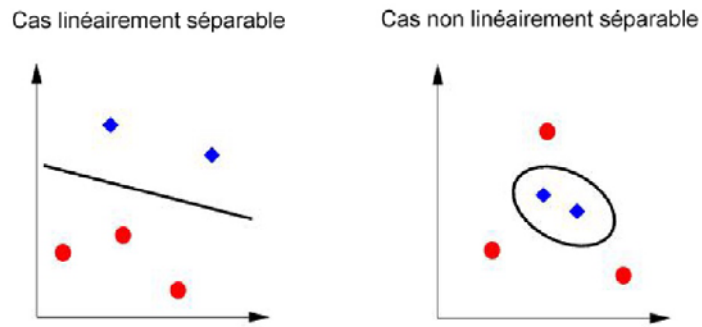


Figure 3.4 – Cas linéairement et non linéairement séparables.

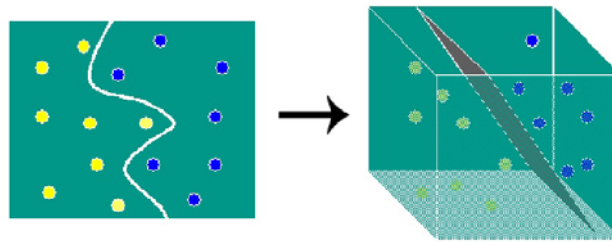


Figure 3.5 – Passage à l'espace de re-description pour une séparation linéaire.

3. Principes théoriques

3.1. Régression par SVM

Soit la population d'apprentissage $(\mathbf{x}_i, y_i), (i = 1, \dots, n) \subset X \times R$, avec X est l'espace des entrées \mathbf{x}_i , tel que $X = R^d$ et $y_i \in R$.

Pour la méthode SVM, le but est de trouver une fonction $f(x)$ qui minimise le risque structurel. Dans le cas de la régression, une fonction coût ne prenant en compte que les déviations supérieures à ε sera utilisée. Autrement dit, l'erreur d'estimation n'est pas prise en compte tant qu'elle ne dépasse pas ε .

Ce concept est celui de la fonction coût ε -insensible qui est définie comme suit [49, 50]:

$$|y - f(x)|_{\varepsilon} = \max(0, |y - f(x)| - \varepsilon) \quad (3.1)$$

Où ε est un paramètre de précision de la régression, $f(x)$ la fonction de régression recherchée et y la valeur prise en \mathbf{x}_i . Cette fonction erreur peut prendre une forme classique comme celle de la fonction quadratique.

3.1.1. Cas linéaire

Pour des raisons pédagogiques nous nous intéressons d'abord au cas d'une fonction linéaire f , il est ainsi possible d'écrire :

$$f(x) = \langle w, x \rangle + b \text{ avec } w \in X, b \in R \quad (3.2)$$

Afin de résoudre le problème d'optimisation relatif à la minimisation du risque structurel, Vapnik a démontré qu'il suffit de résoudre le problème d'optimisation suivant :

- minimiser $\frac{1}{2} \cdot \|w\|^2$ (3.3)

- Sous les contraintes $\begin{cases} y_i - \langle w, x_i \rangle - b \leq \varepsilon \\ \langle w, x_i \rangle + b - y_i \leq \varepsilon \end{cases}$ (3.4)

Pour cela, Vapnik a introduit les *variables de glissement* ξ_i et ξ_i^* afin de faire face aux contraintes irréalisables du problème d'optimisation [51]. Ainsi, la formulation devient :

- minimiser $\frac{1}{2} \cdot \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*)$ (3.5)

- Sous les contraintes $\begin{cases} y_i - \langle w, x_i \rangle - b \leq \varepsilon + \xi_i \\ \langle w, x_i \rangle + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0 \end{cases}$ (3.6)

La constante positive « C » est un paramètre de contrôle entre complexité et erreur tolérée au-delà de la précision ε . C'est ce compromis qui permet aux SVM de contrôler un bruit éventuel présent dans les réalisations [52].

Différents auteurs montrent que ce problème d'optimisation peut être résolu plus facilement dans sa formulation duale. Comme nous le verrons par la suite, la formulation duale fournit la solution pour étendre la SVM à des fonctions non linéaires [49]. Par conséquent, nous allons utiliser une méthode standard de dualisation utilisant des multiplicateurs de Lagrange. Ainsi, le problème dual équivalent s'écrit :

- maximiser $-\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*)(\alpha_j - \alpha_j^*) \langle x_i, x_j \rangle + \sum_{i=1}^n (y_i(\alpha_i - \alpha_i^*) - \varepsilon(\alpha_i + \alpha_i^*))$ (3.7)

- Sous les contraintes
$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \\ \alpha_i, \alpha_i^* \in [0, C] \end{cases} \quad (3.8)$$

Où α_i et α_i^* sont les multiplicateurs de Lagrange associés aux contraintes du problème original. Le problème dual se résout par des méthodes de résolution d'un problème quadratique. Ainsi nous aurons une solution de la forme suivante :

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) \cdot \langle x_i, x \rangle + b \quad (3.9)$$

3.1.2. Cas non linéaire

Dans le cas linéaire l'hyperplan solution ne requiert que le calcul des produits scalaires entre les vecteurs de l'espace d'entrée X . Afin d'étudier le cas non linéaire, il suffit d'appliquer une transformation Φ non linéaire aux données d'apprentissage x_i ou : $\Phi : X \rightarrow F$, F étant un espace de re-description de dimension pouvant être infinie, la solution sera par la suite appliquée dans l'espace F (Figure 3.6). Ainsi la formulation du cas non linéaire est la suivante [53]:

$$f(x) = \langle w, \Phi(x) \rangle + b \text{ avec } w \in X, b \in R \quad (3.10)$$

Cela revient donc à remplacer $\langle \alpha, \beta \rangle$ par $\langle \Phi(\alpha), \Phi(\beta) \rangle$ dans les relations (3.10).

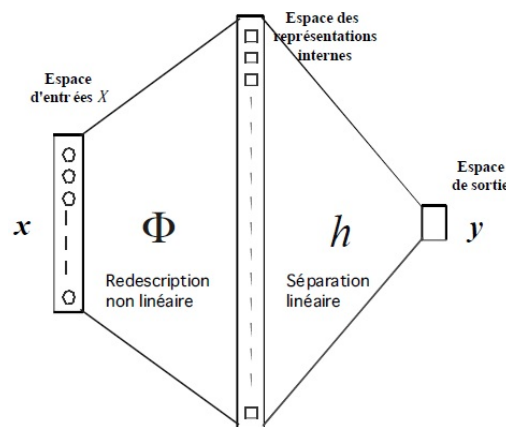


Figure 3.6 – Passage à l'espace de re-description pour une séparation linéaire.

Le produit scalaire $\langle \Phi(\alpha), \Phi(\beta) \rangle$ peut devenir difficile à calculer quand la dimension de $\Phi(X)$ augmente. Ainsi, la transformation de chaque donnée d'apprentissage x_i par Φ peut

être très couteuse en terme de temps de calcul. Afin de pallier à ce désagrément, il existe des fonctions bilinéaires symétriques positives $K(x, y)$, appelées fonctions noyau, qui correspondent à un produit scalaire dans un espace de grande dimension. Ainsi, le problème d'optimisation sera équivalent au système suivant [53]:

- maximiser $-\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*)(\alpha_j - \alpha_j^*) \cdot K(x_i, x_j) + \sum_{i=1}^n (y_i(\alpha_i - \alpha_i^*) - \varepsilon(\alpha_i + \alpha_i^*))$ (3.11)

- Sous les contraintes $\begin{cases} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \\ \alpha_i, \alpha_i^* \in [0, C] \end{cases}$ (3.12)

Dont la solution est l'hyperplan de d'équation :

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) \cdot K(x_i, x) + b \quad (3.13)$$

3.2. Régression par LS-SVM

Afin d'éviter l'utilisation de la méthode d'optimisation quadratique nécessaire à la résolution du problème précédent, Sukens et al [54] ont modifié la formulation du problème d'optimisation de Vapnik. La nouvelle formulation s'exprime par :

- Minimiser $J(w, e) = \frac{1}{2} \cdot \|w\|^2 + \gamma \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n e_i^2$ (3.14)

- Sous la contrainte $y_i = \langle w, \Phi(x_i) \rangle + b + e_i$ et $i = 1, \dots, n$ (3.15)

Pour la résolution du problème d'optimisation posé, on fait appel au lagrangien qui est défini comme suit :

$$L(w, b, e, \alpha) = J(w, e) - \sum_{i=1}^n \alpha_i \{ \langle w, \Phi(x_i) \rangle + b + e_i - y_i \} \quad (3.16)$$

Les α_i sont les multiplicateurs de lagrange.

Les conditions d'optimisation sont données par :

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial w} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial e_i} = 0, i = 1, \dots, n \\ \frac{\partial L}{\partial \alpha_i} = 0, i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (3.17)$$

Ainsi, la solution suivante est obtenue :

$$\begin{bmatrix} 0 & \vec{1}^T \\ \vec{1} & \Omega + \gamma^{-1}I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Avec $\Omega_{ij} = K(x_i, x_j)$ et $i, j = 1, \dots, n$

Le modèle LS-SVM de régression résultant devient :

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot K(x_i, x) + b \quad (3.19)$$

Avec α, b sont les solutions du système linéaire de l'équation (3.15), γ est un paramètre de contrôle.

Il est à noter que plusieurs fonctions noyau existent. Dans le cadre de ce travail nous allons nous intéresser à trois types d'entre elles [55]:

- La fonction noyau à base radiale (RBF) :

$$k(x_i, x_j) = \exp\left(\frac{-\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.20)$$

- La fonction noyau polynomiale :

$$k(x_i, x_j) = (\langle x_i, x_j \rangle + 1)^d \quad (3.21)$$

- La fonction noyau sigmoïde :

$$k(x_i, x_j) = \tanh(d\langle x_i, x_j \rangle + 1) \quad (3.22)$$

4. Conclusion

Nous avons pu introduire lors de ce chapitre les fondements théoriques de la régression par méthode LS-SVM.

Nous avons pu constater la différence entre SVM et LS-SVM. Cette dernière ayant pour avantage la réduction du temps de calcul, mais aussi la réduction du nombre des paramètres de contrôle. Ceci facilite l'optimisation du modèle lors de la recherche des paramètres permettant d'avoir le modèle le plus performant.

Validation des résultats de la régression par méthode LS SVM

1. Introduction

La méthode LS-SVM sera utilisée dans ce chapitre pour l'estimation de la tension de contournement d'un isolateur sous pollution discontinue. Plusieurs configurations de la distribution de la couche de pollution le long de la surface de l'isolateur seront prises en compte.

Dans le but d'obtenir un modèle de régression optimale, un algorithme de recherche sera appliqué. Plusieurs fonctions noyaux seront utilisés et comparés afin de trouver le modèle le plus adapté à la configuration expérimentale étudiée.

En raison de la taille limitée de la population d'observations sur laquelle l'apprentissage du modèle sera effectué, nous allons faire appel à la méthode de la validation croisée. Cette dernière sera plus amplement détaillée tout au long de ce chapitre.

La méthode de recherche par motifs généralisés (GPS) sera utilisée en complément de la méthode LS-SVM pour l'obtention des modèles les plus performants possibles. Cette méthode hybride sera présentée et ses résultats seront détaillés.

2. Validation croisée

2.1. Principe général

La validation d'un modèle à partir des données qui ont servi à son apprentissage est peu judicieuse. Ceci s'explique par une erreur d'estimation nulle ou quasi nulle due au fait que c'est le but de l'apprentissage du modèle. A partir de ce constat, nous faisons intervenir l'échantillon de validation après avoir utilisé un autre échantillon pour l'apprentissage. Ainsi, il devient possible d'estimer l'efficacité réelle du modèle. Trois principaux algorithmes de validation croisée existent, chacun d'eux présente des avantages et des inconvénients.

La validation du modèle se fait par le calcul de paramètres d'évaluation nous permettant de mesurer ses performances. Le choix de ces paramètres se fait en fonction de l'application étudiée. Dans la suite de ce chapitre nous allons introduire les différents paramètres d'évaluation qui y seront utilisés.

2.2. Validation croisée par la méthode du « test set »

Un partitionnement approximatif est effectué sur l'espace d'hypothèses. Généralement 70% de l'espace total représente l'échantillon d'entraînement, les 30% restantes représentent l'échantillon de validation [56].

2.3. Validation croisée par la méthode « leave-one-out »

Pour cette méthode, la $k_{\text{ème}}$ observation de l'espace d'hypothèses est utilisée pour la validation. Le reste des observations représente l'échantillon d'entraînement. Ainsi les paramètres d'évaluation seront calculés pour chaque observation. Une moyenne sera calculée pour évaluer les performances du modèle [56].

2.4. Validation croisée par la méthode du « k-fold »

Le principe de cette méthode se base sur la division de l'échantillon général en k partitions de même taille. Ainsi, la partition k_i est l'échantillon de validation, le reste est l'échantillon d'entraînement. Le test de performance sera effectué pour chaque k_i de 1 à N , avec N le nombre d'observations de notre espace d'hypothèses. Une moyenne sera calculée pour évaluer les performances du modèle [56].

2.5. Avantages et inconvénients

A partir des définitions de chaque méthode, il s'avère que chacune présente des avantages et des inconvénients en fonction de ses caractéristiques. Il est clair que la méthode « Test set » présente l'avantage de la simplicité, néanmoins l'utilisation de 30% de l'espace d'hypothèses pour la validation, réduit l'espace d'apprentissage du modèle. Dans le cas où les données sont insuffisantes, les résultats peuvent être biaisés. On aura ainsi une variance élevée. La méthode du « Leave-one-out », quant à elle, présente l'avantage de ne pas perdre de données, par contre elle est plus consommatrice en temps de calcul. Afin de trouver le compromis entre temps de calcul et minimisation de la variance, la méthode k-fold se trouve la mieux adaptée.

Dans la suite de nos travaux, l'espace d'hypothèses est réduit du fait de la taille des résultats expérimentaux disponibles. De ce fait, la méthode du « Leave-one-out » sera choisie car nous avons besoin d'un maximum de données d'apprentissage d'autant que le temps de calcul ne sera pas significativement affecté.

3. Paramètres d'évaluation

Dans cette partie nous allons introduire les critères d'évaluation qui seront utilisés pour mesurer les performances du modèle.

3.1. Erreur standard (RMSE)

L'erreur standard a pour rôle d'estimer la déviation standard des valeurs aléatoires présentes dans les données expérimentales. Quand la valeur du paramètre tend vers 0, cela signifie que le modèle est conforme à la prédiction [57].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4.1)$$

Tel que ; n la taille de l'échantillon, y_i la $i^{\text{ème}}$ observation et \hat{y}_i la valeur calculée à partir de la $i^{\text{ème}}$ observation.

3.2. Coefficient de variation (COV)

Le coefficient de variation est une mesure de dispersion relative. C'est un nombre sans unité d'où sa préférence par rapport à la variance pour traiter des grandeurs physiques [40].

$$COV = \frac{RMSE}{\bar{y}} \cdot 100 \quad (4.2)$$

Tel que \bar{y} la moyenne des observations.

3.3. Coefficient de détermination (R^2)

Le coefficient de détermination (R^2) est un indicateur qui permet de juger la qualité d'une régression. Il est toujours inférieur à 1, plus il est proche de cette valeur plus l'adéquation entre le modèle et les données observées est importante. Il est exprimé par la relation [58]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.3)$$

4. Optimisation du modèle de régression LSSVM

Dans le but d'aboutir à un modèle de régression efficace, nous avons besoin d'intervenir sur des paramètres de réglage tel que le paramètre de contrôle γ ainsi sur que les paramètres intervenant dans la constitution du noyau.

Pour cela, nous avons choisi d'utiliser l'algorithme d'optimisation de Hsu et Al [45] et de l'adapter à nos données expérimentales. Ainsi, nous allons suivre les étapes suivantes:

1. Faire l'apprentissage du modèle par l'utilisation de grandeurs normalisées. Ceci a pour rôle d'éviter la prédominance d'une grandeur par rapport à une autre. La grandeur normalisée se calcule de la manière suivante:

$$U_{nor} = \frac{U}{\bar{1}_N \cdot \left(\sqrt{\text{diag}(U^T U)} \right)^{\bar{1}}} \quad (4.4)$$

avec $\bar{1}_N = [1, 1, \dots, 1]$ et sa taille est celle de l'échantillon utilisé.

Afin de trouver le modèle le plus performant, nous allons nous intéresser à 03 fonctions noyau différentes.

- La fonction noyau à base radiale (RBF)
- La fonction noyau polynomiale

- La fonction noyau sigmoïde
2. Pour la validation du modèle et bien que Hsu et Al préconisent la méthode du « k-fold ». Nous opterons pour la méthode du « Leave-one-out » du fait de la pauvreté de notre espace d'hypothèses.
 3. Pour l'optimisation du modèle, nous allons rechercher à minimiser le coefficient de variation (COV) en faisant un maillage le long d'une grille ayant pour axe X le paramètre de contrôle Gama et pour axe Y le paramètre relatif à la fonction noyau choisie.
 4. Le modèle optimisé ainsi obtenu sera appliqué sur un espace d'hypothèses indépendant différent du premier sur lequel l'optimisation s'est faite dans le but de vérifier la possibilité de sa généralisation.

5. Validations des résultats

5.1. Espaces d'hypothèses

L'espace d'hypothèses relatif à l'apprentissage et l'optimisation du modèle, tel que décrit dans les étapes 1 à 3 de l'algorithme de Hsu et Al [45], sera tiré des résultats expérimentaux obtenus dans les travaux de Douar et Al [48]. Celui-ci sera appelé dans la suite de ce travail, Lot N°1.

Pour l'étape 4 de l'algorithme d'optimisation, correspondant au test de généralisation du modèle de régression, nous allons utiliser un deuxième échantillon appelé LOT N°2. Celui-ci est tiré des mêmes travaux de Douar et Al [48] mais indépendant du LOT N°1.

Dans le cadre de ce chapitre, nous allons étudier l'influence de la résistivité de la couche de pollution, sa largeur et sa distribution le long de la surface de l'isolateur sur la tension de contournement de ce dernier.

Par conséquent, le modèle LS-SVM (Figure 4.1) de régression aura pour sortie la tension de contournement représentée par la variable Y qui est un scalaire.

L'entrée X du modèle sera, quant à elle, un vecteur constitué de 3 variables (X1, X2, X3). La signification de chaque variable est la suivante ;

- X1 représente la conductivité de la couche de pollution recouvrant la surface de l'isolateur.

- X2 représente le rapport de la largeur de la couche de pollution sur la longueur totale de la ligne de fuite,
- X3 représente un coefficient binaire égal à 1 pour le cas où la couche de pollution est du côté tige. Il est égal à -1 dans le cas où la couche de pollution est du côté capot. Dans le cas où la couche de pollution recouvre la totalité de la surface de l'isolateur, ce coefficient est égal à 1.

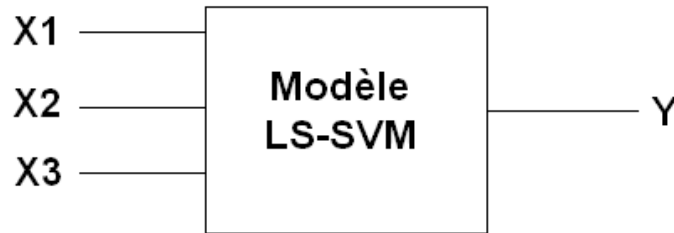


Figure 4.1 – Entrées et sorties du modèle de régression LS-SVM utilisé.

5.2. Résultats et discussion

Dans la démarche de la recherche des paramètres nous permettant d'aboutir à un modèle de régression optimal, nous avons effectué un maillage des paramètres d'évaluation le long d'une grille ayant pour axe X le paramètre de contrôle γ (relation 3.18) et pour axe Y le paramètre relatif à la fonction noyau choisie (relations 3.20, 3.21 et 3.22). Nous faisons varier chaque paramètre, le long des axes X et Y, entre un intervalle donné et de manière exponentielle tel que pour deux points successifs P_n et P_{n+1} nous avons :

$$\text{Log}_2(P_{n+1}) = \text{Log}_2(P_n) + T \quad (4.5)$$

Avec T le pas de variation.

Dans un premier temps, T sera égale à 1. Ceci, dans le but de trouver la zone où la COV est minimale et R^2 maximal. Ensuite, afin d'affiner la recherche, nous allons réduire le pas à 0.1. Ainsi, nous aurons trouvé avec une certaine précision le modèle de régression le plus optimal possible.

Cette opération est répétée pour chaque type de fonction noyau. Les résultats y découlant sont détaillés dans les paragraphes suivants.

❖ **Modèle LS-SVM avec fonction noyau RBF**

Pour la fonction noyau RBF, les résultats de maillage sont illustrés dans les figures (4.2 et 4.3). La minimisation de la COV ainsi que la maximisation de R^2 se font quand $\gamma=2^{-2.5}$ et $\sigma^2=2^{24.5}$ pour $COV=4.346\%$ et $R^2=0.99$.

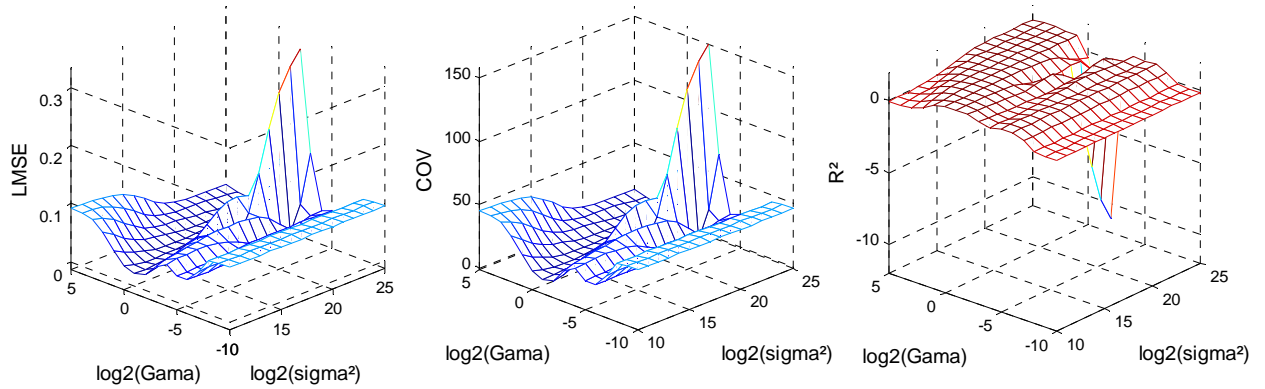


Figure 4.2 – Variation des paramètres d’évaluation en fonction de γ et σ^2 pour le cas de la fonction noyau RBF.

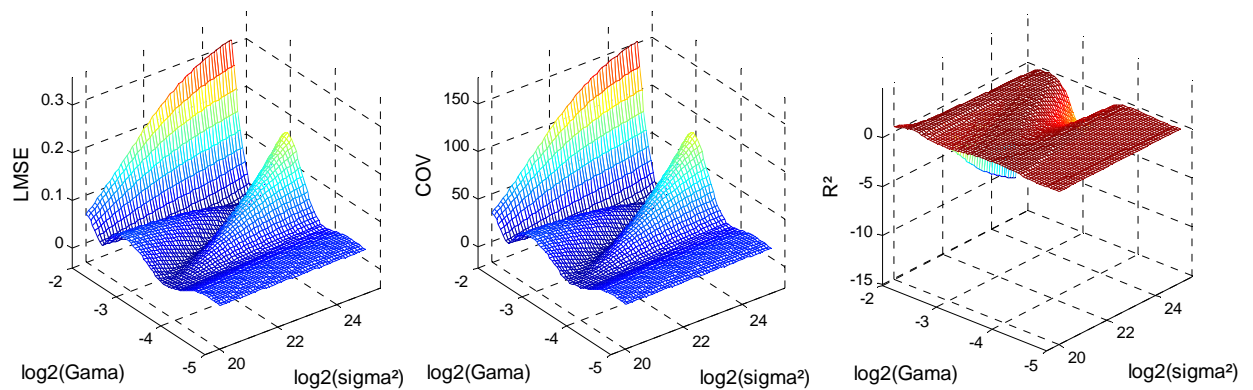


Figure 4.3 – Variation affinée des paramètres d’évaluation en fonction de γ et σ^2 pour le cas de la fonction noyau RBF.

❖ **Modèle LS-SVM avec fonction noyau polynomiale**

Pour la fonction noyau polynomiale, les résultats de maillage sont illustrés dans les figures (4.4 et 4.5). La minimisation de la COV ainsi que la maximisation de R^2 se font quand $\gamma=2^{0.1}$ et $d=2^{16.3}$ pour $COV=9.4628\%$ et $R^2=0.9527$.

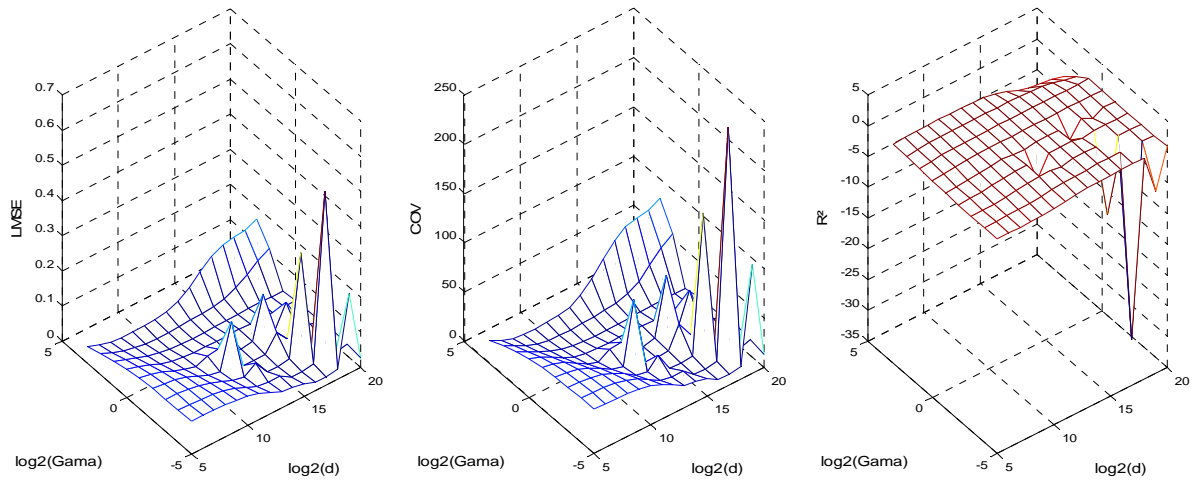


Figure 4.4 – Variation des paramètres d’évaluation en fonction de γ et d pour le cas de la fonction noyau polynomiale.

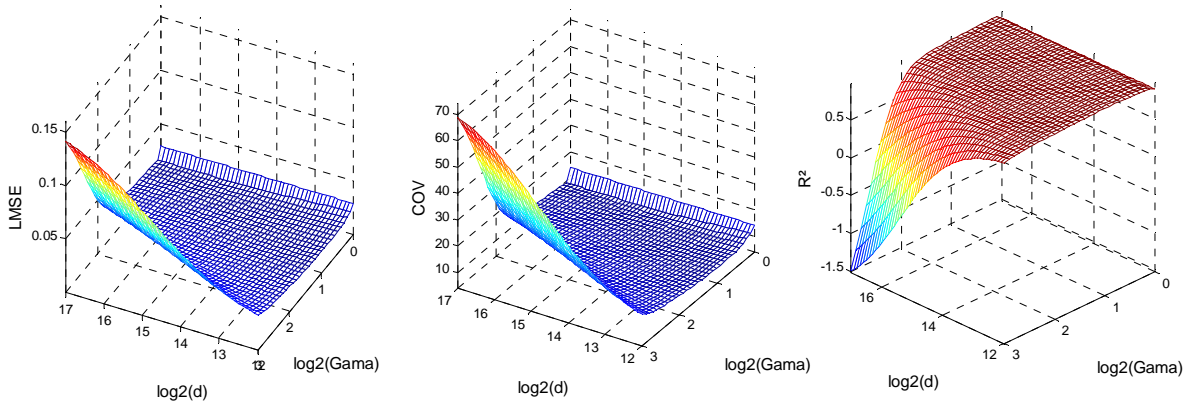


Figure 4.5 – Variation affinée des paramètres d’évaluation en fonction de γ et d pour le cas de la fonction noyau polynomiale.

❖ **Modèle LS-SVM avec fonction noyau sigmoïde**

Pour la fonction noyau sigmoïde, les résultats de maillage sont illustrés dans les figures (4.6 et 4.7). La minimisation de la COV ainsi que la maximisation de R^2 se font quand $\gamma=2^{14.6}$ et $d=2^{0.8}$ pour $COV=7.3688\%$ et $R^2=0.9713$.

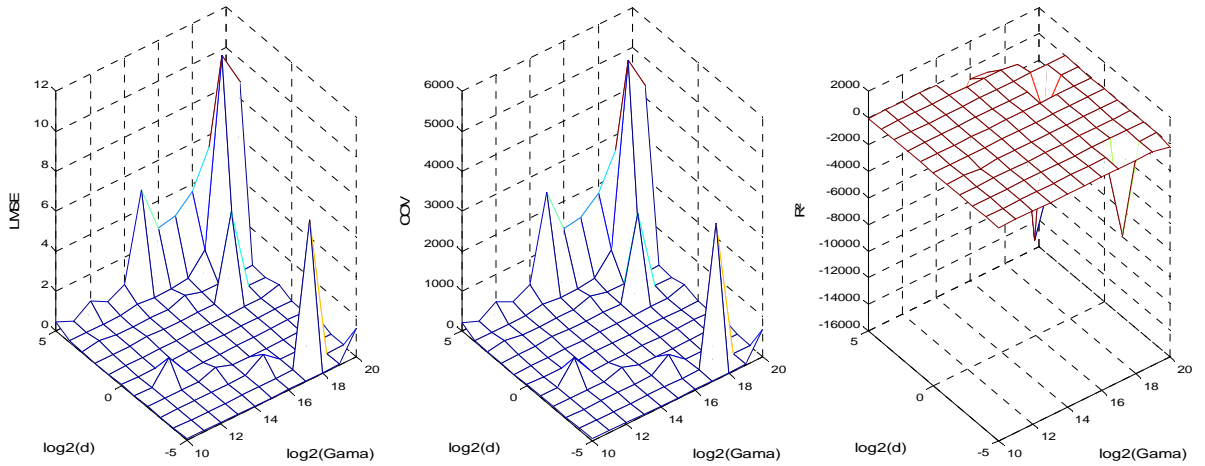


Figure 4.6 – Variation des paramètres d’évaluation en fonction de γ et d pour le cas de la fonction noyau sigmoïde.

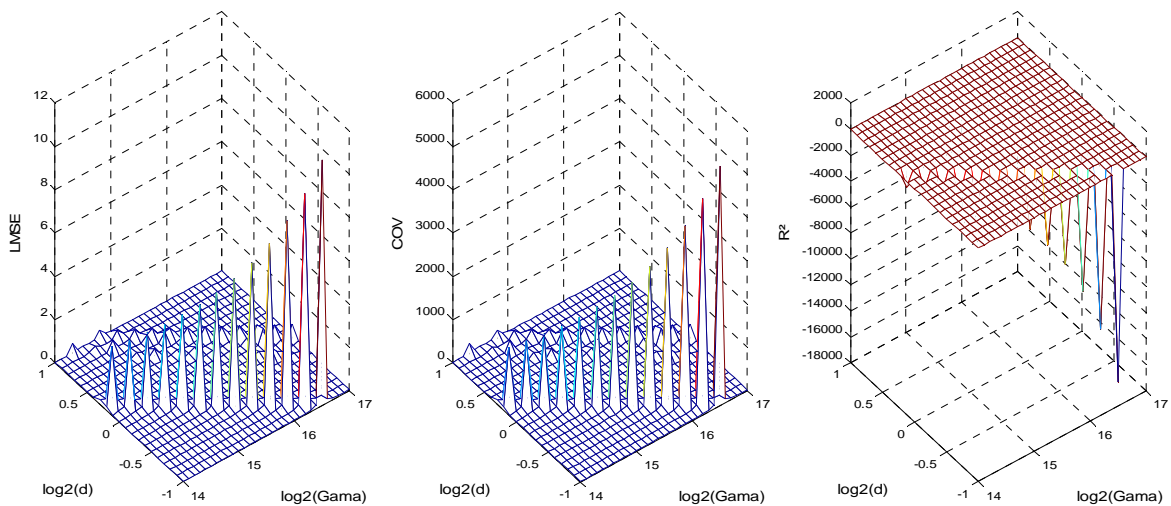


Figure 4.7 – Variation affinée des paramètres d’évaluation en fonction de γ et d pour le cas de la fonction noyau sigmoïde.

Dans le cas de la fonction noyau sigmoïde et lors du passage à un maillage plus fin, de nouveaux pics apparaissent. Ces derniers ne sont pas visibles avec un pas plus important. Il convient ainsi de noter que pour une meilleure détection des points optimaux il faut effectuer un balayage avec le pas le plus petit possible. Cette solution peut s’avérer très consommatrice en temps de calcul.

❖ Test de performances

Afin d'évaluer les performances du modèle de régression, une comparaison sera effectuée entre les valeurs expérimentales de la tension de contournement et celles calculées par le modèle LS-SVM. Les figures (4.8, 4.9 et 4.10) illustrent les performances d'estimation de chacune des fonctions noyau.

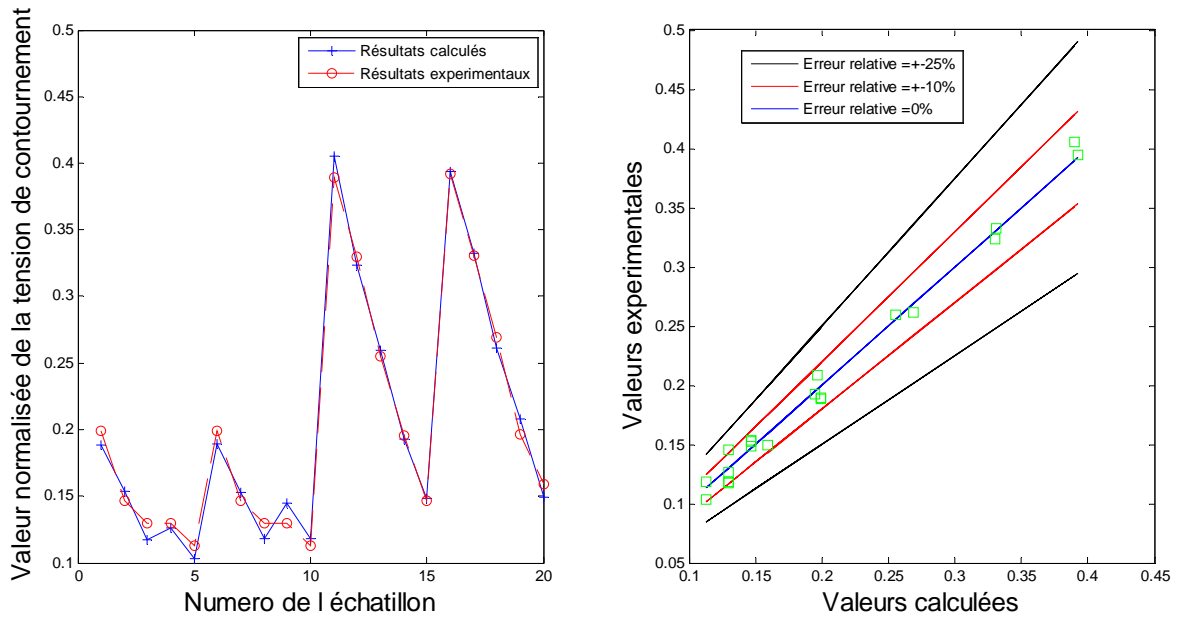


Figure 4.8 – Performances de régression du modèle LS-SVM avec la fonction noyau RBF.

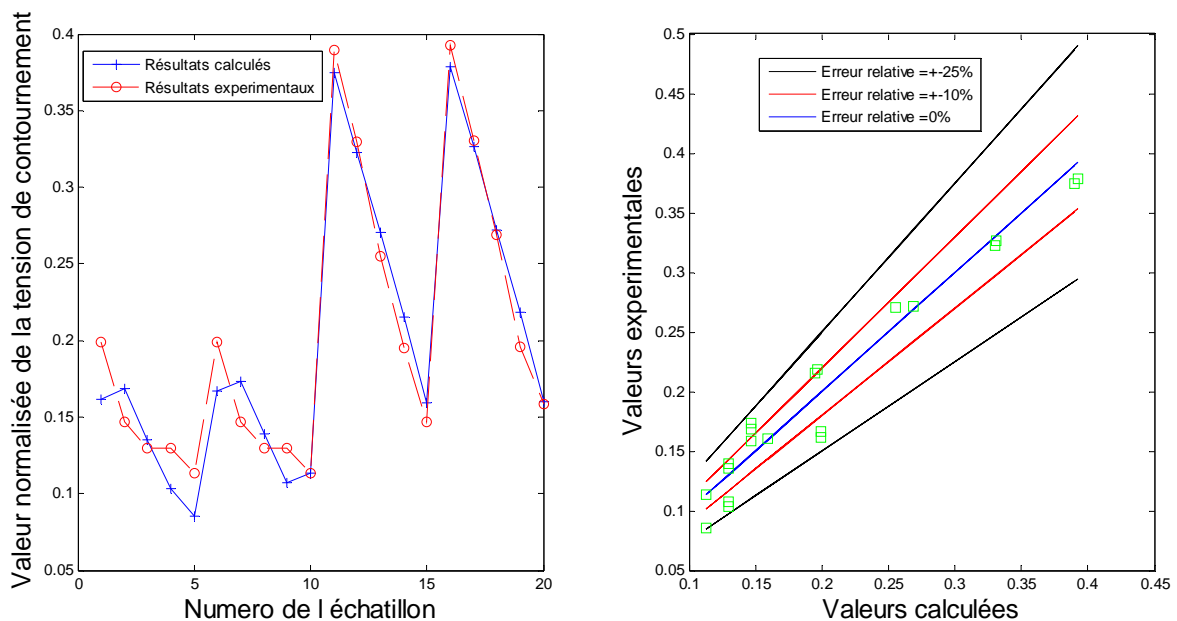


Figure 4.9 – Performances de régression du modèle LS-SVM avec la fonction noyau polynomiale.

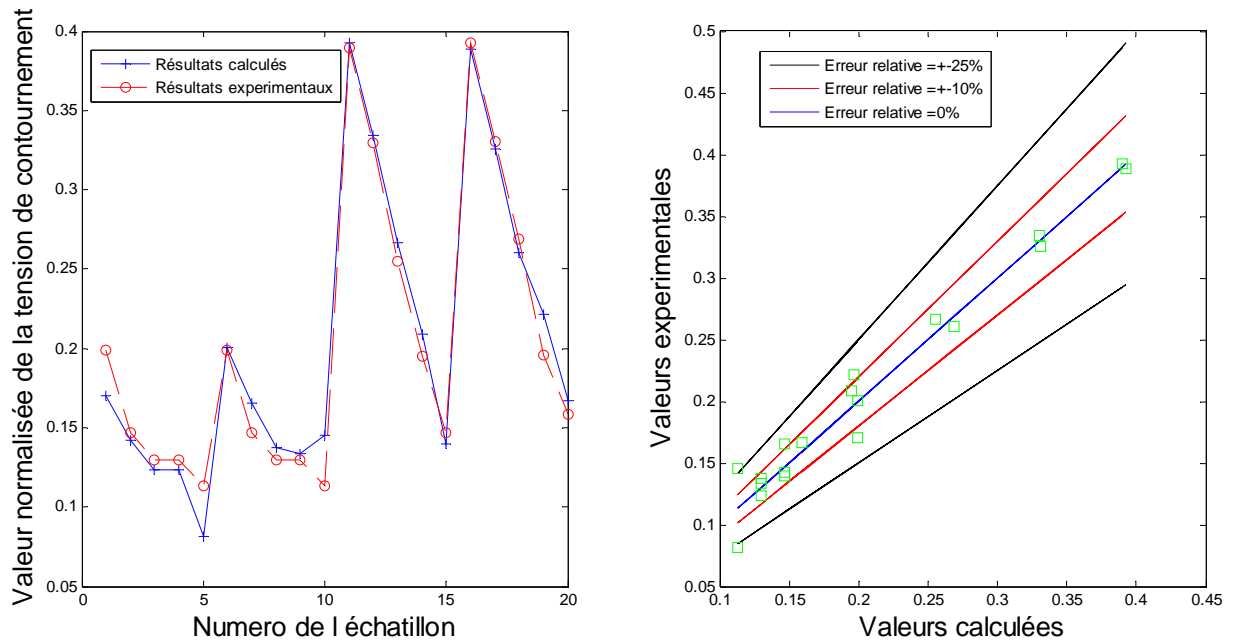


Figure 4.10 – Performances de régression du modèle LS-SVM avec la fonction noyau sigmoïde.

Le tableau-1 englobe les différents paramètres utilisés pour l'évaluation des modèles appliqués au Lot N°1. Le tableau-2, quand à lui, est appliqué au Lot N°2. Il apparaît à partir des résultats obtenus dans le tableau 4.1 que la fonction noyau la plus performante en termes de minimisation du coefficient de variation et de maximisation du paramètre de régularisation est la fonction noyau à base radiale (RBF). La fonction noyau polynomiale présente de bonnes qualités de généralisation car nous pouvons remarquer que suite au passage du LOT N°1 au LOT N°2 les paramètres d'évaluations sont affectés de manière moins importante par rapport aux autres fonctions noyau. Néanmoins la fonction noyau RBF reste la plus performante même avec un échantillon autre que celui utilisé pour l'optimisation du modèle (tableau 4.2).

Fonction noyau	COV	R ²
RBF	4.346%	0.99
Polynomiale	9.4628%	0.9527
Sigmoïde	7.3688%	0.9713

Tableau 4.1 – Paramètres d'évaluation optimaux appliqués au LOT N°1

Fonction noyau	COV	R ²
RBF	6.5886%	0.9763
Polynomiale	9.4219%	0.9516
Sigmoïde	13.3353%	0.9030

Tableau 4.2 – Paramètres d'évaluation optimaux appliqués au LOT N°2

6. Optimisation du modèle LS-SVM avec la méthode de recherche par motifs généralisés (GPS)

Il est évident qu'avec la méthode de maillage telle qu'effectuée précédemment, des optimums éventuels peuvent ne pas être pris en compte suite à un pas de recherche qui serait trop important. Afin de pallier à ce désagrément, nous allons faire appel à la méthode de recherche par motifs généralisés (generalized patternsearch methods, GPS). C'est une méthode d'optimisation numérique qui ne requiert pas la connaissance du gradient de la fonction à optimiser. De ce fait la méthode GPS peut être utilisé pour des fonctions qui ne sont ni continues ni dérivables [59]. Cette méthode a été développée par Hook et al, sous le nom de « **patern search** » [60]. Plus récemment suite aux travaux de Fermi et Al l'appellation de cette méthode est devenue GPS pour « generalized pattern search methods » [61, 62].

6.1. Principe de fonctionnement de la méthode GPS

La méthode GPS est caractérisée par une série de déplacements exploratoires autour du point courant. Ces déplacements forment des motifs qui présentent une disposition invariable (patterns). A chaque itération la fonction coût est évaluée sur les points du motif. Si une amélioration est trouvée, le point associé est accepté comme nouveau point courant, et la taille du prochain motif est conservée ou augmentée. Sinon, la taille du nouveau motif, généré autour de l'ancien point courant, est réduite (*Figure 4.11*).

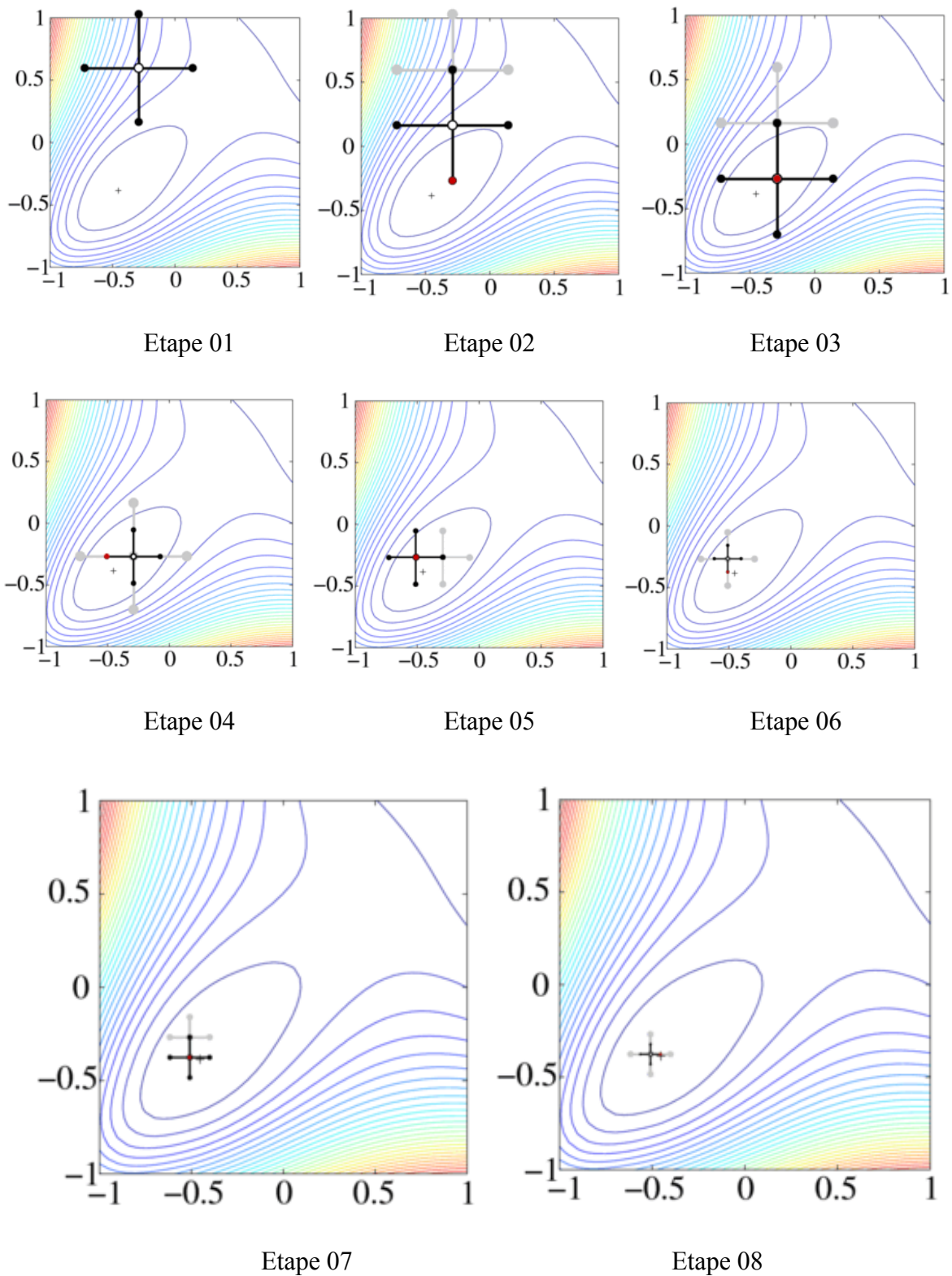


Figure 4.11 – Séquencement de la méthode GPS pour la recherche de l’optimum d’une fonction.

6.2. Résultats et discussions

La méthode GPS sera utilisée en complément à l'algorithme de maillage précédent. Le résultat final de ce dernier sera utilisé comme point initial à la recherche du point optimal. Ainsi une méthode hybride sera mise en place, celle-ci utilise la méthode LS-SVM et la méthode GPS.

Dans le cadre de notre étude nous allons faire appel à la fonction *psearch* sur MATLAB afin de faire exécuter l'algorithme d'optimisation correspondant à la méthode GPS.

Les résultats correspondants à chaque type de fonction noyau seront détaillés dans les paragraphes qui suivent.

❖ Modèle LS-SVM avec fonction noyau RBF

Pour la fonction noyau RBF, les résultats de maillage sont illustrés dans la *Figure 4.12*. La minimisation de la COV se fait quand $\gamma=0.17617$ et $\sigma^2=2.36274.10^7$ pour $COV=4.3285\%$

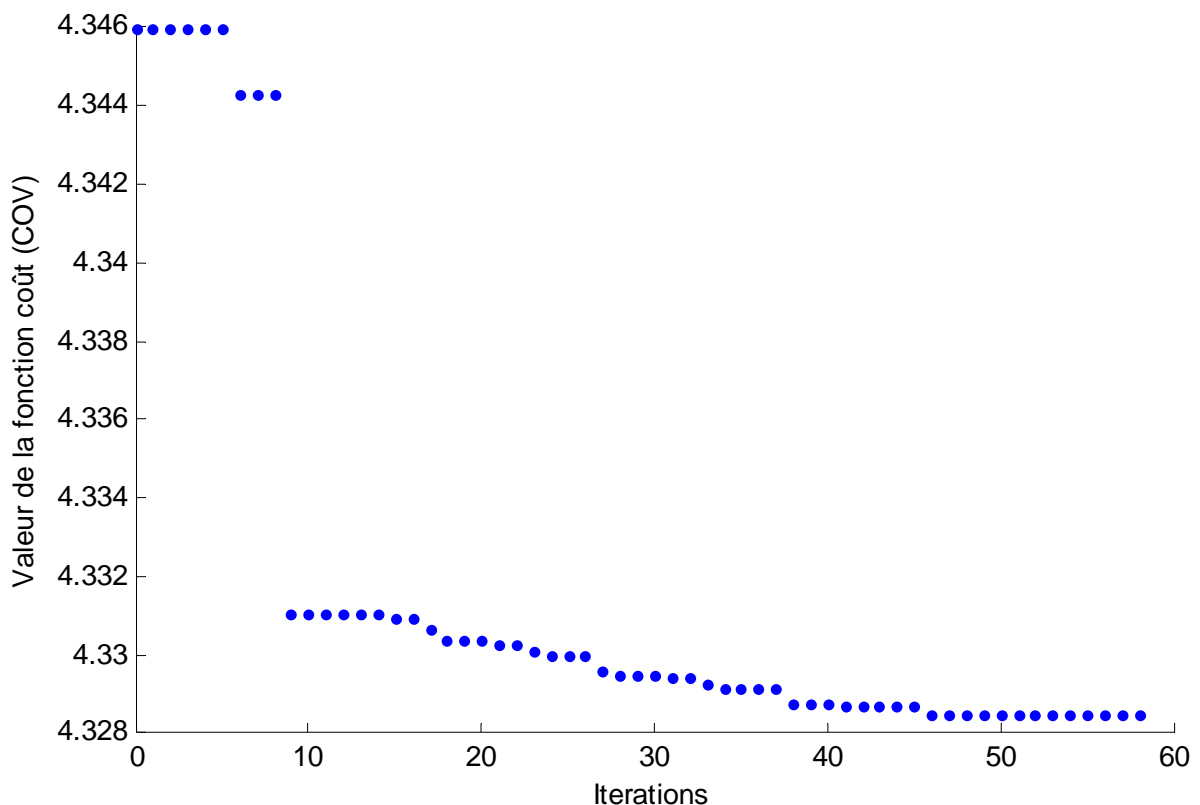


Figure 4.12 – Recherche du point minimisant la covariance pour la fonction noyau RBF.

❖ Modèle LS-SVM avec fonction noyau polynomiale

Pour la fonction noyau polynomiale, les résultats de maillage sont illustrés dans la *Figure 4.12*. La minimisation de la COV se fait quand $\gamma=-1.6791$ et $d=6649.2$ pour $COV=7.1747\%$

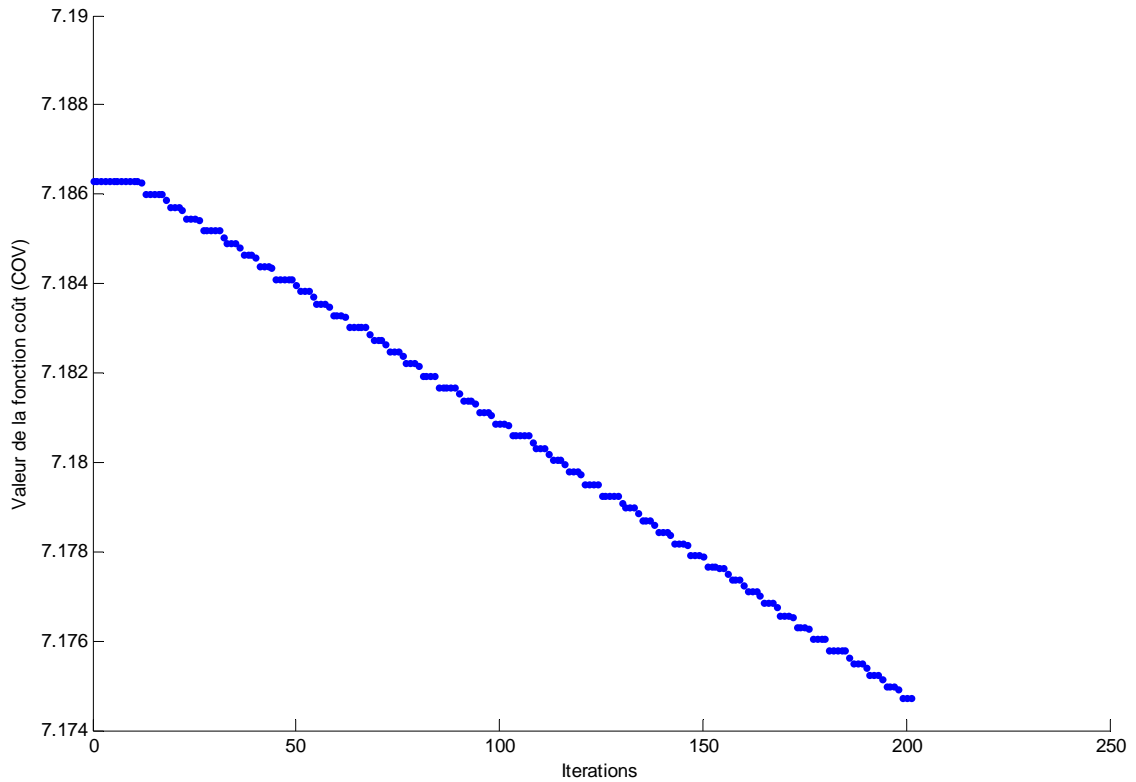


Figure 4.12 – Recherche du point minimisant la covariance pour la fonction noyau polynomiale.

❖ Modèle LS-SVM avec fonction noyau sigmoïde

Pour la fonction noyau sigmoïde, les résultats de maillage sont illustrés dans la *Figure 4.13*. La minimisation de la COV se fait quand $\gamma=-16.50036$ et $d=357.79321$ pour $COV=2.5477\%$

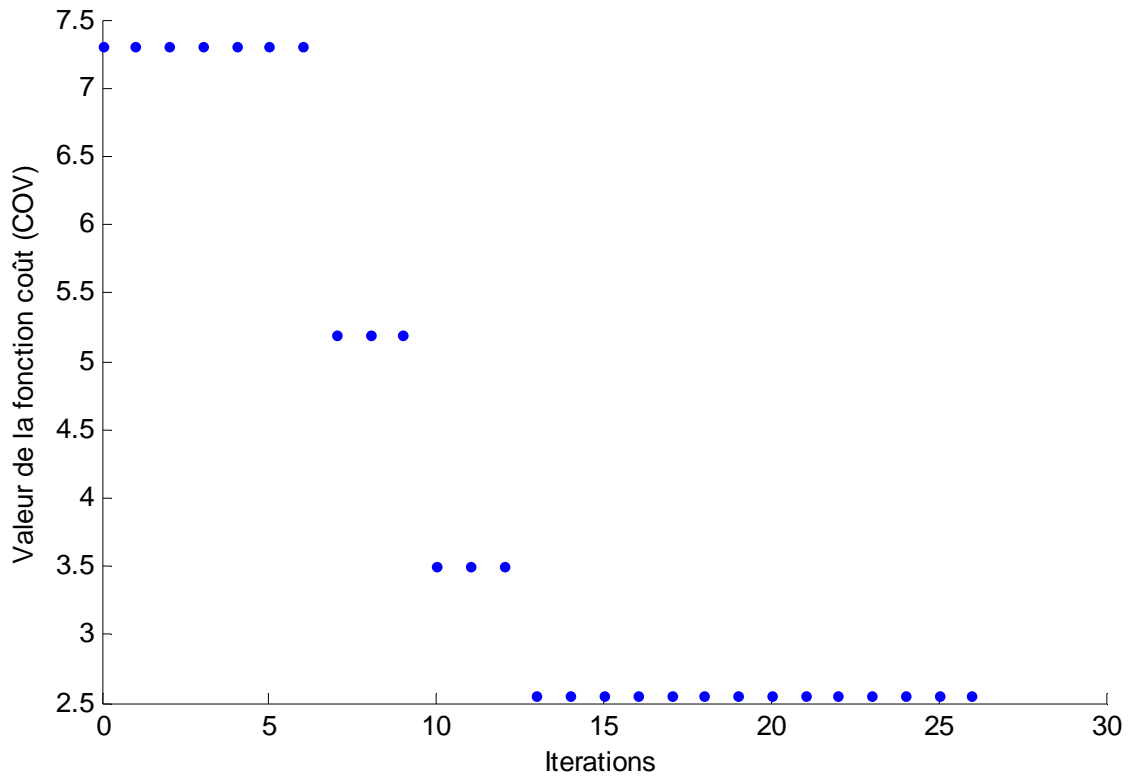


Figure 4.13 – Recherche du point minimisant la covariance pour la fonction noyau sigmoïde.

Nous pouvons constater que la méthode GPS procure une amélioration des performances de nos modèles de régression qui est singulière à chaque fonction noyau.

- Pour la fonction noyau RBF la covariance passe de 4.34% à 4.32%.
- Pour la fonction noyau polynomiale la diminution de la covariance est plus importante car elle passe de 9.4628% à 7.1747 %.
- En ce qui concerne la fonction noyau sigmoïde la diminution de la covariance est la plus importante car elle passe de 7.3688% à 2.5477 %.

❖ Test de performances

Après avoir obtenu des modèles de régression optimisés grâce à une méthode hybride faisant appel aux méthodes LS-SVM et GPS, nous allons procéder au test de performances pour chaque fonction noyau. Nous allons faire appel au LOT N°2 pour la validation des résultats. Celui-ci étant indépendant de l'échantillon utilisé pour l'apprentissage (LOT N°1).

Le tableau 4.3 montre une amélioration des performances de tous les modèles avec les nouveaux paramètres calculés par la méthode GPS. Il est à noter que le modèle se basant sur une fonction noyau sigmoïde a vu ses performances augmenter de manière significative en devenant le plus performant des trois modèles proposés.

Fonction noyau	COV	R ²
RBF	6.4928%	0.9770
Polynomiale	8.2031%	0.9633
Sigmoïde	4.3396%	0.9897

Tableau 4.3 – Paramètres d'évaluations optimisés par méthode GPS et appliqués au LOT N°2

En observant les erreurs relatives pour les trois modèles de régression (*Figures 4.12, 4.13 et 4.14*) nous pouvons constater que les modèles se basant sur des fonctions noyau RBF et polynomiales présentent des résultats satisfaisants. La plupart des tensions de contournements calculés par ces modèles présentent une erreur relative inférieure à 10%. Quant au modèle qui se base sur la fonction noyau sigmoïde, nous constatons que l'erreur relative d'estimation reste inférieure à 5%. Ceci reflète de bonnes capacités d'estimation du modèle.

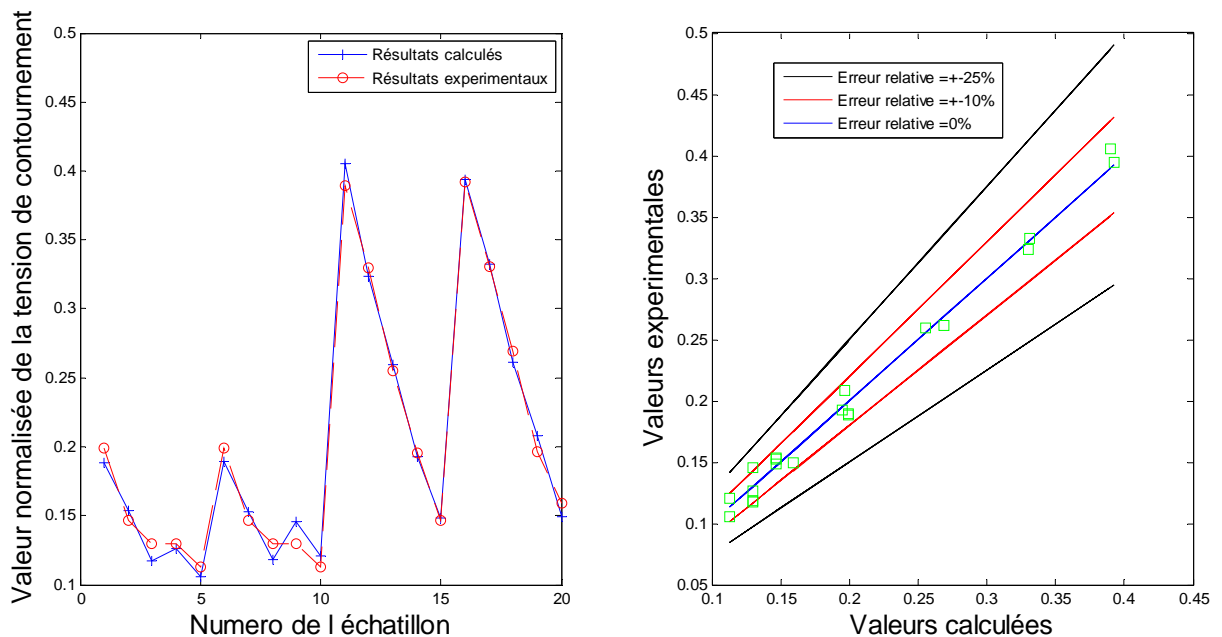


Figure 4.12 – Performances de régression du modèle LS-SVM avec la fonction noyau RBF optimisé par la méthode GPS.

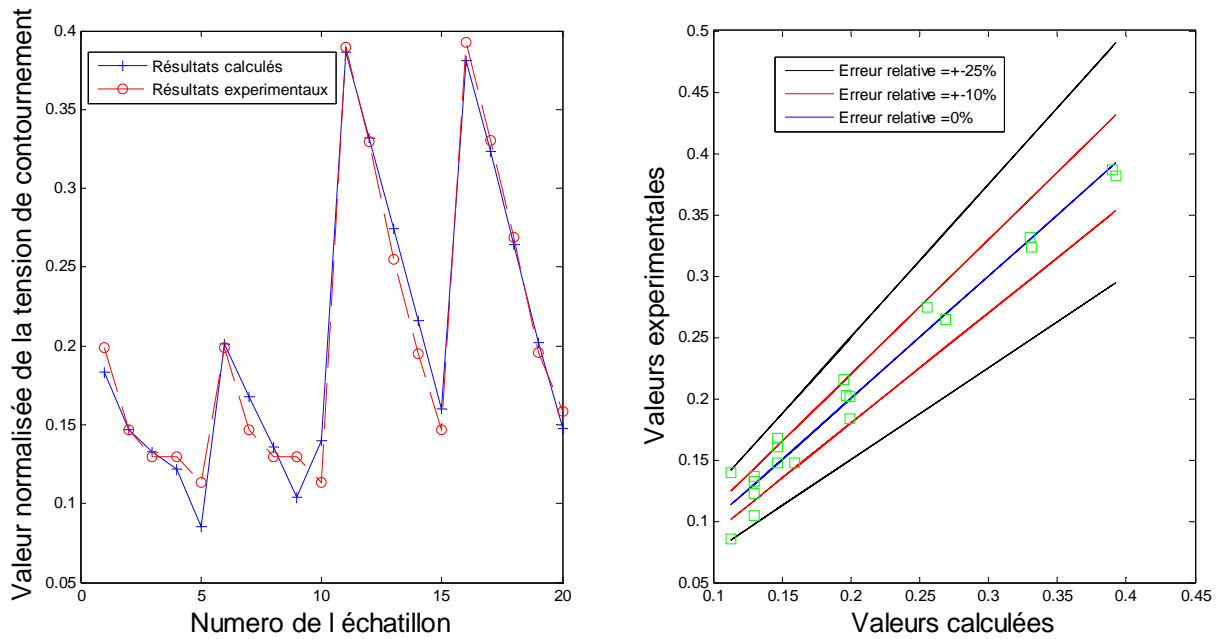


Figure 4.13 – Performances de régression du modèle LS-SVM avec la fonction noyau polynomiale optimisé par la méthode GPS.

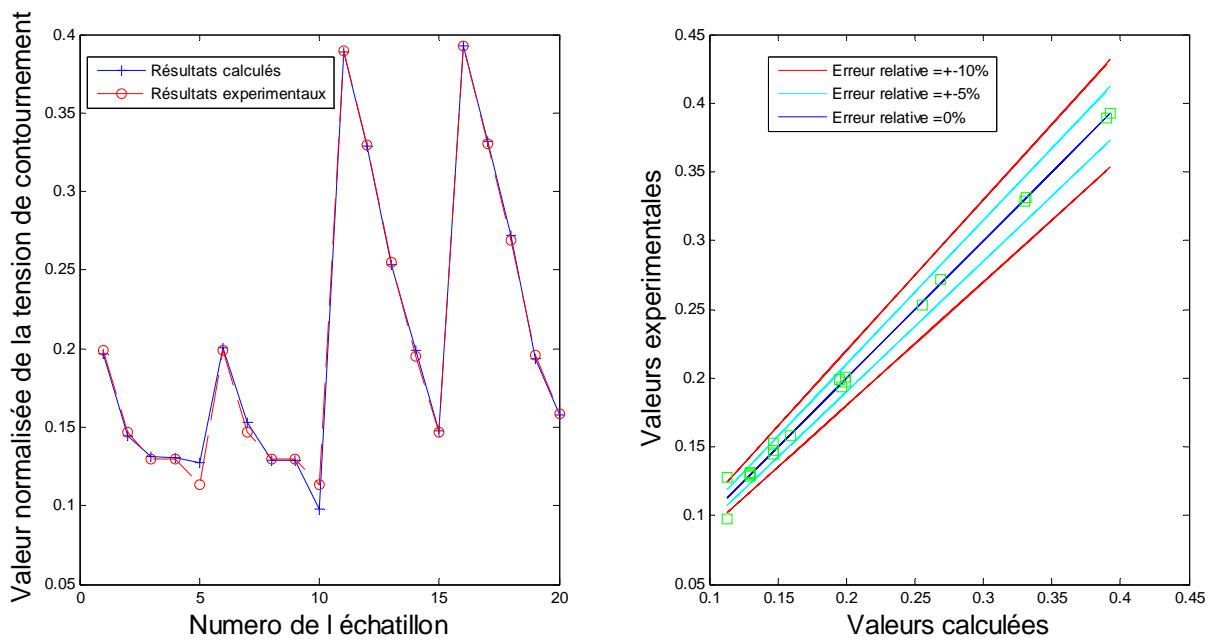


Figure 4.14 – Performances de régression du modèle LS-SVM avec la fonction noyau sigmoïde optimisé par la méthode GPS.

7. Conclusion

Nous avons pu, lors de ce chapitre, proposer un modèle de régression permettant de calculer la tension de contournement d'un isolateur 1512L. Plusieurs configurations ont été

étudiées. Ces dernières prennent en compte la distribution de la pollution le long de la surface de l'isolateur.

Il a été également possible de proposer un modèle optimisé permettant d'aboutir à des résultats concluants. La capacité de généralisation du modèle a été remarquée de par les bons résultats du test de performances.

Néanmoins, il est à signaler que la démarche d'optimisation qui consiste à faire un maillage avec un pas donné, puis d'affiner la recherche avec un pas plus petit, est une méthode qui peut présenter des failles. En raison de la possibilité de présence d'optimums locaux, certains d'entre eux peuvent ne pas être visibles et ainsi ne pas être pris en compte. Il convient donc de faire un maillage avec un pas petit sur un large intervalle. Ceci est un inconvénient majeur de par l'importance du temps de calcul requis.

Afin de pallier à ce désagrément, nous avons utilisé la méthode de recherche par motifs généralisés (GPS). Cette dernière a été jointe au processus de recherche des paramètres de réglage nous permettant d'aboutir au modèle le plus performant possible. De bons résultats ont été constatés spécialement pour le modèle faisant appel à la fonction noyau sigmoïde.

CONCLUSION GÉNÉRALE

A travers notre étude nous avons, dans un premier temps, présenté un modèle dynamique basé sur le circuit électrique équivalent d'Obenaus et le critère de propagation de Hampton. Ainsi, ce modèle nous a permis de déterminer les différents paramètres de la décharge en tenant compte de la géométrie réelle de l'isolateur grâce à l'introduction de la notion de modèle ouvert. Cette dernière prend en compte l'asymétrie de l'isolateur dans la propagation de la décharge. Ainsi, nous avons pu calculer la tension de contournement des isolateurs et décrire la dynamique de l'arc.

Une concordance des résultats de calcul a été observée avec les résultats expérimentaux obtenus au sein de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. L'influence de la résistivité de la pollution a été mise en évidence. En revanche, la non prise en compte de la variation temporelle de la conductivité de la pollution a eu pour effet de provoquer une déviation par rapport aux résultats empiriques. Ainsi, l'hypothèse que l'isolateur peut être équivalent au circuit électrique proposé ne peut correspondre à la réalité. La prise en compte d'autres paramètres physiques est donc nécessaire à la simulation de la propagation de la décharge électrique sur un isolateur pollué.

La deuxième partie de notre travail consistait en la présentation d'une méthode qui fait abstraction des phénomènes physiques régissant le contournement de l'isolateur. Nous avons ainsi proposé un modèle de régression permettant de calculer la tension de contournement d'un isolateur 1512L. Plusieurs configurations ont été étudiées. Ces dernières ont pris en compte la distribution de la pollution le long de la surface de l'isolateur.

Il a été également possible de proposer un modèle optimisé permettant d'aboutir à des résultats concluants. La capacité de généralisation du modèle a été remarquée par les bons résultats du test de performances.

Il convient donc de noter que l'optimisation du modèle de régression qui consiste à faire un maillage recherchant les points optimaux présente des failles. Ainsi, l'utilisation de pas trop importants sur un intervalle donné et pour une variable donnée, peut avoir comme conséquence la non prise en compte d'optimums locaux. Un maillage avec un pas plus petit pourrait être une solution mais le temps de calcul lors de la recherche des points optimaux serait excessivement important.

Dans notre travail nous avons utilisé la méthode de recherche par motif généralisés (GPS) afin d'améliorer les performances des modèles de régression. Nous avons ainsi abouti à une méthode hybride permettant de pallier au problème de l'augmentation du temps de calcul lors la diminution du pas de recherche.

Une autre méthode basée sur les algorithmes génétiques pourrait être une alternative à ce désagrément.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **S.Jaafar, A.S. Ahmad, P.S. Ghosh and S.A.K. Almunjid**, "A new approach in modeling AC flashover voltage for polluted insulator", IEEE, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 558-561, 2002.
- [2] **K.L. Chrzan, J. Vokalek, V. Sklenicka, W. Petrusch and J. Kindersberger**, "Pollution flashover of long rod insulators with different profiles", Millpress, XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands, 2003.
- [3] **M.A. Salam, H. Ahmad and T. Tamsir**, "Calculation of time flashover of contaminated insulator by dimensional analysis technique", Computers and Electrical Engineering, Vol. 27, pp. 419-427, 2000.
- [4] **M.Teguar**, "Modélisations d'isolateurs pollués soumis à divers paramètres électro-géométriques", Thèse de Doctorat d'Etat, Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Avril 2003.
- [5] **A.Mekhaldi**, "Etude des Phénomènes de Conduction et de Décharge Electrique sur des Surfaces Isolantes Polluées sous Tension Alternative 50 Hz", Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Septembre 1999.
- [6] **F. Obenaus**, "Fremdschichtüberschlag und Kriechweglänge", Deutsche Elektrotechnik, Vol. 4, pp. 135 - 136, 1958.
- [7] **G. Neumärker**, "Verschmutzungszustand und Kriechweg", Monatsber. d. Deut. Akad. Wiss., Vol. 1, pp.352 - 359, 1959.
- [8] **P. S. Gosh, S. Chakravorti and N. Chatterjee**, "Estimation of Time to Flashover Characteristics of Contaminated Electrolytic Surfaces Using a Neural Network", IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Insul., Vol. 2, No 6, pp. 1064 - 1076, December 1995.
- [9] **Chung et Nour T.C. Chen, H.I.M. Nour**, "A study on the profile of HVDC Insulators", IEEE, Trans. On Elec. Insul., Vol. 24, No. 1, pp.113-117, February 1989.
- [10] **P. Claverie and Y. Porcheron**, "How to Choose Insulators for polluted Areas", IEEE Trans. PAS, Vol. 92, No 3, pp. 1121 - 1131, 1973.
- [11] **G. Zhicheng and Z. Renyu**, "Calculation of DC and AC Flashover Voltage of Polluted Insulators", IEEE Trans. On Electrical Insulation, Vol.25, pp.723-729, 1990.
- [12] **R. Matsuka, H. Shiokuba, K. Kondo, Y. Mizuno, K. Naito, T. Fujimura and T. Terada**, "Assesment of Basic Contamination Withstand Voltage of Polymer Insulator", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No 4, pp. 1895-1900, October 1996.
- [13] **R. Wilkins**, "Flashover Voltage of High Voltage Insulators with Uniform Surface Pollution Films", Proc. IEE, Vol. 116, No 3, pp. 457 - 465, Mars 1969.

- [14] **S. Diampeni Kimbakala**, "*Modélisation Dynamique de Décharges se propageant sur des Surfaces Isolantes Polluées avec des Dépôts Discontinus sous Différentes Formes de Tension*", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, Décembre 2007.
- [15] **F. Rizk**, "*Mathematical Modeles for Pollution Reignition*", *Electra*, Vol. 78, pp. 71 - 103, 1981.
- [16] **P. Claverie**, "*Predetermination of the Behaviour of Polluted Insulators*", *IEEE Trans. PAS*, Vol. 90, No. 4, pp1902-1908, July 1971.
- [17] **A. Rumeli**, "*Computation of pollution flashover voltages of high voltage insulators*", Tubilac Eng. Research group, Project No. MAG-294, Ankara, 1973.
- [18] **M. Marich, H. Hadi, R. Amiri**, "*New approach for the modeling of the polluted insulators*", Annual report Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena, IEEE, 2006.
- [19] **N. Dhahbi**, "*Modélisation Dynamique des Décharges sur les Surfaces d'Isolateurs Pollués sous Différentes Formes de Tensions: Elaboration d'un Critère Analytique de Propagation*", Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon, France, 1998.
- [20] **B. F. Hampton**, "*Flashover Mechanism of Polluted Insulation*", *Proc.PIEEE*, Vol. 111, No. 5, pp. 985 - 990, Juillet 1964.
- [21] **S. Anjana and C. S. Lakshminarasmha**, "*Computed of Flashover Voltages of Polluted Insulators using Dynamic Arc Model*", 6th International Symposium on high voltage Engineering, pp. 30 - 09, USA, 1989.
- [22] **N. Dhahbi - Megriche, A. Beroual and L. Krahenbuhl**, "*A New Proposal Model for Polluted Insulators Flashover*", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 30, No. 5, pp. 889 - 894, March 1997.
- [23] **D.C. Jolly, T.C. Cheng, D.M. Otten**, "*Dynamic theory of discharge growth over contaminated insulator surfaces*", IEEE, PES Winter Power Meeting, Conference Paper No. 74-068-3, 1974.
- [24] **M.T. Gençoglu, M. Cebeci**, "*The pollution flashover on high voltage insulators*", *Electric Power Systems Research*, Vol. 78, pp. 1915-1921, Turkey, 2008.
- [25] **N. Dhahbi - Megriche and A. Beroual**, "*Flashover Dynamic Model of Polluted Insulators Under AC Voltage*", *IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul.*, Vol. 7, No. 2, pp. 283 - 289, April 2000.
- [26] **I.F. Gonos, F.V. Topalis, I.A. Stathopoulos**, "*A Model For The Determination Of The Dielectric Strength Of Non-Uniformly Polluted Insulators*", In *Proceedings Of The IASTED International Conference, Power And Energy Systems*, pp. 301-084, USA, 1999.
- [27] **Z. Aydogmus, M. Cebeci**, "*A New Flashover Dynamic Model of Polluted Insulators*", *IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation*, Vol. 11, No. 4, pp. 577-584, Turkey, 2004.

- [28] **I.F. Gonos, F.V. Topalis, I.A. Stathopoulos**, “*Genetic algorithm approach to the modelling of polluted insulator*”, IEE Proceedings, Vol. 149, No. 3, pp. 373-376, 2002.
- [29] **L. Alston and S. Zoledziowski**, “*Growth of Discharges on Polluted Insulators*”, IEEE, Trans. PAS, Vol. 110, No. 7, pp. 1260 - 1266, Juillet 1963.
- [30] **R. Wilkins, A.A.J. Al Baghdadi**, “*Arc Propagation Along an Electroyte surface*”, IEE Proceeding, Vol. 118, No. 12, pp. 1886-1892, Decembre 1971.
- [31] **A.M. Rahal**, “*Sur les mécanismes Physiques du Contournement des isolateurs Haute Tension* », Thèse de Doctorat es-sciences physiques, université Paul Sabatier, Toulouse, France, Décembre 1979.
- [32] **A. M. Rahal and C. Huraux**, “*Flashover of High Voltage Insulators*”, IEEE Trans., Vol. Pas - 98, N° 6, pp. 2223 - 2231, 1979.
- [33] **P. Zmajkovic**, “*Modélisation du contournement Electrique et Validation Expérimentale du Mécanisme proposé pour l’Extension de la Décharge* », Thèse de l’Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1996.
- [34] **S. Anjana and C. S. Lakshminarasmha**, “*Computed of Flashover Voltages of Polluted Insulators using Dynamic Arc Model*”, 6th International Symposium on high voltage Engineering, paper 30 - 09, New Orleans, USA, 1989.
- [35] **J. Danis**, “*A Stochastic Pollution Flashover Model*”, 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46 - 12, Septembre 5 - 9, Athènes, Grèce, 1983.
- [36] **P.S.Ghosh, S.Chakravorti, N.Chatterjee**, “*ANN with RPROP Algorithm Applied to Modelling of Flashover Voltage Characteristics of Polluted Insulators*”, 9th International Symposium on High Voltage Engineering, pp. 3197.1-3197.4, August 28th-September 1st, Graz, Austria, 1995.
- [37] **V.T. Kontargyri , A.A. Gialketsi, G.J. Tsekouras, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos**, “*Design of an artificial neural network for the estimation of the flashover voltage on insulators*”, Electric Power Systems Research , Vol.77 , pp. 1532–1540, Greece, December 2005.
- [38] **A. S. Ahmad, P.S. Ghosh, S.Ahmed, S.A.Aljunid**, “*Assessment of ESDD on high-voltage insulators using artificial neural network*”, Electric Power Systems Research, Vol. 72, pp. 131–136 , June 2004.
- [39] **M.T. Gencoglu , M. Cebeci**, “*Investigation of pollution flashover on high voltage insulators using artificial neural network*”, Expert Systems with Applications Vol. 36, pp. 7338–7345, 2009.
- [40] **P.Cline , W. Lannes, G.Richards**, “*Use of pollution monitors with a neural network to predict insulator flashover*”, Electric Power Systems Research , Vol. 42, pp. 27-33, USA, 1997.
- [41] **A.S. Farag**, “*Estimation Of Polluted Insulators Flashover Time Using Artificial Neural Networks*”, International IEEE/IAS Conference on Industrial Automation and Control: Emerging Technologies, 22-27 Mai 1995 - Taipei, Taiwan.

- [42] **X. Jianyuan, T.Yun, L.Xin**, “*Forecasting of Polluted Insulator Flashover Based on Multivariate Nonlinear Time Series Analysis*”, Industrial Electronics and Applications, 4th IEEE Conference on, pp. 3694- 3697 , China, 2009.
- [43] **Steve R. Gunn**, “*Support Vector Machines For Classification and Regression*”, Technical Report, Faculty of Engineering, Science and Mathematics School of Electronics and Computer Science, university of Southampton, 10 May 1998.
- [44] **H.Mohamadally, B.Fomani**, “*SVM : Machines à Vecteurs de Support ou Separateurs a Vastes Marges*“, BD Web, ISTY3, Versailles St Quentin, France, 16 janvier 2006.
- [45] **M.T. Gencoglu, M. Uyar**, “*Prediction of flashover voltage of insulators using least squares support vector machines*”, Expert Systems with Applications, Vol. 36, pp.10789-10798, 2009, Firat, Turquie.
- [46] **Z. Renyu, Z. Deheng and G. Zhicheng**, “*A study on the relation between the flashover voltage and the leakage current of naturally or artificially polluted insulators*”, 4th international symposium on High voltage engineering, Vol. II, pp. 46.01, Athens, 1983.
- [47] **F. A. M. Rizk and D. H. Nguyen**, “*Digital Simulation of Source Insulator Interaction in HVDC Pollution Tests*”, IEEE Trans. on Power Delivery, pp. 405 - 410, 1988.
- [48] **M.A. Douar, M.C. Bouzid**, “*Caractérisation de l’état de surface d’un isolateur à l’aide de signaux du courant de fuite de la tension appliquée*“, Mémoire du projet de fin d’études, Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Juin 2009.
- [49] **H.Wendt, P.Flandrin, P.Abry**, “*Régressions par machines à vecteurs supports pour la prédiction de séries Chaotiques*“, CNRS UMR 5672, Ecole Normale Supérieure de Lyon, France, May 2007.
- [50] **A.Farag and R.M. Mohamed**, “*Regression Using Support Vector Machines: Basic Foundations*“, Computer Vision and Image Processing Laboratory Electrical and Computer Engineering Department University of Louisville, Technical Report, December 2004.
- [51] **V. Vapnik, S. Golowich, and A. Smola**, “*Support vector method for function approximation, regression estimation, and signal processing*”, MIT Press, Advances in Neural Information Processing Systems, Vol. 9, pages 281–287, Cambridge, 1997.
- [52] **F. Deheeger**, « *Couplage mécano-fiabiliste : SMART - méthodologie d'apprentissage stochastique en fiabilité* », thèse de Doctorat, Université BLAISE PASCAL - Clermont II, Ecole Doctorale, janvier 2008.
- [53] **G.Wang, D.Yeung, F. H. Lochovsky**, “*A Kernel Path Algorithm for Support Vector Machines*”, Proceedings of the 24th International Conference on Machine Learning, Corvallis, OR, 2007.
- [54] **J.A.K. Suykens, J.Vandewalle**, “*Least squares support vector machine classifiers*”, Neural Processing Letters, Vol.9, No.3, pp.293-300, 1999.
- [55] **B. Scholkopf, A. J. Smola**, “*Learning with Kernels*”, MIT Press, USA, 2002.

- [56] <http://www.faqs.org/faqs/ai-faq/neural-nets/part3/section-12.html>.
- [57] http://en.wikipedia.org/wiki/Root-mean-square_deviation
- [58] http://en.wikipedia.org/wiki/Coefficient_of_determination
- [59] **M. Wetter, E. Polak**, “*A convergent optimization method using pattern search algorithms with adaptive precision simulation*”, Eight International IBPSA Conference, pp. 1393- 1400, Eindhoven, 2003.
- [60] **R. Hooke, T.A. Jeeves**, “*Direct search solution of numerical and statistical problems*”, Journal of the Association for Computing Machinery, pp. 212–229, 1961.
- [61] [http://en.wikipedia.org/wiki/Pattern_search_\(optimization\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Pattern_search_(optimization))
- [62] **M.A. Luersen**, “*GBNM : Un Algorithme d’Optimisation par Recherche Directe – Application à la Conception de Monopalmes de Nage*”, Thèse de doctorat, Institut Nationale des Sciences Appliquées de Rouen, Décembre 2004.