

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abderrahmane Mira – Béjaïa



Faculté de Technologie



Département de Génie Électrique

## Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention d'un diplôme de Master en électrotechnique

Option : Réseaux électriques

Thème

---

### Prévision des paramètres du phénomène de contournement des isolateurs par des modèles statistiques

---

Réalisé par :

**Atmani Oussama**

**Benikhlef Mohand Matoug**

Encadré par ;

**Mr. Sahli Zahir**

---

## Remerciements

Avant, toute personne, nous tenons à remercier notre Dieu Tout Puissant pour nous avoir éclairci le chemin de ce travail.

Nous souhaitons tout d'abord remercier notre encadreur monsieur **SAHLI ZAHIR**, pour avoir accepté de diriger ce mémoire et de sa patience durant la période de l'encadrement, pour son suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire et pour ses précieux conseils

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants d'Électrotechnique qui ont contribué à notre formation par ailleurs, Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté d'examiner notre travail.

Enfin, Nous adressons nos remerciements à toute notre famille sans oublier nos amis et collègues qui nous ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de notre démarche.

# SOMMAIRE

Introduction Générale .....	1
-----------------------------	---

## Chapitre I : Isolants et isolateurs

I.1	Introduction .....	3
I.2	Isolants.....	3
I.2.1	Définition .....	3
I.2.2	Isolateur.....	3
I.2.3	Isolation.....	3
I.2.4	Diélectrique .....	3
I.3	Différents types d'isolants .....	4
I.3.1	Isolants gazeux .....	4
I.3.2	Isolants liquide .....	4
I.3.3	Isolants solides [6].....	4
I.4	Nature de l'isolation .....	5
I.4.1	Porcelaine .....	5
I.4.1.1	Représentation.....	5
I.4.2	Verre .....	5
I.4.3	Silicone.....	6
I.5	Propriétés diélectriques des isolants .....	6
I.5.1	Rigidité diélectrique .....	7
I.5.2	Permittivité .....	8
I.5.3	Résistivité .....	9
I.6	Angle de pertes et facteur de dissipation .....	9
I.7	Résistivité et résistance d'isolement .....	10
I.7.1	Définition et signification.....	10
I.7.2	Résistance et résistivité superficielle.....	10
I.8	Performance d'une surface d'un isolant .....	10
I.8.1	Angle de contact.....	10
I.8.2	La Mouillabilité.....	11
I.8.3	Superhydrophillté .....	11
I.8.4	Hydrophilite .....	122
I.8.5	Non mouillabilité.....	12
I.8.6	Hydrophobicité.....	12
I.8.7	Super hydrophobicité .....	12

I.9	Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs .....	12
I.9.1	Céramiques.....	12
I.9.2	Verre .....	13
I.9.2.1	Verre trempé.....	13
I.9.2.2	Verre recuit.....	13
I.9.3	Bakélite.....	13
I.9.4	Silicone.....	13
I.10	Application des isolants dans l'industrie électrique .....	14
I.11	Conclusion .....	15

## **Chapitre II : Modèles mathématiques de contournement des isolateurs sous pollution**

II.1	Introduction .....	15
II.2	Modèles du contournement des isolateurs sous pollution .....	15
II.2.1	Modèle d'Obenaus .....	15
II.2.2	Modèle de Neumarker.....	17
II.2.3	Modèles de Rizk.....	18
II.2.4	Modèle de Claverie et Porcheron .....	18
II.2.5	Modèle d'Alston et Zoledziowski .....	19
II.2.6	Modèle de J. Danis .....	20
II.2.7	Modèle de A. Mekhaldi.....	21
II.2.8	Modèle du disque circulaire .....	21
II.2.9	Modèles de Tegar .....	22
II.2.10	Modèle Dhahbi , Beroual et Krahenbul.....	23
II.2.11	Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh .....	24
II.2.12	Modèle de D. Namane.....	26
II.2.12.1	Les principaux résultats qui ont été obtenus sont les suivants.....	27
II.2.13	Modèle de Dhahbi et Beroual.....	27
II.2.14	Modèle de Wilkins .....	28
II.3	Conclusion .....	28

## **Chapitre III : Modèle statistique de régression, résultats d'essai et validation des modèles**

III.1	Introduction .....	29
III.2	Modèle statistique de la régression.....	30
III.3	Définitions .....	30
III.3.1	Valeur observée .....	30
III.3.2	Valeur prévue.....	30
III.3.3	Valeur du résidu.....	30

III.3.4	Valeur prévue standard .....	30
III.3.5	Valeur du résidu standard .....	30
III.3.6	Erreur-type de la valeur prévue .....	30
III.3.7	Résidu supprimé .....	30
III.3.8	Distance de Cook .....	31
III.3.9	Comment gérer les points atypiques .....	31
III.4	Régression Linéaire Multiple .....	31
III.4.1	Présentation du modèle .....	31
III.4.2	Estimation des paramètres par la méthode des moindres carrés .....	31
III.4.2.1	Présentation matricielle du modèle .....	32
III.4.2.2	Estimation des paramètres du modèle.....	32
III.4.3	Les hypothèses du modèle de régression linéaire multiple .....	33
III.4.3.1	Hypothèses probabilistes .....	33
III.4.3.2	Test des hypothèses probabilistes .....	33
III.4.3.2.1	Test de la variance des erreurs .....	33
III.4.3.2.2	Test de normalité (Q-Q Plot et Droite de Henry).....	33
III.4.3.2.3	Test de corrélation entre les erreurs .....	34
III.4.3.2.3.1	Tracé des résidus standardisés en fonction de leur ordre .....	34
III.4.3.2.3.2	Le test de Durbin-Watson .....	34
III.4.4	Tests de signification pour les paramètres estimés.....	35
III.4.5	Analyse de la variance.....	36
III.4.5.1	Décomposition de la variance .....	36
III.4.5.2	Tests de signification de la régression.....	38
III.4.6	Prévision avec les modèles de régression linéaire multiple .....	39
III.4.6.1	Intervalle de confiance de la valeur moyenne de $y$ .....	39
III.4.6.2	Intervalle de prévision pour $y$ .....	39
III.4.7	Coefficient de détermination ( $R^2$ ) .....	40
III.4.7.1	Définition .....	40
III.4.7.2	Propriété .....	41
III.4.7.3	Coefficient de détermination ajusté ( <b><math>R^2(ajusté)</math></b> ) .....	41
III.4.8	Le critère PRESS.....	41
III.4.9	Linéarisation des modèles .....	42
III.4.10	Résumé de l'analyse de régression.....	42
III.5	Partie expérimentale .....	43
III.5.1	Dispositif expérimental : .....	43

III.5.1.1	Circuit d'essai du laboratoire de Haute tension (Université de Bejaia) : ....	43
III.5.2	Techniques de Mesure de la tension de claquage.....	45
III.5.3	Circuit d'alimentation .....	46
III.5.4	Circuit de mesure de la tension appliquée.....	46
III.5.5	Circuit de mesure du courant de fuite .....	46
III.6	Modes opératoires.....	47
III.6.1	Préparation des isolateurs .....	47
III.6.2	Préparation de la solution polluante .....	48
III.6.3	Procédé d'application de la couche de pollution.....	48
III.7	Etude de la tension de contournement de l'isolateur rectangulaire en silicone.....	49
III.8	Étude du courant de fuite.....	64
III.8.1	Influence de la conductivité et de temps d'exposition aux UV.....	64
III.8.2	Résultats expérimentaux .....	64
III.8.3	Modèle statistique de courant de fuite.....	66
III.9	Conclusion .....	75
	Conclusion générale.....	76

# Liste des figures

## Chapitre I : Isolant et isolateurs

<b>Figure I. 1</b> Tension de claquage de quelques polymères (épaisseur $e= 3\text{mm}$ ) .....	7
<b>Figure I. 2:</b> Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension.....	8
<b>Figure I. 3:</b> Circuit électrique équivalent série.....	9
<b>Figure I. 4 :</b> Circuit électrique équivalent parallèle .....	9
<b>Figure I. 5:</b> Comportement d'une goutte sur une surface .....	11
<b>Chapitre II : Modèles mathématiques de contournement des isolateurs sous pollution</b>	

<b>Figure II. 1:</b> Modèled'Obenaus.....	16
<b>Figure II. 2:</b> Modèle expérimental de Claverie et Porcher.....	19
<b>Figure II. 3:</b> Modèle cylindrique utilisé par Alston et Zoledowski.....	19
<b>Figure II. 4:</b> Modèle de Danis .....	20
<b>Figure II. 5:</b> Model d'isolateur en forme de disque conçu par McElroy et Woodson .....	21
<b>Figure II. 6:</b> Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire.....	23
<b>Figure II. 7:</b> Modèle d'isolateur pollué avec son circuit équivalent .....	24
<b>Figure II. 8:</b> Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh.....	25
<b>Figure II. 9:</b> Modèle expérimental selon D.Namane.....	26
<b>Figure II. 10:</b> Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge.....	27
<b>Figure II. 11:</b> Modèle de Wilkins .....	28

## Chapitre III : Modèle statistique de régression, résultats d'essai et validation des modèles

<b>Figure III. 1:</b> Schémas du dispositif expérimental du laboratoire haute tension de l'université Abderrahmane Mira de Bejaïa .....	43
<b>Figure III. 2:</b> dispositif expérimental du laboratoire haute tension de l'université Abderrahmane Mira de Bejaïa. ....	44
<b>Figure III. 3:</b> Schéma électrique du dispositif expérimental de mesure de la tension de contournement et de courant de fuite. ....	45
<b>Figure III. 4:</b> les six échantillons de silicone utilisée.....	47
<b>Figure III. 5:</b> Cellule de test pour le vieillissement UV des modèles des isolateurs en silicone dans les conditions de test avec seul lumière de la lampe à UV .....	48
<b>Figure III. 6:</b> conductimètre à sonde mobile.....	48
<b>Figure III. 7:</b> dispositif expérimentale pour la reproduction de la pollution saline et résultats obtenue .....	49
<b>Figure III. 8 :</b> Tension de contournement en fonction de la conductivité volumique des échantillons du lot 1. ....	50
<b>Figure III. 9 :</b> Tension de contournement en fonction de la conductivité volumique des échantillons du lot 2. ....	51
<b>Figure III. 10:</b> Tension de contournement prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vierges non vieilli du lot 1	52
<b>Figure III. 11:</b> Tension de contournement prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vierges non vieilli du lot 2	52
<b>Figure III. 12:</b> Tension de contournement prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vierges non vieilli du lot 1	55

<b>Figure III. 13</b> : Résidus en fonction des valeurs prévues .....	56
<b>Figure III.14</b> : Carrés de résidus en fonction des valeurs prévue .....	56
<b>Figure III.15</b> : Valeurs Observées en fonction valeurs prévus par le modèle.....	57
<b>Figure III.16</b> : teste normalité.....	57
<b>Figure III.17</b> : Résidus Supprimés en fonction des résidus.....	57
<b>Figure III.18</b> : Valeur résidus en fonction des valeurs Observées .....	57
<b>Figure III.19</b> : Valeur du carré des résidus en fonction des valeurs observées.....	58
<b>Figure III.20</b> : Tension de contournement prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vierges du lot 2.....	58
<b>Figure III.21</b> : Résidus en fonction des valeurs prévues .....	59
<b>Figure III.22</b> : Carrés des résidus en fonction des valeurs prévues.....	59
<b>Figure III.23</b> : Valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....	60
<b>Figure III.24</b> : Résidus en fonction des valeurs observées.....	60
<b>Figure III.25</b> ; : Carrés des résidus en fonction des valeurs.....	60
<b>Figure III.26</b> : Résidus supprimés en fonction des résidus observées.....	60
<b>Figure III.27</b> : Tension de contournement prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 1.....	61
<b>Figure III.28</b> : Tension de contournement prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 2.....	61
<b>Figure III.29</b> : Tension de contournement prévu 95% à de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 1.....	62
<b>Figure III.30</b> : Tension de contournement prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 2.....	62
<b>Figure III.31</b> : Tension de contournement prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 1.....	63
<b>Figure III.32</b> : Tension de contournement prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 2.....	63
<b>Figure III.33</b> : courant de fuite en fonction de la conductivité volumique des échantillons du lot 1 pour une tension appliquée 16kV.....	65
<b>Figure III.34</b> : courant de fuite en fonction de la conductivité volumique des échantillons du lot 2 pour une tension appliquée 16kV.....	66
<b>Figure III.35</b> : courant de fuite prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vierges non vieilli du lot 1.....	67
<b>Figure III.36</b> : courant de fuite prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vierges non vieilli du lot 2.....	67
<b>Figure III.37</b> : Valeurs Prévues vs. Résidus.....	68
<b>Figure III.38</b> : Valeurs Prévues vs. Résidus Carrés.....	68
<b>Figure III.39</b> : Valeurs Prévues vs. Observées.....	69
<b>Figure III.40</b> : Observées vs. Résidus.....	69
<b>Figure III.41</b> : Valeurs Observées vs. Résidus Carrés.....	69
<b>Figure III.42</b> : Résidus vs. Résidus Supprimés.....	69
<b>Figure III.43</b> : teste de normalité .....	70
<b>Figure III.44</b> : courant de fuite prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 1.....	72
<b>Figure III.45</b> : courant de fuite prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 2.....	72
<b>Figure III.46</b> : courant de fuite prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 1.....	73
<b>Figure III.47</b> : courant de fuite prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 2.....	73

<b>Figure III.48</b> : courant de fuite prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 1.....	74
<b>Figure III.49</b> ; courant de fuite prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 2.....	74

## **Liste des tableaux**

### **Chapitre III : Modèle statistique de régression, résultats d'essai et validation des modèles**

<b>Tableau III. 1</b> : ANOVA élémentaire .....	36
<b>Tableau III. 2</b> : ANOVA avec décomposition de la variance due à l'erreur.....	38
<b>Tableau III. 3</b> : Formes fonctionnelles et leurs transformations linéaires.....	42
<b>Tableau III. 4</b> : Résultats statistiques de l'analyse de régression .....	42
<b>Tableau III. 5</b> : Résultats statistiques du modèle : Tension de contournement en fonction de la conductivité volumique. ....	55
<b>Tableau III. 6</b> : Résultats statistiques du modèle : Tension de contournement en fonction de la conductivité volumique .....	59
<b>Tableau III. 7</b> : Résultats statistiques du modèle : courant de fuite en fonction de la conductivité volumique.....	68



## Introduction générale

Le domaine de l'énergie électrique comprend la conception et l'exploitation des systèmes de production, de transport et de distribution. Le génie électrique a connu diverses avancées majeures en ce domaine depuis la fin des années soixante-dix.

Les équipements de haute tension (les câbles, les pylônes, les isolateurs...ext), présents dans les réseaux aériens de transport de l'énergie électrique, sont supposés opérer de façon fiable quelles que soient les conditions environnementales. En particulier, les isolateurs, qui représentent relativement un faible pourcentage dans le prix des lignes aériennes, constituent un élément essentiel dans le bon fonctionnement de ces lignes.

Les lignes aériennes et les postes des réseaux de transport d'énergie électrique sont exposés à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution des isolateurs constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie. En effet par temps de pluie ou de brouillard, les dépôts polluants se fixant sur les surfaces isolantes réduisent considérablement la résistivité superficielle et le contournement peut parfois survenir. Les isolateurs sont des éléments essentiels dans la conception d'une ligne aérienne. Leur rôle est de relier les conducteurs sous tension aux supports et d'assurer l'isolement électrique entre ces deux parties constitutives de la ligne. En effet, le choix du type d'isolateur, les contrôles de réception, la surveillance en exploitation doivent être faite avec un maximum de soin, pour assurer le bon fonctionnement de la ligne.

Les isolateur polymères des lignes électriques aériennes ont été largement utilisé durant les dernières années en raison de leur très forte résistance à la contamination, leur résistance mécanique et leur très bonne hydrophobicité procurée par la silicone. Le remplacement des isolateurs en verre et en céramique par des isolateur polymères pour les applications d'isolation extérieure haute tension à augmenter rapidement. Cependant les isolants polymères sont de nature organique et les conditions d'exposition au rayons ultraviolet (UV) peuvent provoquer une décompensation progressive de leur structure chimique.

De ce fait, les éléments constituant les systèmes de transport d'énergie électrique sont exposés à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution des isolateurs constitue un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie.

Le phénomène d'accumulation de la pollution sur la surface des isolateurs en silicone et accentué pas le vieillissement de la silicone par les ultraviolets (UV). Dans ce présent travaille nous sommes intéressés aux décharges surfaciques sous tension alternative des modèles d'isolateur en silicone soumissent à des cycles de vieillissement sous des rayons UV. Il s'agit plus particulièrement de développer un modèle statistique permettant de prédire les caractéristiques des décharges se propageant sur des surfaces polluées.

Le premier chapitre est dédié à la description des isolants en silicones, leurs propriétés électriques, Le deuxième, sera consacré à définir les modèles du contournement des isolateurs sous pollution.

Nous présentons une approche théorique sur la méthode de modélisation Par régression linéaire multiples ainsi que les différents tests probabilistes que nous avons utilisés et nous décrivons

en détail les procédures que nous avons suivi durant nos essais au laboratoire de haute tension université Abderrahmane Mira de Béjaïa nous présentons et discussion les résultats expérimentaux que nous comparons à ceux des simulations. La validation du modèle établi n'est obtenue que si les prévisions de simulation sont en bon accorde avec les résultats expérimentaux. Les principaux résultats obtenus et leur discussion sont présentés dans la conclusion générale.

# **Chapitre I**

**Isolants et isolateurs**

## I.1 Introduction

Les matériels, destinés à supporter des organes sous tension dans l'air et les isoler entre eux ou par rapport à la terre, ont un comportement particulier dans le sens où la défaillance de l'isolation peut se manifester soit par un arc de contournement dans l'air à la surface de l'isolateur, soit par une perforation du matériau solide constituant l'isolateur et provoquant sa destruction. La distance d'amorçage dans l'air le long de l'isolateur doit être suffisante pour assurer l'isolation souhaitée, compte tenu de l'environnement (pluie, brouillard salin, pollutions diverses) qui peut réduire notablement la tension d'amorçage. A cet effet, les isolateurs sont munis de jupes destinées à allonger la ligne de fuite dans l'air.

En outre, ils sont conçus pour que la perforation soit impossible. Cette précaution permet aux isolateurs de continuer à assurer leur fonction de support mécanique même lorsque leur fonction d'isolation n'est plus remplie. Cela est très important dans la pratique.

## I.2 Isolants

### I.2.1 Définition

Un isolant est une substance dont la conductivité est nulle ou, en pratique très faible. L'action d'isoler est le moyen d'empêcher la conduction électrique entre conducteurs soumis à des champs électriques. On peut considérer comme isolant, tous les matériaux dont la résistivité est supérieure à  $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ . [1,2]

### I.2.2 Isolateur

L'isolateur est utilisé pour l'isolement entre deux corps ou deux pièces sous différentes tensions afin d'empêcher les courts circuits et les pertes de courant résultantes.

Les isolateurs des lignes aériennes ont deux fonctions principales.

D'une part, ils permettent d'isoler électriquement les lignes de transport d'énergie électrique des pylônes mis à la terre, et d'autre part, ils ont un rôle mécanique qui consiste à soutenir ces mêmes lignes et donc résister aux différentes contraintes mécaniques dues surtout au poids de la ligne, son mouvement en présence de vent [3,4]

### I.2.3 Isolation

C'est un système constitué par des matériaux isolants ou un assemblage de matériaux isolants à considérer avec les parties conductrices associées

### I.2.4 Diélectrique

Un milieu est diélectrique s'il ne contient pas de charges électriques susceptibles de se déplacer. Il ne peut donc pas conduire le courant électrique et il est électriquement neutre. En revanche, les charges électriques à l'intérieur du milieu peuvent se déplacer sous forme de mouvements de faible amplitude et former un dipôle électrostatique sous l'effet d'un champ électrique extérieur. Le matériau est alors capable d'emmagasiner de l'énergie électrostatique.

Un diélectrique est caractérisé par sa permittivité ou constante diélectrique  $\epsilon_r$  (permittivité relative par rapport à celle du vide  $\epsilon_0$ ). Elle décrit le facteur par lequel le champ électrique entre les charges est diminué par rapport au vide et par définition est toujours supérieure à 1. Plus la constante diélectrique est élevée, plus la force entre les deux charges électriques séparées par ce diélectrique est faible. La constante diélectrique intervient aussi en optique en modifiant l'indice de réfraction.

### I.3 Différents types d'isolants

#### I.3.1 Isolants gazeux

Généralement dans le domaine de la haute tension ; on emploie souvent un gaz comme diélectrique, tel que les lignes aériennes et les disjoncteurs. Le développement de la technique de l'isolation gazeuse a pris un grand pas dans le domaine industriel lié à l'élévation des tensions et courants utilisés dans les grands réseaux de distribution. Pour ce type d'application, l'isolant gazeux présente deux avantages : quelle que soit la complexité de la forme du conducteur, le milieu homogène, enveloppe parfaitement les conducteurs, qu'ils soient statiques ou mobiles.. Les gaz les plus utilisés sont :

Air, azote, gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>).

#### I.3.2 Isolants liquide

Les liquides diélectriques sont souvent utilisés en association avec des solides (transformateurs, condensateurs câbles). Ils ont pour rôle de se substituer aux vacuoles qui sont sources de décharges partielles. Les liquides sont utilisés pour :

- Améliorer le pouvoir de coupure de certains appareils électriques par l'amélioration des conditions d'extinction de l'arc électrique.
- Assurer une bonne isolation électrique et permettre un bon refroidissement.[5]

#### I.3.3 Isolants solides [6]

Les isolants solides sont d'origines minérales, organiques et résineuses

Les isolants d'origine minérale sont des substances siliceuses et calcaire, solides à la température ordinaire, incombustibles et supportant des températures élevées, (verre, produits céramiques,);

- ❖ Les isolants d'origine organique sont généralement des substances fibreuses à base de cellulose. Ces matériaux ont une bonne résistance mécanique, ils sont combustibles et ne
- ❖ Supportent pas des températures supérieures à 100°C sans perdre leurs propriétés mécaniques et diélectriques (cellulose, silicone);
- ❖ Les isolants d'origine résineuse sont généralement des matières organiques naturelles ou synthétiques qui peuvent se présenter à l'état solide, thermoplastique ou plastique (caoutchouc).

## I.4 Nature de l'isolation

### I.4.1 Porcelaine

#### I.4.1.1 Représentation

Porcelaine (céramique), produit céramique obtenu à partir d'un mélange de minéraux qui, après cuisson, se vitrifie pour former une pâte blanche, translucide et sonore. La porcelaine est plus dense et plus dure que la poterie (terre cuite). [7,8,9]

En pratique, il est difficile de fabriquer des isolateurs en porcelaine de grosses épaisseurs à cause des contraintes thermiques internes, c'est pourquoi on fabrique les isolateurs en plusieurs pièces collées les unes aux autres.

Les propriétés électriques, mécaniques et thermiques sont les suivantes :

- Rigidité diélectrique élevée, 16 kV/mm ;
- Permittivité relative  $\epsilon_r = 5$  à 6 ;
- Grande résistivité, environ  $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$  à 20 °C ;
- Faibles pertes électriques en basse fréquence et en haute tension ;
- Résistance mécanique 2500 à 4000 N/mm<sup>2</sup>.

En plus de ces bonnes caractéristiques, elle est d'une grande résistance aux agents atmosphériques et chimiques, elle n'absorbe pas l'humidité. Elle présente aussi une grande résistance aux températures élevées sauf qu'au-delà de 300°C ; ces propriétés diélectriques diminuent rapidement [7,8].

### I.4.2 Verre

Il est fabriqué en fondant dans des creusets chauffés au rouge vif à une température 900°C ; un mélange de sable, de chaux et de carbonate de Sodium. Le liquide, peu fluide est coulé dans des moules en acier ayant en creux la forme des isolateurs. Chimiquement, le verre est un mélange de Silicate alcalin et de Calcium ou de Plomb.

Les isolateurs en verre, un peu moins chers, mais plus fragiles que ceux en porcelaine, résistent mieux que la porcelaine à la chaleur des arcs électriques. Un autre avantage du verre est que celui-ci se casse en petits fragments en cas de fissure. Ceci permet de détecter, à partir du sol, l'élément défectueux. [7]

- Sa rigidité est excellente à froid, de l'ordre de 20 kV/mm, tandis qu'elle se trouve divisée par 100 à 400°C.
- Sa permittivité relative environ 5 à 8.
- Sa résistivité à 20°C :  $10^{10} \dots 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ .

Il présente aussi un coefficient de dilatation thermique plus faible, ce qui réduit les contraintes mécaniques internes dues aux écarts de température.

Le verre est plus résistant que la porcelaine à la compression.

L'inconvénient du verre est qu'il favorise la condensation de la vapeur d'eau à sa surface.

### I.4.3 Silicone

On donne ce nom à toute une catégorie de corps récemment inventés qui sont analogues aux résines synthétiques. Ils sont différents, parce qu'ils ne contiennent que peu ou pas de carbone dans la constitution de leurs molécules. Ils ne sont pas combustibles. On en a fabriqué de nombreuses variétés aux propriétés très diverses et faites d'huiles, de vernis, de graisses, de caoutchouc. Les silicones résistent jusqu'à 200 °C sans durcissement ni décharge, et conservent leurs propriétés dans une large gamme de température (- 40 à 200 °C) [9.10] :

- Rigidité diélectrique 15 kV/mm ;
- Permittivité relative à 25 °C et 1 kV est de 5,4;
- Facteur de dissipation diélectrique à 25 °C et 10 kHz ;  $\text{tg}\delta = 4 \text{ à } 5 \cdot 10^{-3}$ ;
- Conductivité thermique : 0,41 à 0,62 W/m. K;
- Température d'auto-inflammation est supérieure à 300°C;
- Masse volumique de 2300 à 2800 kg/m<sup>3</sup>.

## I.5 Propriétés diélectriques des isolants

On peut subdiviser les caractéristiques électriques des matériaux isolants en deux grandes familles :

- la première comprend les propriétés essentielles qui sont:
  - Rigidité diélectrique E;
  - Permittivité relative  $\epsilon_r$ ;
  - Facteur de pertes diélectriques  $\text{tg}\delta$ ;
  - Résistivité électrique  $\rho$ ;
  - Décharge disruptive ou claquage  $U_C$ .
- la seconde famille réunit des caractéristiques plus directement liées à l'emploi de l'isolant dans une catégorie de matériels déterminée, donc en liaison étroite avec les diverses contraintes subies par le matériau au cours de son service (Température, fréquence, ...).[11]

Dans certains cas ces dernières caractéristiques peuvent être des éléments déterminants du choix d'un isolant destiné à une certaine fonction.

### I.5.1 Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique transversale d'un matériau est sa propriété de s'opposer à la décharge disruptive. C'est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut appliquer sans qu'un claquage ou une perforation ou un contournement ou un amorçage d'arc se produit, rendant impossible une nouvelle application de la tension. Selon la norme CEI 60243-1, la rigidité diélectrique transversale d'un matériau se définit comme étant le rapport entre la tension à laquelle se produisent le claquage et la distance séparant les électrodes entre lesquelles est appliquée la tension [12,13]. (Figure I.1)

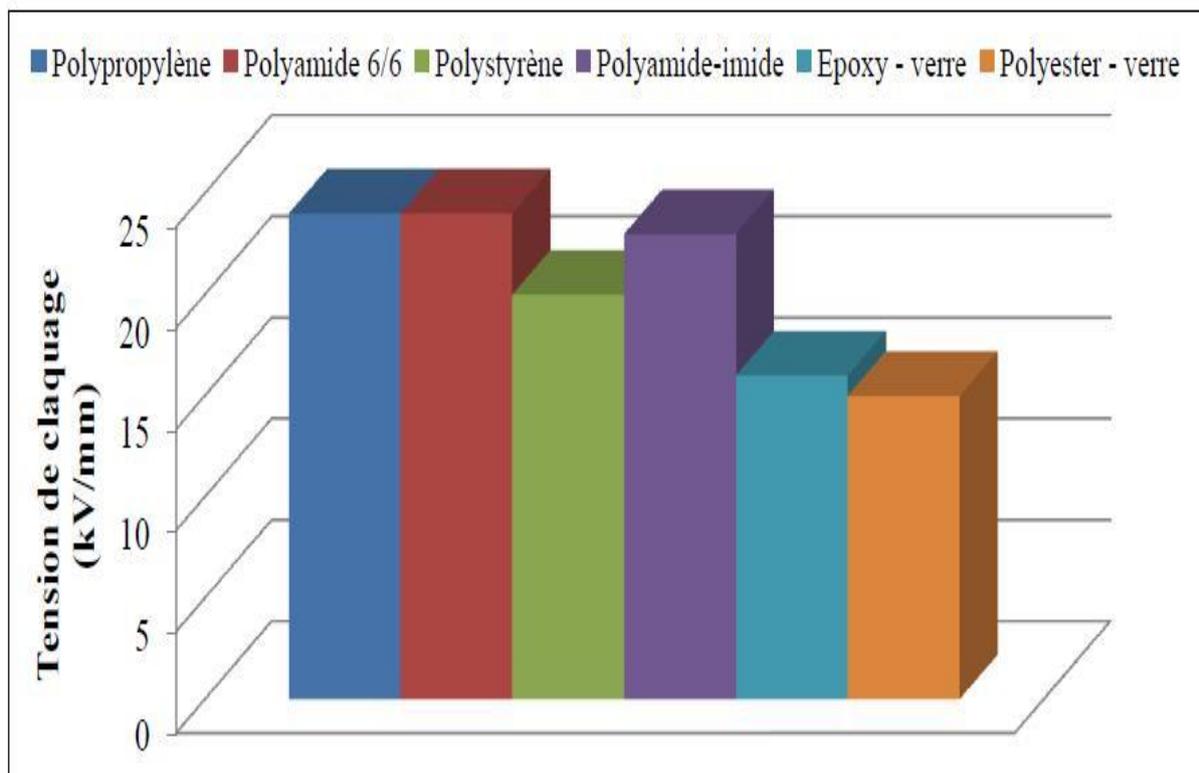


Figure I. 1 Tension de claquage de quelques polymères (épaisseur  $e=3\text{mm}$ )

### I.5.2 Permittivité

Lorsqu'un diélectrique est soumis à l'action d'un champ électrique, il se produit à l'échelle moléculaire diverses modifications qui ont pour effet de créer un champ électrique propre  $E_p$  à l'intérieur de la substance, s'opposant au champ électrique ( $E_e$ ) extérieur appliqué (Figure I.2). Cette caractéristique des isolants solides et liquides porte le nom de la permittivité relative  $\epsilon_r$ .

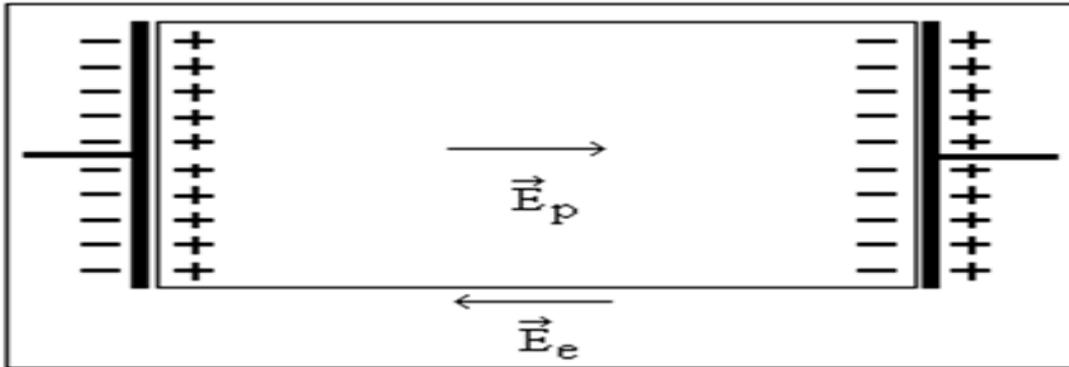


Figure I. 2: Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension

La permittivité relative d'un diélectrique parfait est le quotient de la capacité  $C_x$  entre deux électrodes supposées noyées dans ce diélectrique, par la capacité  $C_0$  de la configuration d'électrodes dans le vide :

$$\epsilon_r = C_x / C_0 \quad (\text{I.1})$$

La permittivité absolue  $\epsilon_a$  est le produit de la permittivité relative par la constante électrique du vide.

$$\epsilon_a = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad (\text{I.2})$$

$$\epsilon_0 = 10^{-9} / 36 \pi = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

Dans le cas des diélectriques non parfaits, on définit de façon analogue une permittivité complexe relative qui tient compte de la dissipation d'énergie dans le diélectrique. Elle s'écrit :

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j \epsilon_r'' \quad (\text{I.3})$$

Où  $\epsilon_r'$  est la partie réelle de la permittivité complexe, jouant le même rôle que  $\epsilon_r$  dans le cas des diélectriques parfaits.

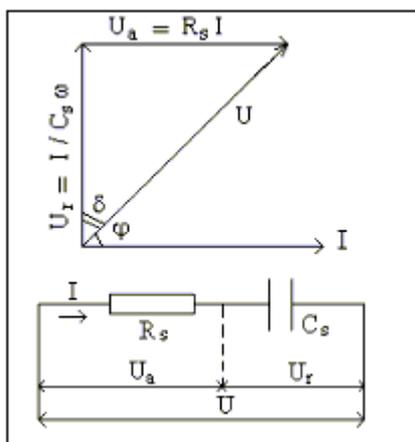
$$\epsilon_a^* = \epsilon_r^* \cdot \epsilon_0 \quad (\text{I.4})$$

**I.5.3 Résistivité**

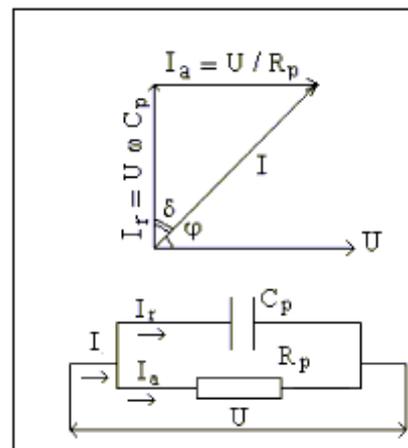
La résistivité d'un matériau, généralement symbolisée par la lettre grecque rho ( $\rho$ ), représente sa capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique. Elle correspond à la résistance d'un tronçon de matériau d'un mètre de longueur et d'un mètre carré de section et est exprimée en ohm-mètre ( $\Omega \cdot m$ ). Sous l'action du champ électrique, toutes les charges se mettent en mouvement. Dans un diélectrique, ce mouvement est un courant électrique, le mouvement des charges libres bien que leur quantité est très faible constituent un courant de fuite. Ce dernier a deux chemins possibles : il passe à travers le diélectrique lui-même ou bien il s'écoule par la surface du diélectrique. On aura donc un courant de fuite surfacique et un autre volumique. Chacun d'eux développe une résistance surfacique ( $R_s$ ) et une autre volumique ( $R_v$ ) [14].

**I.6 Angle de pertes et facteur de dissipation**

Tout isolant soumis à un champ électrique alternatif est traversé par des courants de conduction et d'absorption qui donnent lieu à des pertes diélectriques. Le diélectrique réel peut être représenté par les schémas équivalents suivants (Figure I.3.4).



**Figure I. 3:** Circuit électrique équivalent série



**Figure I. 4 :** Circuit électrique équivalent parallèle

Le courant total traversant l'ensemble du circuit est déphasé en avance sur la tension d'un angle  $\phi < \pi/2$ . Son complément  $\delta$  est appelé angle de pertes. La tangente de cet angle est appelée facteur de dissipation (ou de pertes) et s'obtient de la façon suivante :

$$tg \delta = I_a / I_r = U_a / U_r = P_a / P_r \tag{I.5}$$

D'après la formule I.3 on peut écrire :

$$\operatorname{tg} \delta = \varepsilon_r'' / \varepsilon_r' \quad (\text{I.6})$$

Le produit  $\varepsilon_r'' = \varepsilon_r' \operatorname{tg} \delta$  est dénommé indice de pertes, car il caractérise l'énergie dissipée dans le diélectrique.

## I.7 Résistivité et résistance d'isolement

### I.7.1 Définition et signification

La résistance transversale ou volumique est déterminée en appliquant un champ perpendiculaire à la surface d'une éprouvette et en mesurant le courant transversal qui résulte de l'application de ce champ. Elle est relative aux propriétés internes du matériau.

La résistance superficielle est celle qui intervient entre deux conducteurs sur une même surface isolante. C'est une notion qui fait intervenir en outre la qualité du matériau, le dépôt d'une mince couche conductrice (humidité ou autre) à travers laquelle s'effectue en tout ou en partie la conduction.

La résistance d'isolement fait intervenir à la fois la résistance transversale et la résistance superficielle d'un matériau, d'une façon représentative des conditions pratiques d'emploi des matériaux.

### I.7.2 Résistance et résistivité superficielle

Dans les matériels électroniques (cartes imprimées) l'isolement principal entre deux conducteurs est assuré par la surface de l'isolant, d'où l'importance pratique de la détermination de la résistance longitudinale. Cette résistance comporte d'une part la résistance purement superficielle, mais aussi une certaine fraction de la résistance interne du matériau. Les valeurs relatives de ces deux composantes de la résistance sont fonction de divers paramètres et notamment de la largeur et de l'écartement entre conducteurs ainsi que de l'état d'humidification respectif des couches superficielles et internes du matériau. Par définition, la résistance superficielle est le quotient de la tension continue appliquée entre les deux électrodes disposées à la surface de l'isolant par le courant qui en résulte. La résistivité superficielle est le quotient du gradient de potentiel en surface par le courant par unité de largeur.

## I.8 Performance d'une surface d'un isolant

### I.8.1 Angle de contact

On appelle angle de contact  $\theta$ , l'angle que forme la goutte d'eau avec la surface sur laquelle elle est déposée. Ses valeurs varient de 0 à 180°, en fonction de la nature de la surface (superhydrophile, hydrophile, hydrophobe, superhydrophobe) avec laquelle elle est en contact.

### I.8.2 La Mouillabilité

La mouillabilité est fonction du mouillage qui correspond à la capacité d'un produit à mouiller une surface. Le mouillage est un des phénomènes importants intervenant dans les collages. De façon générale, lorsqu'un liquide est mis en contact avec la surface d'un solide et s'étale sur celle-ci, il se forme un angle de raccordement du premier sur le second. Lorsque le mouillage est parfait, l'angle de raccordement devient nul. Dans ce cas l'énergie d'adhésion est maximum. Pour un système liquide-solide donné, le mouillage dépend de la pression, de la température, de l'hygrométrie.

### I.8.3 Superhydrophillté

Une surface superhydrophile est une surface ayant un angle de contact presque égal  $0^\circ$  avec une goutte d'eau (Figure I.5).

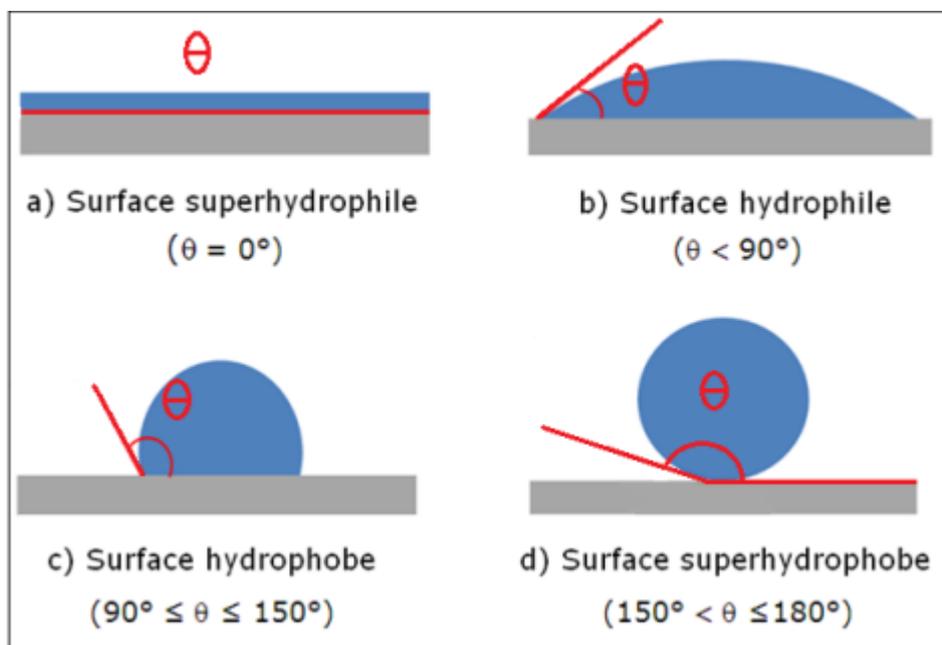


Figure I. 5: Comportement d'une goutte sur une surface

#### **I.8.4 Hydrophilite**

Une surface hydrophile ( $\theta < 90^\circ$ ) est un composé ayant une affinité pour l'eau et tendance à s'y dissoudre. Il peut être soluble dans l'eau (hydrosoluble) ou les solvants polaires. Il est également ionique caractérisée par son aptitude à créer des liaisons d'hydrogène avec des gouttes d'eau qui, en les déposant sur celle-ci, s'étalent, dans ce cas, le contact entre la surface et les gouttes d'eau est maximal (Figure I.3b).

#### **I.8.5 Non mouillabilité**

La non-mouillabilité désigne la capacité de la surface d'un matériau à ne pas pouvoir créer des liaisons d'hydrogènes avec une goutte d'eau, c'est ce qui l'empêche de s'étaler sur la surface.

#### **I.8.6 Hydrophobicité**

C'est la capacité de la surface d'une matière à ne pas absorber d'eau contrairement aux surfaces hydrophiles, les surfaces hydrophobes ont du mal à créer des liaisons d'hydrogène avec les gouttes d'eau, qui, en les déposants sur celle-ci, se rassemblent afin de minimiser la surface de contact avec le matériau (Figure I.3c)

#### **I.8.7 Super hydrophobicité**

Les matériaux superhydrophobes sont une catégorie des matériaux hydrophobes ayant un angle de contact supérieur à  $150^\circ$  en y déposant une goutte d'eau, cette dernière a tendance à se rassembler en gardant une forme sphérique (Figure I.3d). On dit qu'une surface est superhydrophobe si et seulement si une goutte d'eau reposant sur cette surface atteint un angle de contact d'au moins  $150^\circ$ . Pour cela une surface doit posséder deux caractéristiques : premièrement son matériau de surface est apolaire, dans un second temps sa texture de surface réalise le modèle Cassie.

### **I.9 Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs**

#### **I.9.1 Céramiques**

Le développement de la fabrication des céramiques date depuis longtemps à cause de leurs performances. Pour les isolateurs qui vont être utilisés dans des lieux où il ya des contraintes mécaniques très importantes, on utilise de préférence des céramiques à grains très fins. Souvent on trouve les céramiques dans les postes : isolateurs supports, couverture isolante des sectionneurs, des disjoncteurs, des transformateurs de potentiel, des bornes de traversées des transformateurs de puissance. [15]

## I.9.2 Verre

En Algérie, les isolateurs utilisés dans les lignes de moyenne et haute tension sont en verre. Parmi les avantages que présentent le verre, le bas prix et l'observation des défauts est très facile. On trouve deux types de verre pour la fabrication des isolateurs : le verre trempé et le verre recuit.

### I.9.2.1 Verre trempé

La résistance à la traction du verre trempé est environ 5 à 6 fois plus grande que le verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100° C.

### I.9.2.2 Verre recuit

Le verre recuit est utilisé pour la fabrication d'isolateurs rigides, mais présente cependant des inconvénients. Parmi ces inconvénients, nous citons le fait qu'il ne résiste pas aux variations brusques de température et qu'il ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles et c'est pour cette raison qu'il n'est pas utilisé pour la fabrication des isolateurs de suspension.

## I.9.3 Bakélite

C'est une résine artificielle inventée vers 1909 par le chimiste BAKELAND. On l'obtient sous trois états [16,17].

- Bakélite A : Produite par un chauffage modéré (50°C), et une résine jaunâtre, fondant facilement et soluble dans l'alcool méthylique.
- Bakélite B : C'est de la bakélite transformée par un chauffage prolongé vers (110°C) ; elle est solide, friable, insoluble dans les dissolvants usuels ;
- Bakélite C : S'obtient vers (180° C) ; elle est insoluble, dure infusible et supporte sans se décomposer une température de 300°C ; elle n'est pas attaquée par l'oxygène, l'ozone et les acides usuelles.

## I.9.4 Silicone

Les principaux dérivés organosiliciés industriels sont les silicones (l'une des origines de ce nom viendrait de silicone, traduction anglaise du mot silicium) dont la production mondiale, en constante expansion, avoisinerait annuellement le million de tonnes. Leur méthode de préparation a été découverte par Müller en Allemagne pendant la seconde guerre mondiale, a été, indépendamment industrialisée par E. G. Rochow aux États-Unis à la fin de cette guerre ; cinquante ans après, très améliorée, elle est toujours d'actualité.

L'attractivité de ses propriétés couplées à la possibilité de disposer de produits silicones sous différentes formes (huiles, résines, élastomères, gels...) a fait que ces polymères se rencontrent dans pratiquement tous les secteurs de l'industrie.

Les polysiloxanes ou caoutchoucs de silicone sont les caoutchoucs très spéciaux dont le tonnage est le plus important.

Ce ne sont plus des caoutchoucs à squelette carboné mais des caoutchoucs à base de silicium-oxygène. Leur qualité la plus remarquable est leur domaine d'utilisation en température, qui s'étend de 85 à + 250°C, avec une quasi-constance de leurs propriétés dans ce domaine. En revanche, leurs propriétés mécaniques sont relativement faibles. Ils entrent dans de nombreuses applications de secteurs tels que l'industrie électrique et électronique, ou l'industrie automobile. Ils se caractérisent aussi par une grande inertie physiologique, ce qui permet de les utiliser dans le domaine médical (prothèses). Ils ont une résistance médiocre aux huiles hydrocarbonées sauf pour les élastomères silicones fluorés, très chers, mais très appréciés dans l'aéronautique (tenue au froid, à la chaleur et au kérosène). [15,18,19]

### **I.10 Application des isolants dans l'industrie électrique**

L'adoption définitive d'un isolant par un constructeur repose sur la prise en considération de la nature multidisciplinaire des études et essais sur celui-ci. Leur réalisation nécessite des connaissances en électricité, en mécanique, en chimie et statistiques. De nombreuses expérimentations sont également nécessaires afin d'évaluer la durée de vie d'un nouveau matériau. On estime que les progrès récents dans la mise en œuvre des isolants nous imposent de

- Dimensionner au mieux l'isolation des matériaux électriques ;
- Maintenir le taux de défaillance des isolations au-dessous de leurs valeurs acceptables pour les utilisateurs ;
- Développer les isolants permettant la construction de matériels de tensions de plus en plus élevée ou fonctionnant dans des conditions particulières.

Mais diverses contraintes, liées essentiellement à l'industrialisation provoquent des changements importants. Dès à présent les producteurs et les utilisateurs d'isolants doivent :

- Tenir compte d'exigences très diverses selon les sites sur lesquels sont installés les matériels (réseaux, bâtiments, bord de mer, centrales nucléaires etc...);
- Réduire ou supprimer les pollutions résultant de la dispersion d'isolants liquides, d'additifs, dans la nature ou d'incendies entraînant la production de composés toxiques ou corrosifs ;

- Mettre au point des procédés de fabrication et de mise en œuvre des isolants nécessitant une moindre consommation d'énergie

## I.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse des principales caractéristiques des surfaces polymériques. Cette synthèse montre l'importance de cette thématique qui continue de faire l'objet de nombreuses études. En effet, la fiabilité des systèmes de transport et de distribution de l'énergie électrique est tributaire de la qualité du système d'isolation.

Un matériau isolant ne peut être considéré comme un bon isolant que lorsque celui-ci possède une permittivité moins élevée, des pertes électriques les plus faibles, une rigidité diélectrique et une résistance d'isolement très grande.

Les isolants solides, notamment les polymères sont très demandés dans le domaine industriel à l'importance de leurs excellentes propriétés électriques, thermiques et mécaniques mais surtout pour leurs coûts raisonnables. La fiabilité des matériaux isolants reste toujours un des soucis majeurs de l'électrotechnique, surtout que ces matériaux sont constamment soumis à des contraintes électriques et atmosphériques sévères.

# **Chapitre II**

**Modèles mathématiques de  
contournement des isolateurs sous  
pollution**

### II.1 Introduction

De nombreux auteurs ont imaginé de reproduire le phénomène de contournement sur des modèles simplifiés afin de pouvoir le décrire par des équations mathématiques simples.

Depuis des années, de nombreux modèles mathématiques de propagation de la décharge jusqu'au contournement et tous les phénomènes associés, ont été développés la plupart de ces modèles sont empiriques ou semi-empiriques. Actuellement, des modèles analytiques sont également proposés

Cette importante quantité de travaux, tant théoriques qu'expérimentaux, consacrés à ce phénomène n'a pas permis pour autant d'aboutir à l'élaboration d'un modèle pouvant tenir compte simultanément de tous les paramètres réels caractéristiques du phénomène de pollution.

Dans ce qui suit, nous allons exposer les différents modèles en précisant les tensions d'amorçage, les conditions critiques de l'élongation de la décharge et de la tension de génération d'une décharge disruptive.

### II.2 Modèles du contournement des isolateurs sous pollution

Plusieurs travaux expérimentaux et théoriques ont été consacrés pour expliquer le mécanisme conduisant au contournement des isolateurs pollués.

Il s'agit en particulier de la forme des isolateurs, de la répartition des couches polluantes (homogènes ou non homogènes), de la résistivité des échanges thermiques, du non uniformité du mouillage, de l'intensité des arcs au voisinage de la surface isolante, de la formation d'arcs multiples et de la détermination de la tension de contournement. Dans ce qui va suivre, nous allons exposer une recherche bibliographique des différents modèles statiques et dynamiques développés dans ce domaine.

#### II.2.1 Modèle d'Obenaus

Le premier chercheur qui était à l'origine des premières analyses quantitatives des phénomènes d'arcs se produisant sur les surfaces isolantes planes, recouvertes d'une couche polluante, est à l'origine des premières analyses quantitatives des phénomènes d'arcs se produisant sur les surfaces isolantes planes, recouvertes d'une couche polluante, sous tension continue [20] . Partant d'un modèle type circuit électrique équivalent, constitué d'un arc de longueur en série avec une résistance représentant la résistance de la pollution ((Figure II.1) où L représente la longueur de fuite totale), il en a déduit la tension d'arc :

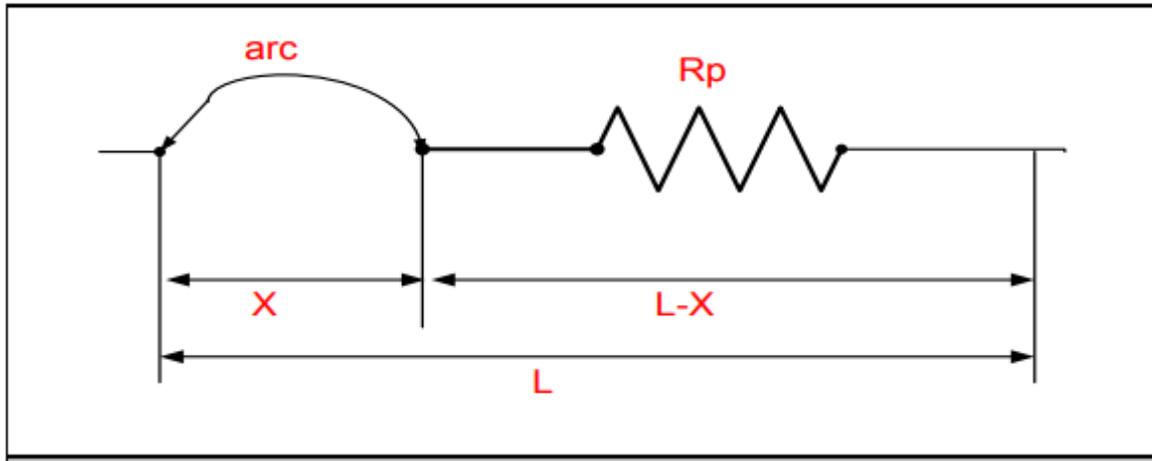
$$U_{arc} = \frac{A \cdot X}{I^n} \quad (II.1)$$

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

Les valeurs des paramètres et dépendent du milieu dans lequel s’amorce la décharge.

Selon l’auteur [21]  $0 \leq n \leq 1$  et  $0 \leq \text{et} \leq 500$ .

A partir de mesures expérimentales sur un canal d’électrolyte, Ghosh et Chatterjee [21] ont proposé de prendre des valeurs différentes pour et caractérisant l’équation de la décharge selon la nature de l’électrolyte utilisé.



**Figure II. 1:** Modèled’Obenaus

En effet, en appliquant la loi d’Ohm à ce circuit, on peut écrire:

$$V = V_e + V_{arc} + R_p(X)I \quad (\text{II.2})$$

Avec :

V : est la tension appliquée ;

$V_e$  : la chute de tension totale aux bornes des électrodes ; cette dernière dépend des Conditions expérimentales.

$R_p(X)$  : est la résistance de la couche polluée.

$V_{arc}$  : la tension d’arc telle que :

$$V_{arc} = R_{arc}(X)I \quad (\text{II.3})$$

$R_{arc}$  est la résistance d’arc par unité de longueur ;

I le courant qui traverse la couche polluée.

La décharge est caractérisée par la présence d’un champ électrique longitudinal  $E_a$ :

$$E_a = \frac{V_{arc}}{X} = A * I^{-n} \quad (\text{II.4})$$

$$V_{arc} = A * X * I^{-n} \quad (\text{II.5})$$

Ainsi, on obtient l’équation de la tension totale appliquée au système :

$$V = V_e + A * I^{-n} + R_p(X) * I \quad (\text{II.6})$$

Les valeurs des paramètres  $n$  et  $A$  dépendent du milieu dans lequel brûle la décharge.  
 $0.40 \leq n \leq 1$  et  $3 \leq A \leq 500$

**II.2.2 Modèle de Neumarker**

Apartir de l'approche d'Obenaus, Neumärker [40] a fait l'hypothèse supplémentaire d'une résistance de pollution uniforme par unité de longueur et a donc posé :  $R_p(X) = r_p(L - X)$  (II.7)

Où,  $L$  et  $r_p$  représentent respectivement la longueur de fuite totale et la résistance moyenne par unité de longueur.

En introduisant cette expression dans le modèle d'Obenaus, la tension  $V$  aux bornes de l'isolateur sera :

$$V = V_{arc} + r_p(L - X) I \tag{II.8}$$

Où encore:

$$V = N X I^n + r_p(L - X) I \tag{II.9}$$

L'hypothèse  $R_p(X) = r_p(L - X)$  étant faite en dérivant l'équation (II.9) par rapport à  $I$  et en remplaçant le courant  $I$  pour lequel  $dV/dI = 0$  dans l'équation (II.9) ; après avoir réarrangement il a établi que la tension continue minimale  $V_{cx}$  nécessaire pour entretenir l'arc sur une fraction  $X/L$  de la distance de fuite  $L$ , était liée aux paramètres fondamentaux par la relation :

$$\frac{n.N}{r_p} = \left[ \frac{V_{cx}}{(1+n)NL} \right]^{\frac{n+1}{n}} = \left( \frac{X}{L} \right)^{\frac{1}{n}} - \left( \frac{X}{L} \right)^{\frac{n+1}{n}} \tag{II.10}$$

En maximisant (2.9) par rapport à  $X$ , on obtient une relation où figure la tension critique

$$V_c : \frac{n.N}{r_p} = \left[ \frac{V_c}{(1+n)NL} \right]^{\frac{n+1}{n}} = \frac{n}{(n+1)^{\frac{n+1}{n}}} \tag{II.11}$$

Dont l'apparition a lieu pour une distance d'arc critique donnée par :

$$\frac{X_c}{L} = \frac{1}{n+1} \tag{II.12}$$

Neumärker a mis (II.10) sous la forme d'une distance de fuite relative critique qu'il est facile de ramener à :

$$\frac{L}{V_c} = \frac{1}{N^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n+1}}} \quad (\text{II.13})$$

En inversant cette expression, on obtient la contrainte critique étant égal à :

$$E_c = N^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{II.14})$$

Le courant critique  $I_c$  a été défini par Neumärker comme étant égal à :

$$I_c = \frac{1}{r_p} \frac{V_c}{L} \quad (\text{II.15})$$

Les résultats présentés ci-dessus concordent avec ceux qu'ont obtenu plus tard Alston et Zoledziowsky

### II.2.3 Modèles de Rizk

A partir d'une analyse théorique, Rizk a décrit le phénomène d'entretien de l'arc et le mécanisme de rupture diélectrique. Il a mis en évidence l'expression de la rigidité de l'espace résiduel et établit une relation entre la tension de contournement, la résistance de pollution linéique et la longueur de fuite  $L$  [21]. Cette relation peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{U_c}{L} = 23 \cdot r_p^{0.4} \quad (\text{II.16})$$

### II.2.4 Modèle de Claverie et Porcheron

Plusieurs modèles expérimentaux ont été proposés pour le cas d'une tension alternative. Le plus connu est celui de Claverie et Porcheron [25]. Ces auteurs ont montré que, pour un modèle d'isolateur plan (Figure II.2), la tension d'arc est de la forme :

$$U_{arc} = 100 \cdot \frac{X}{\sqrt{I}} \quad (\text{II.17})$$

Et la tension minimale d'entretien de l'arc :

$$U_{cx} = 800 \cdot \frac{X}{\sqrt{I}} \quad (\text{II.18})$$

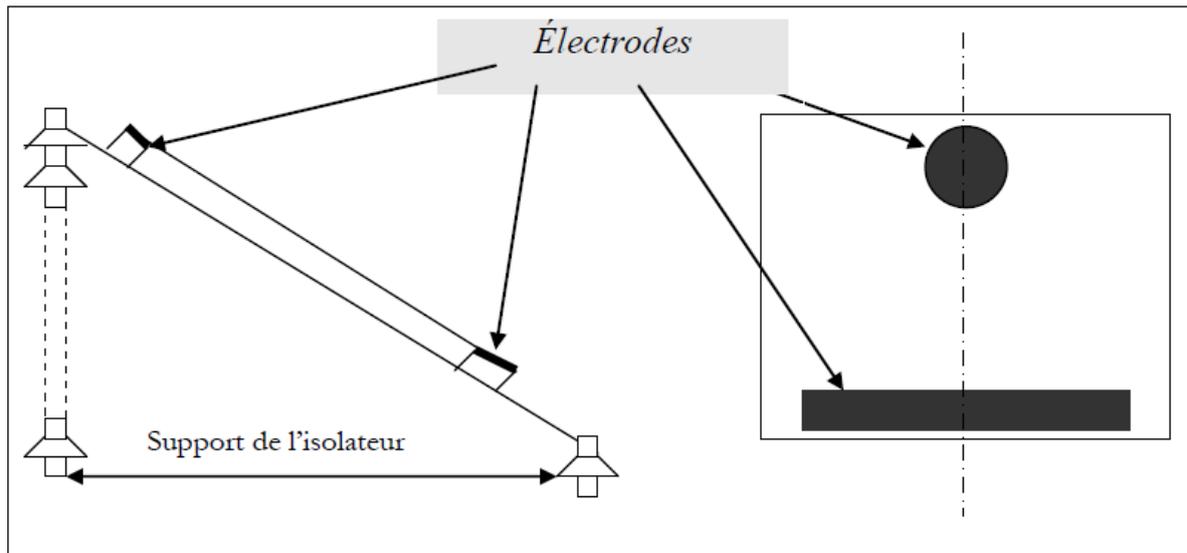


Figure II. 2: Modèle expérimental de Claverie et Porcher

### II.2.5 Modèle d'Alston et Zoledziowski

En tenant compte de l'hypothèse de Neumarker [27] et pour une tension d'application dépassant quelques kilovolts, Alston et Zoledziowski [28] ont déterminé la condition de maintien de l'arc électrique, dans le cas d'un isolateur cylindrique de longueur L (Figure II.3)

$$U_{cx} = (n + 1)(A.X)^{\frac{1}{n+1}} \left( \frac{r_p(L-X)}{n} \right)^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{II.19})$$

Avec

X: La longueur d'arc.

A et n : les constantes empiriques qui caractérisent l'état statique de l'arc.

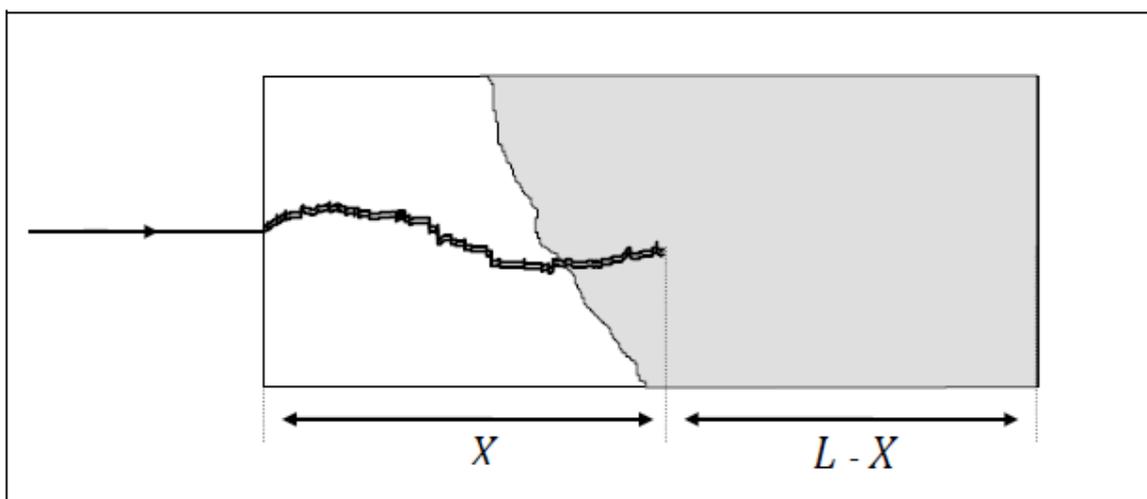


Figure II. 3: Modèle cylindrique utilisé par Alston et Zoledowski

II.2.6 Modèle de J. Danis

Ce modèle est constitué d'une plaque de verre isolante, de forme géométrique simple, munie de deux électrodes rectangulaires identiques et placées aux deux extrémités de la plaque ( Figure II.4.a.b.c) [20].

Dans le but de reproduire des couches similaires à celles observées sur les isolateurs pollués dans les conditions naturelles, J. Danis a considéré plus d'une zone sèche (Figure II.4.d.e). Ainsi l'auteur a abouti aux résultats suivants :

- L'arc électrique prend naissance dans les zones sèches et se déplace vers les zones humides. Cet arc commence d'une façon aléatoire le long de la zone sèche et aucune position n'est privilégiée par rapport à une autre.
- Dans le cas d'une alimentation continue, l'aspect de l'arc dépend de la polarité de l'électrode qui se trouve juste à proximité de l'arc (en cas de zone humide). Il semblerait que l'anode provoque un arc en forme de simple décharge lumineuse. La cathode, par contre, provoque un arc aux multiples ramifications fines. De plus, le développement de l'arc à proximité de la cathode est plus rapide que celui à proximité de l'anode.

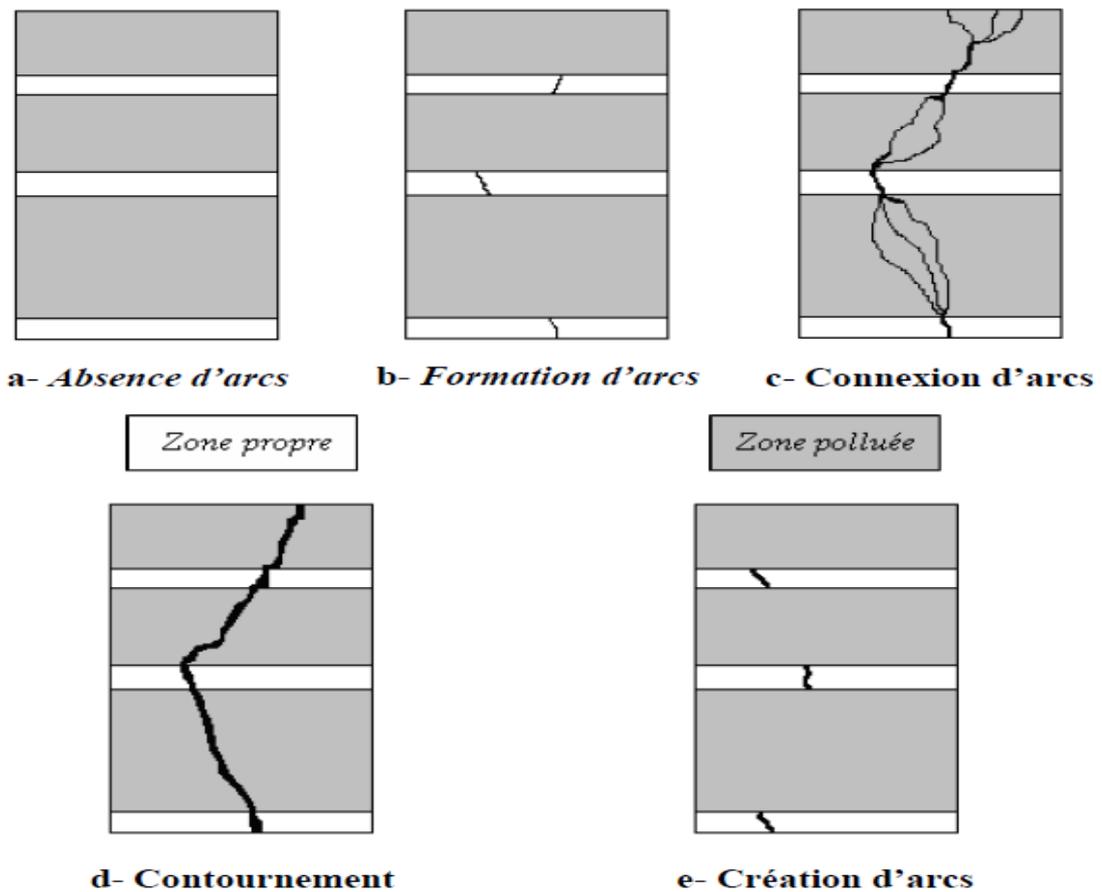


Figure II. 4: Modèle de Danis

### II.2.7 Modèle de A. Mekhaldi

A. Mekhaldi a utilisé un modèle plan et rectangulaire similaire à celui considéré par P. Claverie et Y. Porcheron [25]. Il s'intéresse surtout à l'évolution du courant de fuite ainsi que la longueur de l'arc électrique en fonction de la conductivité de la couche de pollution, du rayon de l'électrode de haute tension, de la distance inter- électrodes, de l'épaisseur de la couche de pollution et de la répartition discontinue de la couche de pollution. A partir de ces études, les résultats tirés sont les suivants :

- Le courant de fuite et la largeur de l'arc diminuent avec la distance inter-électrodes, augmentent avec le rayon de l'électrode circulaire, augmentent avec la conductivité et augmentent aussi avec l'épaisseur de la couche de pollution [28].

### II.2.8 Modèle du disque circulaire

Woodson et McElroy ont imaginé une configuration géométrique, illustrée à la figure (Figure II.5), qui représenterait de façon idéale la surface d'un isolateur à disque. Ils partaient de l'hypothèse que, de façon générale, la résistance superficielle de la couche de pollution humide, pour n'importe quelle position du point de départ de l'arc de rayon, peut s'exprimer par une fonction de la forme :

$$R_p = \frac{1}{\gamma} f(r_a, r_a, r_0) \quad (II.20)$$

Où est le rayon de l'électrode externe et la conductivité superficielle du polluant [29].

Si l'on néglige la dépendance de la fonction f vis-à-vis du rayon de l'arc rd, on obtient une expression encore plus simple ayant la forme :

$$R_p = \frac{c}{\gamma_s} f(r_0 - r_a)^m \quad (II.21)$$

Où est une constante trouve expérimentalement égale à 1.4 pour  $R_p = 1.6 \cdot 10^{-2} \Omega, m$  et est une constante. Ce modèle sous tension continue n'a pas donné de résultats satisfaisants. Cela a été imputé au non uniformité de la résistivité superficielle de l'isolateur.

**l'isolateur.**

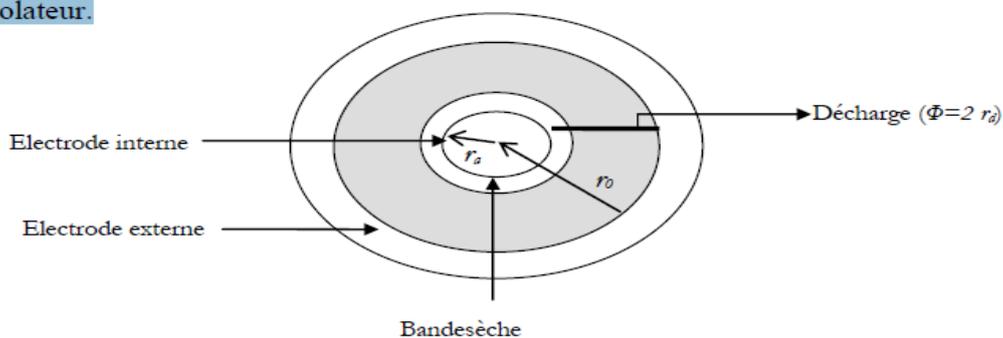


Figure II. 5: Model d'isolateur en forme de disque conçu par McElroy et Woodson

### II.2.9 Modèles de Tegar

#### A) Cas de pollution continue

Tegara élaboré un modèle statique en tension alternative [30]. Son modèle est basé sur celui d'Obenaus, et permet d'avoir les différentes caractéristiques concernant le Développement de l'arc électrique sur une surface isolante uniformément polluée.

En se basant sur l'équation du circuit et sur la condition limite de réamorçage [31,25], il a déterminé l'expression donnant la résistance de pollution en série avec l'arc, en fonction de la tension appliquée et le courant de fuite :

$$R_p = \frac{1}{\rho} \frac{k-100U}{K} \frac{U}{I} = \rho F_p \quad (\text{II.22})$$

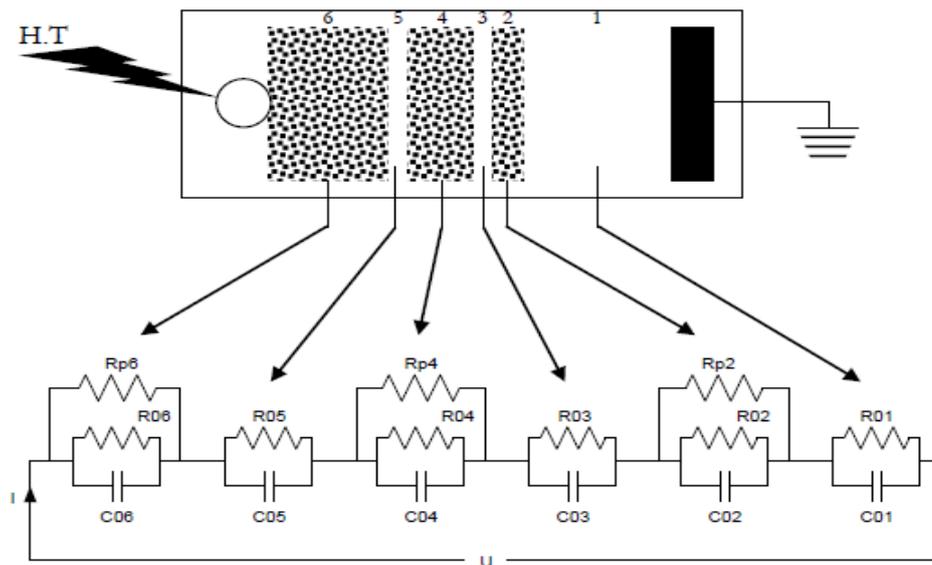
Où  $\rho$  représente la résistivité de la couche de pollution et la constante K de la caractéristique statique de l'arc.

Cette équation lui a permis d'évaluer la longueur critique de l'arc et par suite tous les paramètres caractérisant les phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes uniformément polluées.

Un modèle amélioré a été mis au point par Tegar [30] pour caractériser la propagation d'une décharge électrique sur des surfaces isolantes soumises à une pollution continue non uniforme.

#### B) Cas de pollution discontinue

Tegara élaboré un algorithme qui permet d'obtenir les différentes caractéristiques des phénomènes de conduction sur les surfaces isolantes sous pollution discontinue. Les bandes propres et polluées sont représentées par des circuits électriques. Les composants de ces circuits sont déterminés à partir des essais effectués sur la plaque propre et celle uniformément polluée [30]. Le courant de fuite critique et la tension de contournement sont calculés à partir de la connaissance de la tension de contournement obtenue expérimentalement dans le cas où les couches de la pollution discontinue sont remplacées par du papier aluminium.



**Figure II. 6:** Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire

La figure (Figure II.6) représente le circuit électrique équivalent au modèle de laboratoire sous pollution discontinue. Dans ce circuit, chaque bande  $i$  ( $i=1$  à  $6$ ) est constituée d'une résistance  $R_{oi}$  en parallèle avec une capacité  $C_{oi}$ . Pour chaque bande polluée  $i$  ( $i=2, 4, 6$ ), ces circuits sont shuntés par une résistance  $R_{pi}$  représentant la couche de pollution (peinture semi-conductrice à base de graphite).

Le fait que les couches polluantes possèdent des formes rectangulaires et selon la recommandation de la CEI 60-1 [32], l'expression de la résistance pour chaque bande polluée  $i$  peut être formulée par :

$$R_{pi} = R_{sp} \int_0^L \frac{dl}{b} = R_{sp} \frac{L_i}{b} = R_p f \frac{L_i}{b} \quad (\text{II.23})$$

Avec  $i=2, 4, 6$ , la résistance de la couche de pollution,  $dl$  élément de longueur,  $L_i$  la longueur de la pollution,  $b$  la largeur de la couche de pollution et  $f$  le facteur de forme.

Les résultats simulés concordent assez parfaitement avec ceux obtenus expérimentalement pour les grandes largeurs de couches polluantes.

### II.2.10 Modèle Dhahbi , Beroual et Krahenbul

Ces auteurs ont proposé un nouveau critère analytique de propagation de la décharge en faisant intervenir l'impédance équivalente  $Z_{eq}$  d'un circuit électrique (Figure II.7), simulant un isolateur pollué sur lequel une décharge s'est produite [14].

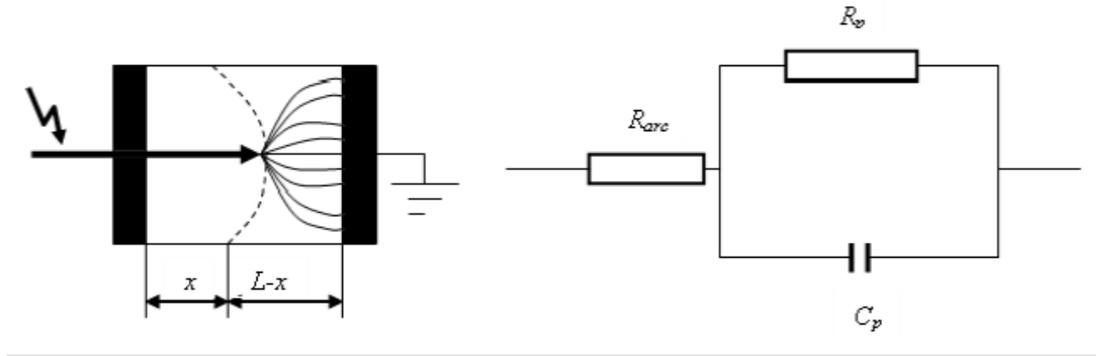


Figure II. 7: Modèle d'isolateur pollué avec son circuit équivalent

En utilisant la condition nécessaire à la propagation de l'arc, donnée par :

$$\frac{d|Z_{eq}|}{dx} \leq 0 \quad (\text{II.24})$$

Ces auteurs ont abouti à un critère qui est :

$$E_{arc} \geq \frac{E_p}{\sqrt{a}} \quad (\text{II.25})$$

Sous tension continue  $a=1$ , car

$$a = 1 + \omega^2 \rho_p^2 \varepsilon^2 \quad (\text{II.26})$$

Où

$\omega$  : La pulsation,

$\rho_p$  : La résistivité de la pollution,

$\varepsilon$  : La permittivité de la pollution.

### II.2.11 Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh

Ce modèle est constitué d'une électrode placée au-dessus d'une plaque isolante, à une distance variable  $s$ , considérée égale à la largeur de la zone sèche. Cette plaque est placée sur quatre colonnes uniformément polluées et situées à une distance  $l-s$  de la terre (Figure I.8). Une tension alternative de fréquence 50 Hz est alors appliquée au modèle.

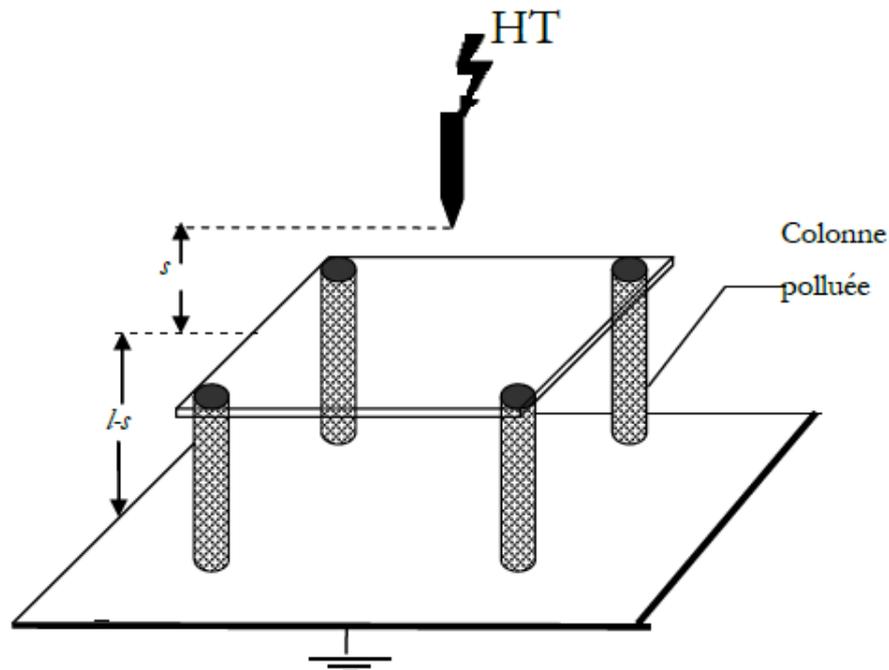


Figure II. 8: Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh

Les auteurs se sont alors intéressés à la variation de la tension de contournement en fonction de la largeur  $s$  de la zone sèche, pour plusieurs conductivités de la pollution appliquées aux colonnes.

Les auteurs ont donc abouti aux résultats suivants :

- La tension de contournement  $U_c$  en fonction de «  $s$  » atteint un minimum, correspondant à une largeur  $S_{min}$  qui se situe à environ 45-50% de la longueur totale, ce sont des courbes en forme de « V ».
- La tension de contournement, pour une même largeur de la zone sèche, diminue avec la conductivité des couches polluantes.
- La tension de contournement de l'ensemble zone sèche zone polluée semble être confondue avec celle de la zone polluée lorsque  $s < S_{min}$ , et avec celle de la zone sèche pour  $s > S_{min}$ .

Les auteurs ont conclu que :

- La tension de contournement de l'isolateur dépend du rapport des largeurs des zones sèche et polluée.
- Les courbes en forme de V des tensions de contournement totales montrent que cette dernière ne représente pas la somme des contournements partiels zone sèche-zone polluée.
- Le contournement total correspond à un des contournements partiels considérés, suivant le rapport entre les largeurs de la zone sèche et de la zone polluée.

- La rigidité diminue pour une plage précise de variation de la zone sèche. Cette plage devrait dépendre de la longueur critique d'arc, qui serait favorisée par des zones sèches préétablies.
- L'augmentation de la rigidité lorsque la largeur sèche préétablie devient supérieure à la largeur critique, où aucun arc stable ne peut être observé. Cette largeur critique dépendra du modèle utilisé [30].

### II.2.12 Modèle de D. Namane

Afin d'examiner le comportement des surfaces isolantes sous pollution discontinue, D.Namanea proposé un modèle plan rectangulaire (Figure II.9)[35]. Les différentes contraintes sous lesquelles est soumis son modèle de laboratoire sont: la discontinuité de la pollution en variant de manière régulière la largeur de la pollution, la position de la pollution par rapport aux électrodes ainsi que la conductivité de la couche polluante appliquée sur la plaque.

L'influence de ces contraintes sur le courant de fuite, sur la tension d'entretien de l'arc électrique et sur la tension de contournement ainsi que le processus de contournement, est alors examinée.

- Le courant de fuite est toujours plus élevé lorsque la couche polluante est du côté de l'électrode rectangulaire, mise à la terre. Ceci est dû au phénomène de la conduction dans la zone sèche et à l'effet de couronne. En effet, lorsque la zone sèche est de côté haute tension, le rayon de courbure de l'électrode circulaire provoque un champ électrique, vraisemblablement plus intense que celui de l'électrode rectangulaire, par conséquent, on obtient une augmentation du courant de fuite.

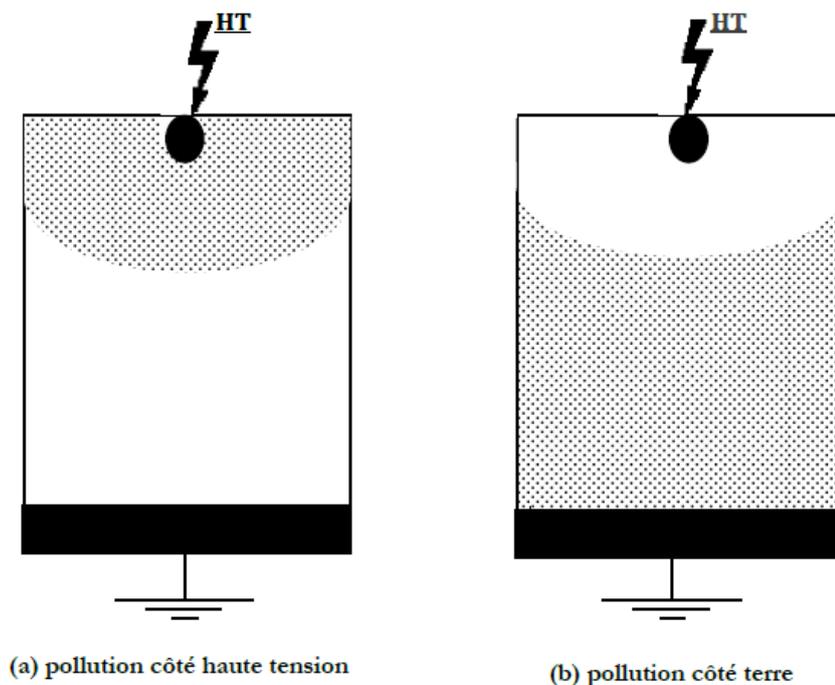


Figure II. 9: Modèle expérimental selon D.Namane

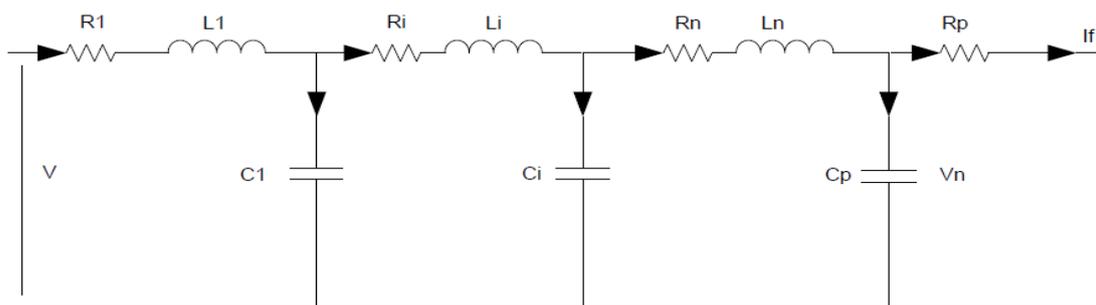
### II.2.12.1 Les principaux résultats qui ont été obtenus sont les suivants

- La position de la couche polluante vue des électrodes a peu d'influence sur la tension d'entretien de l'arc.
- La position de la pollution n'a apparemment pas d'influence sur la tension de contournement pour les conductivités utilisées.
- Une bonne corrélation a été constatée entre les résultats expérimentaux et le modèle empirique tant que la zone sèche garde les mêmes propriétés d'isolement [35]. Au-delà, le modèle théorique montre ses limites et ne convient plus puisque celui-ci ne tient pas compte de la variation de l'impédance de la zone sèche avec la tension reportée à ses bornes.

### II.2.13 Modèle de Dhahbi et Beroual

Ces deux chercheurs considèrent que la décharge peut être représentée par un schéma électrique équivalent comme l'indique la (Figure II.10). 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 II. 10:** Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge

$R_p$  : la résistance de la pollution,

$C_p$  : la capacité de la couche de pollution,

$R_i$  : la résistance de l'arc,

$C_i$  : la capacité de la décharge,

$L_i$  : l'inductance de la décharge.

Ce modèle permet de calculer la tension de contournement, le temps au contournement ainsi que certains paramètres caractérisant la propagation de la décharge électrique le long d'une surface isolante polluée [33]. Il utilise le critère d'impédance comme critère de propagation. Ainsi, ces auteurs ont trouvé que les effets de l'inductance du canal de la décharge sont négligeables, et que la forme d'onde de la tension appliquée a une influence directe sur les paramètres régissant le phénomène de contournement.

### II.2.14 Modèle de Wilkins

Celui-ci est constitué d'une électrode mise sous tension et située au-dessus d'un bac rempli d'eau additionnée de sel, permettant de simuler la zone polluée. La zone sèche étant considérée comme l'espace compris entre l'électrode et l'eau [35] (Figure II.11). Ce modèle est très utilisé pour étudier le critère de propagation de l'arc.

Tous ces modèles de laboratoire ont permis par la simplicité de leur configuration, d'examiner aisément l'influence de nombreux paramètres sur le comportement de l'isolateur (courant de fuite, contournement, tension d'entretien de l'arc, etc.).

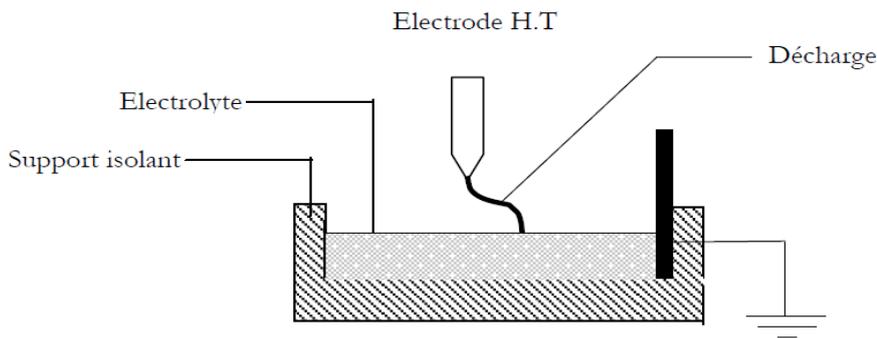


Figure II. 11: Modèle de Wilkins

## II.3 Conclusion

Les modèles mathématiques sont des outils qui permettent de faire des estimations préliminaires des contraintes critiques et des courants de fuite critiques sur des isolateurs pollués, ainsi que de rationaliser les expériences conçues pour explorer le mécanisme de contournement ; ils permettent aussi d'interpréter et de généraliser les résultats d'essais. Ils ne sont absolument pas destinés à se substituer aux essais, qui demeurent indispensables pour l'obtention des données.

Les expressions des tensions critiques et des courants critiques déduits des modèles si dessus, ne font intervenir que la conductivité électrique de la couche de contamination à la saturation et les principaux paramètres dimensionnels de l'isolateur, cela explique qu'elles ne rendent pas compte des aspects suivants [27] :

- Influence du type de sel et des constituants non solubles de couche ;
- Effet du mode d'application de la tension (montée progressive, tension constante, mise sous tension brusque), et effet de la polarité pour les essais en régime continu ;
- Influence de la méthode de mouillage sur le phénomène de contournement des isolateurs.

Afin de se rapprocher le plus possible de la réalité, il faudra entreprendre de nouveaux travaux de recherche dans les domaines suivants :

- Formation et développements d'arc multiples, en série et en parallèles sur les surfaces contaminées ;

- Etude des circonstances dans lesquelles le critère de propagation de l'arc peut devenir un facteur prépondérant, dans le phénomène de contournement des isolateurs contaminés en régime alternatif.
- Utilisation des modèles pour interpréter l'effet, sur le contournement des surfaces contaminées, des paramètres de la source d'alimentation mise en œuvre lors des essais.

Les modèles mathématiques proposés pour décrire le contournement des surfaces contaminées ont été développés en tenant compte de plusieurs hypothèses simplificatrices d'où leur limite et ce qui rend le traitement du phénomène par des modèles statistiques une alternative.

# Chapitre III

**Modèle statistique de régression,  
résultats d'essai et validation des  
modèles**

### III.1 Introduction

Dans le laboratoire de haute tension de l'université Abderrahmane Mira Bejaia, où notre étude expérimentale a été effectuée, existe un transformateur d'essais à fréquence industrielle 50 Hertz. Afin d'assurer un bon fonctionnement des équipements de haute tension, des essais diélectriques sont nécessaires.

Les essais effectués, au laboratoire de haute tension, concernent la mesure des tensions de contournement et le courant de fuite des modèles d'isolateur en silicone ces modèles d'isolateur sont issus de deux fabricants différents. Un premier lot de trois modèles d'isolateurs de couleur grise issu de 1<sup>er</sup> fabricant, et un deuxième lot de trois modèles d'isolateurs de couleur bleu issue d'un deuxième fabricant. En premier lieu nous sommes intéressés à la détermination de la tension de contournement et du courant de fuite de ces modèles d'isolateurs à l'état vierge et propre et sec puis sous pollution artificielles de différents degrés de sévérité de pollution.

Les mêmes essais sont reproduits après que les modèles d'isolateur ont subi des cycles de vieillissement de 190,530 et 630 heures d'exposition aux rayonnent UV.

Dans ce chapitre nous présentons aussi les équipements de la station d'essais. Nous présentons aussi les différents types d'essais, et le modèle opératoire utilisé pour les essais de haute tension ainsi que les procédés d'essai et le modèle statistique de régression que nous avons établi pour prédire la valeur de la tension alternative de contournement ainsi que celle du courant de fuite pour différentes valeurs de degré de sévérité de pollution et cycles d'exposition aux rayons ultraviolet. On utilise des isolateurs de formes rectangulaire pour différents temps d'exposition à la rayons UV. La validation du modèle est approuvée en comparant les prévisions théoriques de modèle statique aux mesures expérimentales obtenues en laboratoire, Finalement nous interprétons nos résultats.

La présence d'une couche électrolytique sur la surface de l'isolateurs il encore aucun modèle mathématique fiable capable de décrire suffisamment bien les caractéristiques de arcs et la tension de contournement cependant il est plus aisé de concevoir un modèle statistique sur la base la base des résultats précis obtenus au laboratoire. Les statistiques branchent des mathématiques qui a pour objet la collecte, les traitements et l'analyse des données numérique relatives à un ensemble d'objets.

Parmi les disciplines scientifiques aux qu'elles on a recours dans le fonctionnement des entreprises, le statistique occupe une place très importante dans la période contemporaine et constitue un outil précieux dans la gestion des entreprises ou encore l'aide à la décision.

Les statistiques sont un domaine très vaste nous nous intéressons à la prévision. Le problème de cette prévision est à évaluer les valeurs futures  $X_{T+h}$  ( $h > 1$ ) d'une variable à partir de ses valeurs passées  $X_t$ ,  $t=1, 2, \dots$ . Naturellement la valeur prévue ne sera pas exactement égale à la valeur qui sera émise par la série à  $t=T+h$  mais on essaiera toujours de l'avoir aussi proche possible

Cette approximation dépend de l'horizon (généralement meilleur quand est  $h$  petite) et de la façon dont évaluer la série (plus elle est régulière dans le temps plus la prévision est facile).

Malheureusement on n'a pas toujours la régularité de l'évolution des séries que on a étudié, alors une bonne analyse et indispensable pour l'optimalité de nos prévisions.

L'objectif général de la régression multiple et d'apprendre plus sur la relation entre plusieurs variable indépendante au prédictive et une variable dépendante aux critères.

Le but de procédure de régression et d'ajuster une droite sur des points, plus précisément le programme va calculer une droite de sorte que la somme des carrés des écarts entre les points observer et cette droite soyons minimisée. Cette droite appelée droit de régression, exprimer la meilleure prévision de la variable dépendante  $y$  et la variable indépendante  $X_i, i = 1, \dots, n$ .

### **III.2 Modèle statistique de la régression**

Il est fréquent de s'interroger sur la relation qui peut exister entre deux grandeurs en particulier dans les problèmes de prévision et d'estimation. On essaye alors de déterminer la relation statistique qui existe entre les deux grandeurs  $X$  et  $Y$ . Ce type d'analyse s'appelle analyse de régression. On ne considère que la variation de l'une des deux variables (par exemple  $X$ ) pour expliquer celle de l'autre (par exemple  $Y$ ). La méthode consiste à analyser l'influence des valeurs connues de  $X$  sur la distribution de la variable aléatoire  $Y$ .

La variable  $X$  est dite explicative ou indépendante et  $Y$  est dite variable expliquée ou dépendante. On a alors, du point de vue statistique, une relation de cause à effet. Le problème est d'identifier cette relation.

### **III.3 Définitions**

#### **III.3.1 Valeur observée**

Il s'agit de la valeur observée de la variable dépendante.

#### **III.3.2 Valeur prévue**

Il s'agit de la valeur prévue, étant donnée l'équation de régression courante.

#### **III.3.3 Valeur du résidu**

Il s'agit de la valeur observée moins la valeur prévue.

#### **III.3.4 Valeur prévue standard**

Il s'agit de la valeur prévue standardisée pour la variable dépendante.

#### **III.3.5 Valeur du résidu standard**

Il s'agit de la valeur du résidu standardisée (observée moins prévue divisée par la racine carrée de la moyenne des carrés des résidus).

#### **III.3.6 Erreur-type de la valeur prévue**

Il s'agit de l'erreur-type de la valeur prévue non standardisée.

#### **III.3.7 Résidu supprimé**

Le résidu supprimé est la valeur du résidu de l'observation respective, si elle n'avait pas été introduite dans l'analyse de la régression, c'est-à-dire si on excluait cette observation de tous les

calculs. Si le résidu supprimé diffère largement de la valeur du résidu standardisé respectif, l'observation est potentiellement un point aberrant puisque son exclusion a modifié l'équation de la régression.

### III.3.8 Distance de Cook

Il s'agit d'une autre mesure de l'impact de l'observation respective sur l'équation de la régression. Elle indique la différence entre les valeurs calculées de la régression et les valeurs qui seraient obtenues si l'observation respective avait été exclue. Toutes les distances doivent être du même ordre de grandeur ; si tel n'est pas le cas, il y a de bonnes raisons de penser que la ou les observations respectives ont biaisé l'estimation des coefficients de régression.

### III.3.9 Comment gérer les points atypiques

L'objectif de toutes ces statistiques est d'identifier les points atypiques (aberrants). Sachez particulièrement que pour de petits  $n$ , les estimations de la régression multiple ne sont pas très stables. En d'autres termes, une simple observation extrême peut largement peser sur les estimations finales. Par conséquent, il est toujours conseillé d'examiner ces statistiques, et de répéter des analyses cruciales, après mise à l'écart des points aberrants. Une autre alternative consiste à répéter l'analyse cruciale en utilisant la régression des écarts absolus au lieu des moindres carrés, et donc d'atténuer l'effet de ces points atypiques. L'estimation non-linéaire nous permet d'estimer ces modèles.

## III.4 Régression Linéaire Multiple

### III.4.1 Présentation du modèle

Afin de construire le modèle, on considère  $(k-1)$  variables explicatives indépendantes :  $x_1, x_2, \dots, x_{k-1}$ , à valeurs fixées, donc non aléatoires, et une variable dépendante aléatoire  $Y$  influencée par les  $(k-1)$  variables explicatives. Le modèle de régression linéaire multiple est donné par l'équation suivante :

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^{j=k-1} \beta_j x_j + u \quad (\text{III.1})$$

où :  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{k-1}$ , sont les paramètres inconnus du modèle, et  $u$  est une perturbation aléatoire.

Supposant que nous ayons  $n$  observations indépendantes  $y_1, y_2, \dots, y_n$  de la variable expliquée  $y$ , alors chaque observation est décrite par le modèle :

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^{j=k-1} \beta_j x_{ij} + u_i \text{ avec } i = 1, \dots, n \quad (\text{III.2})$$

### III.4.2 Estimation des paramètres par la méthode des moindres carrés

Le problème de la détermination des paramètres du modèle, appelés coefficients de régression, se ramène au problème de l'estimation statistique de paramètres inconnus. La méthode la plus utilisée dans ce cas est la méthode des moindres carrés.

Supposons que :  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_{k-1}$ , soient respectivement des estimateurs de :  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{k-1}$ .  
Posons :

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{j=1}^{j=k-1} \hat{\beta}_j x_{ij} \text{ avec } i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{III.3})$$

où  $\hat{y}_i$  est la valeur estimée de  $y_i$

Le principe de la méthode des moindres carrés consiste à trouver les paramètres  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_{k-1}$ , qui rendent minimum la somme des carrés des résidus :

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{III.4})$$

### III.4.2.1 Présentation matricielle du modèle

Afin de faciliter les calculs, nous utilisons la présentation matricielle du modèle. On représente en général les données sous forme d'un tableau à  $n$  lignes et  $k + 1$  colonnes, la première colonne constituant une matrice à une colonne représentant  $y$ , l'ensemble des  $k$  autres colonnes constituant une matrice  $X$  à  $n$  lignes et  $k$  colonnes [36].

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1\ k-1} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2\ k-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{n\ k-1} \end{pmatrix}, \quad \hat{\beta} = \begin{pmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_{k-1} \end{pmatrix}$$

Donc le modèle (IV.3) peut s'écrire sous la forme :  $\hat{y} = X \hat{\beta}$ .

### III.4.2.2 Estimation des paramètres du modèle

On définit le vecteur  $e$  des résidus :  $e = Y - X \hat{\beta}$ .

Pour calculer le vecteur  $\hat{\beta}$ , il suffira de minimiser la quantité  $e^T e$ , où  $e^T$  est la transposée du vecteur  $e$ .

$$\partial e^T e = (Y - X \hat{\beta})^T (Y - X \hat{\beta}) = (Y^T - \hat{\beta}^T X^T)(Y - X \hat{\beta})$$

$$\partial e^T e = Y^T Y - \hat{\beta}^T X^T Y - Y^T X \hat{\beta} + \hat{\beta}^T (X^T X) \hat{\beta} = Y^T Y - 2Y^T X \hat{\beta} + \hat{\beta}^T (X^T X) \hat{\beta}$$

Ainsi,

$$(\partial \partial e^T e) / (\partial \hat{\beta}) = 0 \Leftrightarrow -2X^T Y + 2X^T X \hat{\beta} = 0 \Leftrightarrow X^T Y = X^T X \hat{\beta}$$

$$\text{Ce qui donne : } \hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (\text{III.5})$$

Lorsqu'il n'y a qu'une seule variable explicative, la régression linéaire est dite simple.

Dans ce cas particulier les deux coefficients de la régression sont donnés par :

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad \hat{\beta}_1 = S_{xy} / S_{xx}$$

Avec :

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2 \quad (\text{III.6})$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y} \quad (\text{III.7})$$

### III.4.3 Les hypothèses du modèle de régression linéaire multiple

#### III.4.3.1 Hypothèses probabilistes

Afin d'estimer les paramètres de l'équation de régression, aucune hypothèse sur les distributions des perturbations aléatoires n'est requise. Cependant, dans la suite une distribution devra être spécifiée.

On suppose que les perturbations aléatoires  $u_1, u_2, \dots, u_n$ , sont indépendantes, de la loi normale, d'espérance nulle et de variance finie [37] :

- $E(u) = 0$
- $Var(u) = \sigma^2 I_n$

Où  $I_n$  est la matrice identité de dimension  $n$ , ceci revient à dire que :

$$\begin{pmatrix} E(u_1) \\ E(u_2) \\ \vdots \\ E(u_n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{pmatrix} Var(u_1) & Cov(u_1, u_2) & \dots & Cov(u_1, u_n) \\ Cov(u_2, u_1) & Var(u_2) & \dots & Cov(u_2, u_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Cov(u_n, u_1) & Cov(u_n, u_2) \dots & & Var(u_n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma^2 \end{pmatrix}$$

Notant que ces hypothèses reviennent également à dire que le vecteur aléatoire  $y$  suit une loi multinormale avec :

$$E(y) = X\beta, \quad Var(y) = \sigma^2 I_n \tag{III.8}$$

A ces hypothèses, on ajoute le fait que les  $x$  soient observés sans erreur et l'erreur de mesure  $u_i$  est indépendante de  $y_i$ .

#### III.4.3.2 Test des hypothèses probabilistes

##### III.4.3.2.1 Test de la variance des erreurs

Pour vérifier si la variance de l'erreur est constante, on trace les résidus en fonction des valeurs ajustées. Les erreurs auront une variance constante si les résidus sont distribués d'une façon aléatoire autour de zéro. Si les résidus augmentent ou diminuent en fonction des valeurs ajustées, les erreurs peuvent ne pas avoir une variance constante [38].

##### III.4.3.2.2 Test de normalité (Q-Q Plot et Droite de Henry)

Le quantile-quantile plot (Q-Q plot) est une technique graphique qui permet de comparer les distributions de deux ensembles de données. Les échantillons ne sont pas forcément de même taille. Il se peut également qu'un des ensembles de données soit généré à partir d'une loi de probabilité qui sert de référentiel.

Pour réaliser cette droite, il s'agit :

1. De trier les données de manière croissante pour former la série  $e(i)$ .
2. A chaque valeur  $e(i)$ , nous associons la fonction de répartition empirique :

$$F_i = (i - 0,375)/(n + 0,25) \quad (\text{III.9})$$

3. Nous calculons les quantiles successifs  $Z(i)$  d'ordre  $F_i$  en utilisant l'inverse de la loi normale centrée et réduite.

4. Enfin, les données initiales n'étant pas centrées et réduites, nous dénormalisons les données en appliquant la transformation :

$$e^*(i) = Z(i) * S + \bar{e} \quad (\text{III.10})$$

où :  $S$  est l'écart type résiduel, c'est la racine carrée de la variance résiduel et  $\bar{e}$  c'est la valeur moyenne de  $e$ .

La variance résiduelle est donnée par :

$$S^2 = (\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2)/(n - k) \quad (\text{III.11})$$

Si les données sont compatibles avec la loi normale, les points  $(e(i), e^*(i))$  forment une droite, dite droite de Henry alignés sur la diagonale principale.

### III.4.3.2.3 Test de corrélation entre les erreurs

#### III.4.3.2.3.1 Tracé des résidus standardisés en fonction de leur ordre

Pour vérifier s'il existe une corrélation entre les erreurs, on trace les résidus en fonction de leurs ordres, on dit qu'il y a corrélation entre les erreurs si les résidus ne sont pas distribués d'une façon aléatoire, c'est-à-dire qu'ils auront une tendance d'augmenter ou diminuer.

#### III.4.3.2.3.2 Le test de Durbin-Watson

La statistique de Durbin-Watson est liée de près au coefficient d'auto corrélation de premier ordre des  $e_i$  de l'échantillon. Elle est désignée indifféremment dans la littérature par  $d$  ou  $DW$  et est définie par [39] :

$$d = \sum_{i=1}^n (e_i - e_{i-1})^2 / \sum_{i=1}^n (e_i)^2 \quad (\text{III.12})$$

La statistique  $d$  est compris dans l'intervalle allant de 0 à 4 de la façon suivante :

$d < 2$  Pour une auto-corrélation positive des  $e_i$

$d > 2$  Pour une auto-corrélation négative des  $e_i$

$d \approx 2$  Pour une auto-corrélation nulle des  $e_i$

### III.4.4 Tests de signification pour les paramètres estimés

Si nous voulons tester la signification statistique d'une estimation d'un paramètre  $\beta_j (j = 0, \dots, k - 1)$  dans la régression linéaire multiple, nous devons déterminer sa variance  $Var(\hat{\beta}_j)$ .

La matrice variance-covariance estimée du vecteur  $\hat{\beta}$  est donnée par :

$$\widehat{Var}(\hat{\beta}) = S^2(\hat{X}X)^{-1} \quad (\text{III.13})$$

La variance du paramètre  $\hat{\beta}_j$  est le  $j$ -ième élément diagonal de la matrice  $\widehat{Var}(\hat{\beta})$ .

Soit l'hypothèse ( $H_0$ ) suivante :  $\beta_j = 0 (j = 1, \dots, k - 1)$ , on fait ici l'hypothèse que la variable  $x_j$  n'a pas d'influence sur  $y$ . Ce type de test est très courant et on dit qu'il porte sur le caractère significatif, ou pas, d'une variable explicative [37]. On peut aussi tester la signification du paramètre  $\beta_0$  sous cette hypothèse. L'hypothèse ( $H_0$ ) est dite nulle, l'hypothèse alternative sera ( $H_1$ ) :  $\beta_j \neq 0$ .

Pour chaque paramètre  $\beta_j (j = 1, \dots, k - 1)$ , on définit la statistique :

$$t_j = (\hat{\beta}_j - \beta_j) / S_{\hat{\beta}_j} \quad (\text{III.14})$$

Avec  $S_{\hat{\beta}_j}$  est l'écart type empirique de  $\hat{\beta}_j$  :

$$S_{\hat{\beta}_j} = \sqrt{Var(\hat{\beta}_j)} \quad (\text{III.15})$$

Le quotient  $t_j$  est distribué selon une loi de Student à  $(n - k)$  degrés de liberté. Sous l'hypothèse  $H_0$ . Nous avons :

$$t_j = \hat{\beta}_j / S_{\hat{\beta}_j} \rightarrow t(n - k) \quad (\text{III.16})$$

La règle de décision est :

$|t| \leq t_{\frac{\alpha}{2}}$ : l'hypothèse  $H_0$  est acceptée et donc le paramètre  $\beta_j$  n'est pas statistiquement significatif.

$|t| > t_{\frac{\alpha}{2}}$ : l'hypothèse  $H_0$  est rejetée et  $H_1$  est acceptée et donc le paramètre  $\beta_j$  est statistiquement significatif.

$t_{\frac{\alpha}{2}}$  : est la valeur de loi de Student  $t(n - k)$  à un risque  $\alpha$ .

On peut calculer la probabilité :

$$P\left(t_{\frac{\alpha}{2}} > |t|\right) = P \quad (\text{III.17})$$

Si cette probabilité est suffisamment faible ( $P < \alpha$ ) on rejette l'hypothèse  $H_0$  alors qu'elle est vérifiée car le risque d'erreur de rejeter  $H_0$  est très faible. Si non l'hypothèse  $H_0$  est acceptée car le risque d'erreur de rejeter  $H_0$ , alors qu'elle est vraie, est trop important.

On peut déterminer un intervalle de confiance de  $(1 - \alpha)100\%$  pour  $\beta_j$  à l'aide de l'expression :

$$I_c(\beta_j) = \left[ \hat{\beta}_j - S_{\hat{\beta}_j} t_{\frac{\alpha}{2}}, \hat{\beta}_j + S_{\hat{\beta}_j} t_{\frac{\alpha}{2}} \right] \quad (\text{III.18})$$

Dans le cas d'une régression linéaire simple, ce test se limite à deux paramètres  $\beta_0$  et  $\beta_1$ . Une estimation non biaisée des variances de  $\hat{\beta}_0$  et de  $\hat{\beta}_1$  est de la forme [40] :

$$Var(\hat{\beta}_1) = \frac{S^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{III.19})$$

$$Var(\hat{\beta}_0) = S^2 \left( \frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right) \quad (\text{III.20})$$

Notons que tester  $\beta_0 = 0$  revient à tester si la droite de régression passe par l'origine. Et accepter  $H_0$  pour le paramètre  $\beta_1$  revient à admettre que la variable  $x$  n'a pas d'influence sur  $y$ .

### III.4.5 Analyse de la variance

#### III.4.5.1 Décomposition de la variance

On décompose la somme totale des carrés des écarts à la moyenne en une somme des carrés due à la régression et une somme des carrés due à l'erreur.

Les quantités seront désignées par l'abréviation la plus répandue dans la littérature en langue anglaise. Les deux premières lettres de chaque abréviation seront SS pour désigner la somme des carrés (Sum of Squares).

La somme des carrés due à la régression est donnée par :

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{III.21})$$

La somme des carrés due à l'erreur est donnée par :

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{III.22})$$

La somme totale des carrés est donnée par :

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (\text{III.23})$$

$$\text{On montre que : } SST = SSR + SSE \quad (\text{II.24})$$

On résume cette décomposition par un tableau appelé "tableau ANOVA" (Tableau III.1)

Source de variation	Degré de liberté	Somme des carrés	Somme pondérée des carrés
Régression	$k - 1$	$SSR$	$MSR = SSR / (k - 1)$
Erreur	$n - k$	$SSE$	$MSE = SSE / (n - k)$
Totale	$n - 1$	$SST$	$MST = SST / (n - 1)$

Tableau III. 1: ANOVA élémentaire

Pour tenir compte de la répétition, on peut décomposer d'avantage la somme des carrés due à l'erreur. Notons d'abord que pour chacune des observations, les variables explicatives prennent diverses valeurs. Il peut parfois arriver que pour une ou plusieurs observations données, les valeurs de ces variables soient tout à fait identiques. Dans ce cas, on dit qu'il existe des répétitions.

On place dans le même bloc, les valeurs de la variable expliquée pour lesquelles les valeurs des variables explicatives sont identiques.

On aura donc :

$$\begin{cases} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n_1} & \text{dans le premier bloc contenant } n_1 \text{ observations,} \\ y_{21} & y_{21} & \dots & y_{2n_2} & \text{dans le deuxième bloc contenant } n_2 \text{ observations,} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ y_{l1} & y_{l2} & \dots & y_{ln_l} & \text{dans le } i^{\text{ième}} \text{ bloc contenant } n \text{ observations,} \end{cases}$$

On note par  $\bar{Y}_i$  la moyenne dans le  $i^{\text{ième}}$  bloc :  $\bar{Y}_i = (\sum_{j=1}^{n_i} y_{ij})/n_i$  (III.25)

On remarque que l'estimateur est le même pour chaque observation dans un bloc donné ( $\hat{y}_{ij} = \hat{y}_i$ ), on a donc :

$$y_{ij} - \hat{y}_{ij} = (y_{ij} - \bar{Y}_i) + (\bar{Y}_i - \hat{y}_{ij}) = (y_{ij} - \bar{Y}_i) + (\bar{Y}_i - \hat{y}_i)$$

On obtient alors :

$$SSE = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2 = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{n_i} ((y_{ij} - \bar{Y}_i) + (\bar{Y}_i - \hat{y}_i))^2$$

D'où  $SSE = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 + \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{n_i} (\bar{Y}_i - \hat{y}_i)^2$  puisque le terme issu du produit croisé s'annule.

On a donc :

$$SSE = SSPE + SSLF \tag{III.26}$$

où :  $\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{Y}_i)^2$  (III.27)

est la somme des carrés des erreurs pures (Pure Error Sum of Squares),

et  $SSLF = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{n_i} (\bar{Y}_i - \hat{y}_i)^2$  (III.28)

est la somme des carrés due au manque d'ajustement (Lack of Fit Sum of Squares),

On peut alors présenter le tableau ANOVA en tenant compte de la décomposition de la variance due à l'erreur (Tableau. III.2).

Source de variation	Degré de liberté	Somme des carrés	Somme pondérée des carrés
Régression	$k - 1$	$SSR$	$MSR = SSR/(k - 1)$
Erreur	$n - k$	$SSE$	$MSE = SSE/(n - k)$
Manque d'ajustement	$I - k$	$SSLF$	$MSLF = SSLF/(I - k)$
Erreur pure	$n - I$	$SSPE$	$MSPE = SSPE/(n - I)$
Totale	$n - 1$	$SST$	$MST = SST/(n - 1)$

**Tableau III. 2 :** ANOVA avec décomposition de la variance due à l'erreur

### III.4.5.2 Tests de signification de la régression

Pour tester si la régression est statistiquement significative, on pose une hypothèse nulle ( $H_0 : \beta_j = 0, (j = 1, \dots, k - 1)$ ) qui consiste à demander si le modèle est suffisant à expliquer la variable dépendante, et l'hypothèse alternative sera :  $H_1 : les \beta_j, (j = 1, \dots, k - 1)$  ne sont pas tous nuls.

On considère le quotient des quantités  $MSR$  et  $MSE$  qui sous  $H_0$  suit une loi de Fisher  $F(k - 1, n - k)$ . Soit  $F_\alpha(k - 1, n - k)$  le quantile d'ordre  $(1 - \alpha)$ , alors si  $F_{calculé} = (MSR/MSE) > F_\alpha(k - 1, n - k)$ , alors l'hypothèse  $H_0$  est rejetée au risque d'erreur  $\alpha$  et l'hypothèse  $H_1$  est acceptée et on vient donc à la conclusion que la régression est statistiquement significative. Si la valeur de  $F$  calculée est inférieure à la valeur seuil  $F_\alpha(F_{calculé} \leq F_\alpha(k - 1, n - k))$ , alors l'hypothèse  $H_0$  ne peut être rejetée.

Notons que pour un nombre donné de paramètres, moins on dispose d'observations, plus il est difficile de vérifier si la régression est statistiquement significative [37].

Le choix du risque  $\alpha$  est lié aux conséquences pratiques de la décision : si les conséquences sont graves, on choisira  $\alpha = 1\%$  ou  $1\%$  mais si le débat est plutôt académique, le traditionnel  $\alpha = 5\%$  fera le plus souvent l'affaire [41].

La deuxième règle de décision consiste à évaluer la probabilité  $\alpha_{évalué}$  tel que

$P(F_\alpha(k - 1, n - k) > F_{calculé} = (MSR/MSE)) = \alpha_{évalué}$ , si  $\alpha_{évalué}$  est supérieur à  $\alpha_{choisi}$  ( $\alpha_{évalué} \geq \alpha_{choisi} = 0.05$ ), l'hypothèse  $H_0$  est acceptée car le risque d'erreur de rejeter  $H_0$ , alors qu'elle est vraie, est trop important. Si  $\alpha_{évalué}$  est inférieur à  $\alpha_{choisi}$  ( $\alpha_{évalué} < \alpha_{choisi} = 0.05$ ), l'hypothèse  $H_0$  est rejetée car le risque d'erreur de rejeter  $H_0$  alors qu'elle est vraie est très faible.

Un autre test consiste à vérifier si le manque d'ajustement n'est pas significatif, en utilisant le rapport  $(MSLF/MSPE)$  qui, sous l'hypothèse  $H_0$  (manque d'ajustement), suit une loi de Fisher  $F(I - k, n - I)$ .

### III.4.6 Prédiction avec les modèles de régression linéaire multiple

Une fois le modèle de régression est jugé fiable, et que le phénomène étudié ne subit pas un changement de structure dans les intervalles inconnus, on peut utiliser ce modèle pour faire des prévisions.

Supposons que l'on s'intéresse à un vecteur de valeurs particulières des variables explicatives :

$$\hat{C} = [x_{h1}, x_{h2}, \dots, x_{hk-1}]$$

Nous cherchons à prédire la valeur de  $y$  conditionnellement à  $C$ . Toute prévision de ce genre est basée sur l'hypothèse que le modèle estimé est toujours valable pour la période des prévisions. La prévision ponctuelle est obtenue en insérant les valeurs données de  $x$  dans la régression, ce qui donne la prévision :

$$\hat{y}_h = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{h1} + \hat{\beta}_2 x_{h2} + \dots + \hat{\beta}_{k-1} x_{hk-1} = \hat{C} \hat{\beta}$$

#### III.4.6.1 Intervalle de confiance de la valeur moyenne de $y$

On sait que la valeur  $\hat{y}_h$  est une estimation de la valeur  $E(y_h)$ , et si on suppose que le terme de perturbation suit une loi normale, et en remplaçant le paramètre inconnu  $\sigma^2$  de  $Var(\hat{\beta})$  par son estimateur  $S^2$ , il s'ensuit que :

$$\frac{\hat{y}_h - E(y_h)}{\sqrt{Var(\hat{y}_h)}} = \frac{\hat{C}\hat{\beta} - C\beta}{S\sqrt{\hat{C}(\hat{X}\hat{X})^{-1}C}} \rightarrow t(n - k)$$

$$\text{Avec : } Var(\hat{y}_h) = Var(\hat{C}\hat{\beta}) = \hat{C}Var(\hat{\beta})C = S^2\hat{C}(\hat{X}\hat{X})^{-1}C$$

Donc on peut définir l'intervalle de confiance à  $(1 - \alpha)100\%$  pour  $E(y_h)$  par :

$$\hat{y}_h \pm t_{\frac{\alpha}{2}} S \sqrt{\hat{C}(\hat{X}\hat{X})^{-1}C} \tag{III.29}$$

Dans le cas d'une régression linéaire simple, la valeur moyenne de  $y_n$  est simplement donnée par :

$$E(y_h) = \beta_0 + \beta_1 x_h$$

Et l'intervalle de confiance à  $(1 - \alpha)100\%$  pour  $E(y_h)$  par :

$$\hat{y}_h \pm t_{\frac{\alpha}{2}} S \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_h - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \tag{III.30}$$

#### III.4.6.2 Intervalle de prévision pour $y$

Comme précédemment, nous avons  $\hat{y}_h = \hat{C}\hat{\beta}$  et maintenant  $y_h = \hat{C}\hat{\beta} + u_h$ , l'erreur de prévision est donnée par :

$$e_h = y_h - \hat{y}_h = u_h - \hat{C}(\hat{\beta} - \beta) \tag{III.31}$$

La variance de l'erreur de prédiction est donnée par :

$$Var(e_h) = \sigma^2(1 + \hat{C}(\hat{X}\hat{X})^{-1}C) \tag{III.32}$$

D'où la statistique :

$$\frac{\hat{y}_h - y_h}{S\sqrt{1 + \hat{C}(\hat{X}\hat{X})^{-1}C}} \rightarrow t(n - k) \quad (\text{III.33})$$

L'intervalle de prévision à  $(1 - \alpha)100\%$  pour  $y_h$  est :

$$\hat{y}_h \pm t_{\frac{\alpha}{2}} S \sqrt{1 + \hat{C}(\hat{X}\hat{X})^{-1}C} \quad (\text{III.34})$$

Dans le cas d'une régression linéaire simple l'intervalle de prévision à  $(1 - \alpha)100\%$  pour  $y_h$  est donnée par :

$$\hat{y}_h \pm t_{\frac{\alpha}{2}} S \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_h - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}\right)} \quad (\text{III.35})$$

### III.4.7 Coefficient de détermination ( $R^2$ )

Le coefficient de détermination représente la proportion de la variation totale par rapport à la moyenne qui est expliquée par la régression [37,42].

Les bornes du critère sont 0 et 1 ; une valeur de 1 signifie que la régression explique toute la variation des différentes valeurs prises par la variable dépendante et une valeur de 0 signifie qu'aucune variation n'est expliquée.

#### III.4.7.1 Définition

Sans aucune information sur la variable indépendante, la meilleure prédiction pour une valeur future de la variable dépendante est la moyenne des  $n$  observations dont on dispose [118].

Pour une valeur actuelle donnée  $y_i$ , l'erreur commise en utilisant la moyenne  $\bar{y}$  comme prédicteur est simplement  $y_i - \bar{y}$ . Une mesure de la variation totale sera donnée par :

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

En exploitant l'information sur la variable indépendante, le meilleur estimateur d'une valeur future  $y_i$  est  $\hat{y}_i$ . La variation sur  $y$  qui subsiste après l'ajustement de l'équation de régression est donnée par :

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

La proportion de la variation qui n'est pas expliquée par la régression est donnée par  $SSE/SST$ . Ainsi la proportion de la variation totale (par rapport à  $\bar{y}$ ) qui est expliquée par la régression est donnée par:

$$R^2 = 1 - SSE/SST = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{III.36})$$

Rappelons qu'au sens des moindres carrés, on vise à minimiser  $SSE$ . Ainsi cette dernière expression, où  $SSE$  est affectée d'un signe négatif, suggère de choisir un modèle ayant un coefficient le plus élevé possible, soit des valeurs proches de 1. Ceci va de pair avec l'idée

voulant qu'une bonne régression explique le plus possible la variabilité des différentes valeurs prises par la variable dépendante  $y$  [37,43,44].

### III.4.7.2 Propriété

On peut tester si la régression est statistiquement significative à partir de la valeur observée du coefficient de détermination  $R^2$ , pour cela il faut établir une relation entre la statistique  $F$  et  $R^2$  sous l'hypothèse  $H_0: \beta_j = 0, (j = 1, \dots, k - 1)$ .

On a :

$$F = \frac{MSR}{MSE} = \frac{(SST - SSE)/(k-1)}{SSE/(n-k)} = \frac{(n-k)}{(k-1)} \left( \frac{SST}{SSE} - 1 \right) = \frac{(n-k)}{(k-1)} \left( \frac{1}{1-R^2} - 1 \right)$$

D'où

$$R^2 = (k - 1)F / ((k - 1)F + (n - k)) \quad (III.37)$$

On remarque que cette quantité est une fonction croissante en  $F$ . La régression est statistiquement significative au niveau  $\alpha$  si :

$$R^2 > (k - 1) F_\alpha(k - 1, n - k) / ((k - 1) F_\alpha(k - 1, n - k) + (n - k)) \quad (III.38)$$

### III.4.7.3 Coefficient de détermination ajusté ( $R^2$ (ajusté))

On définit le coefficient de détermination ajusté qui tient compte de la diminution du nombre de degrés de liberté due à l'introduction de nouvelles variables indépendantes [39,44].

$$R^2(\text{ajusté}) = 1 - (SSE/(n - k)) / (SST/(n - 1)) \quad (III.39)$$

Il est utile pour comparer les estimations de modèles différents les uns des autres par l'addition ou la suppression de variables explicatives.

### III.4.8 Le critère PRESS

Le critère PRESS (Predicted Residual Sum of Squares) exploite l'idée de calculer une somme de carrés afin de choisir une équation fournissant les meilleures prédictions. Dans un monde sans contrainte, on considérerait deux échantillons indépendants, un premier pour calculer les paramètres du modèle et l'autre pour valider la qualité des prédictions générées par le modèle. Pour ce, il suffit d'étudier, pour chacune des observations de l'échantillon de validation, les écarts entre les  $y_i$  observés et ceux calculés par le modèle. Comme, dans la majorité des cas, on ne peut s'offrir le "luxe" d'un deuxième échantillon, le critère *PRESS* offre une alternative intéressante [37].

Soit  $n$  le nombre total d'observations, on débute en ignorant la première observation et on établit la régression sur les  $n - 1$  observations restantes. On trouve alors  $\hat{y}_1$  un prédicteur de  $y_1$ . On poursuit en calculant  $\hat{y}_2$  un prédicteur de  $y_2$  en ignorant la deuxième observation et on établit encore une fois la régression à l'aide des  $n - 1$  observations restantes.

On répète le processus jusqu'à ce que l'on ait tous les prédicteurs  $\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n$ . On pourra alors évaluer la somme de carrés suivante :

$$PRESS = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \tag{III.40}$$

Ce critère permet de comparer la capacité prédictive de deux modèles. On cherche un modèle qui possède une valeur de *PRESS* la plus petite possible.

### III.4.9 Linéarisation des modèles

En pratique, la dispersion des points suggère souvent des relations non linéaires entre les variables. Certains types peuvent être transformés en fonctions linéaires, ceci permet d'utiliser encore la méthode des moindres carrés ordinaires. On donne les fonctions les plus courantes et leurs transformations (Tableau III.3).

Modèle	Fonction	Transformation	Fonction linéaire
Log linéaire	$y = b x^a$	$\hat{y} = \log(y)$	$\hat{y} = \hat{b} + a \hat{x}$ $\hat{b} = \log(b), \hat{x} = \log(x)$
Exponentiel	$y = e^{ax+b}$	$\hat{y} = \log(y)$	$\hat{y} = b + ax$
Logarithmique	$y = a \log(x) + b$	$\hat{x} = \log(x)$	$y = b + a\hat{x}$
Inverse	$y = b + \frac{a}{x}$	$\hat{x} = \frac{1}{x}$	$y = b + a\hat{x}$

**Tableau III. 3:** Formes fonctionnelles et leurs transformations linéaires

### III.4.10 Résumé de l'analyse de régression

On convient de représenter les résultats statistiques de l'analyse de régression par le tableau suivant :

L'équation de la régression : $y = f(x)$					
Paramètre	Estimation	Erreur standard	Limite Inf.	Limite Sup.	P
$\beta_j$	$\hat{\beta}_j$	$S_{\hat{\beta}_j}$	$\hat{\beta}_j - S_{\hat{\beta}_j} t_{\frac{\alpha}{2}}$	$\hat{\beta}_j + S_{\hat{\beta}_j} t_{\frac{\alpha}{2}}$	$P(t_{\frac{\alpha}{2}} >  t )$
<i>S</i>		$R^2(\%)$	$R^2(\text{ajusté})(\%)$		<i>PRESS</i>

Analyse de la variance :

Source	<i>DF</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Régression	$k - 1$	<i>SSR</i>	<i>MSR</i>	$MSR/MSE$	$P(F_{\alpha} > F)$
Erreur	$n - k$	<i>SSE</i>	<i>MSE</i>		
Manque d'ajustement	$I - k$	<i>SSLF</i>	<i>MSLF</i>	$MSLF/MSPE$	$P(F_{\alpha} > F)$
Erreur pure	$n - I$	<i>SSPE</i>	<i>MSPE</i>		
Totale	$n - 1$	<i>SST</i>			

**Tableau III. 4:** Résultats statistiques de l'analyse de régression

### III.5 Partie expérimentale

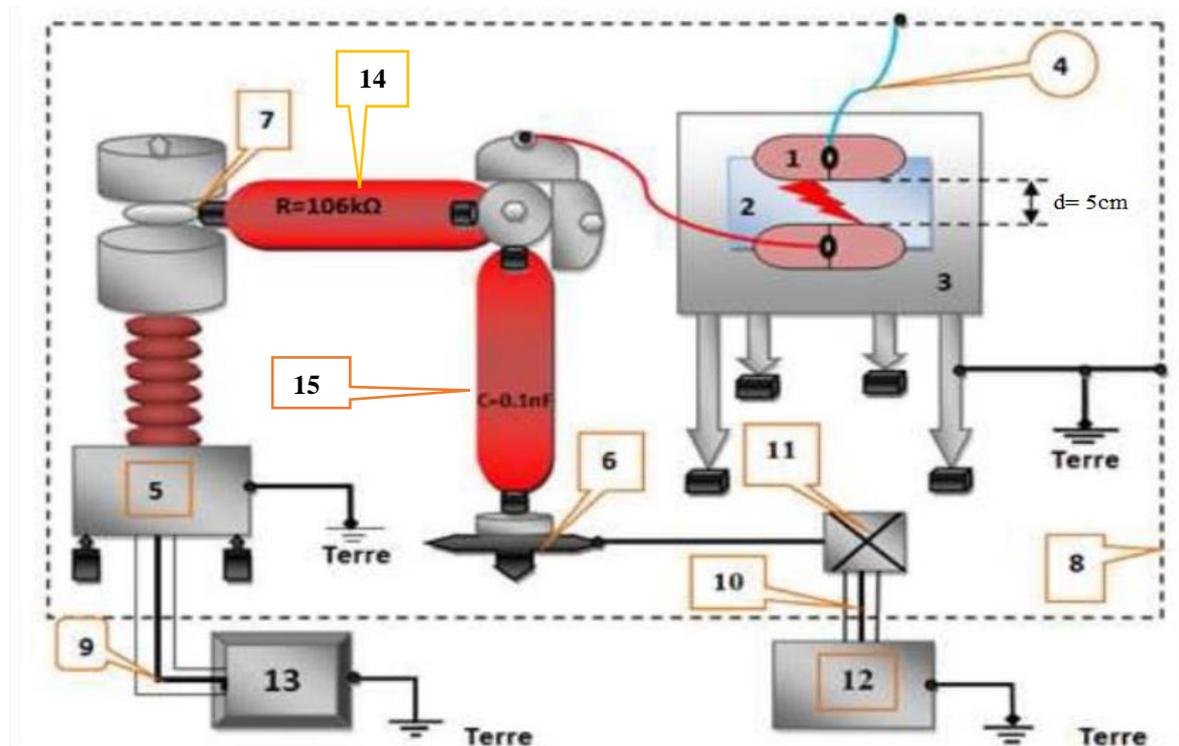
#### III.5.1 Dispositif expérimental :

##### III.5.1.1 Circuit d'essai du laboratoire de Haute tension (Université de Bejaia) :

Les essais sont effectués dans le laboratoire de haute tension de (Université Abderrahmane Mira de Bejaia)

Notre laboratoire est constitué de circuit suivant :

- Un transformateur HT (T100) 0.08/135 kV pouvant délivrer une tension allant de 0 à 100 kV pour des essais en alternatif et de 0 à 135 kV en tension continue ;
- Un appareil de commande automatique et manuelle de tension SG, à vitesse de montée variable ;
- Un diviseur de tension capacitif ( $C_0 = 0.1 \mu F$  et  $C_u = 41.4 \mu F$ ) pour les mesures en tension alternative ;
- Un voltmètre de crête AC/DC de type MU11, à affichage digital permettant, selon le montage électrique, la mesure des hautes tensions alternatives ou continues ;
- Une résistance de protection  $R = 106 k\Omega$  limitant le courant ;
- Une table servant de support à l'objet d'essai (ensemble échantillons et électrodes) ;



**Figure III. 1:** Schémas du dispositif expérimental du laboratoire haute tension de l'université Abderrahmane Mira de Bejaïa

- |   |  |
|---|--|
| 1 : Électrodes en cuivre.                         | 7 : Nœuds de liaison.                              |
| 2 : isolateurs solide (silicone).                 | 8 : Grille de protection.                          |
| 3 : Table.  | 9 et 10 : Câble coaxial.                           |
| 4 : Fil conducteur.                               | 11 : Boîte de connexion.                           |
| 5 : Transformateur haute tension.                 | 12 : (MU11) Voltmètre de crête.                    |
| 6 : Support d'éléments.<br>manuel et automatique. | 13 : (SG1BT) Système de commande                   |
| 14 : Résistance d'amortissement.                  | 15 : capacité haut tension du diviseur de tension. |



**Figure III. 2:** dispositif expérimental du laboratoire haute tension de l'université Abderrahmane Mira de Bejaïa.

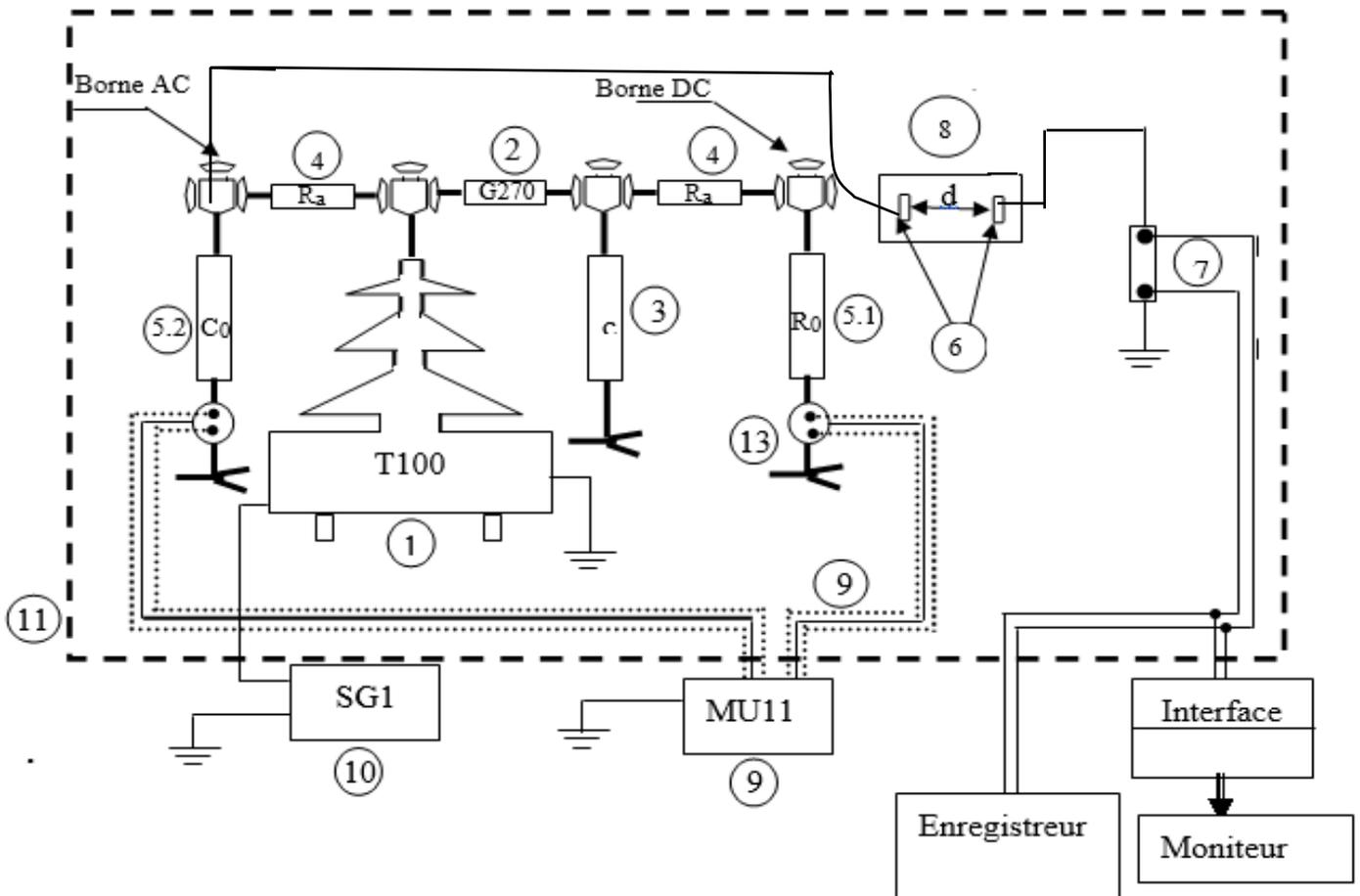
(1) : côté commande      (2): côté haute tension

### III.5.2 Techniques de Mesure de la tension de claquage

La tension d'essai est mesurée à l'aide d'un diviseur de tension capacitif relié au secondaire du transformateur d'essai. Ce diviseur est constitué d'une capacité haute tension  $C=0,1nF$ , en série avec un ensemble de capacité (capacité basse tension, capacité du câble coaxial et capacité d'entrée des appareils de mesure), permettant ainsi de réduire la tension réelle.

La tension de contournement retenue est la moyenne arithmétique de 20 essais pour chaque cas de conductivité et chaque distribution de la pollution pour une distance inter électrodes de 5cm.

Le Schémas du dispositif expérimental de mesure de la tension de contournement et du courant de fuite est représenté sur la figure 2 qui suit :



**Figure III. 3:** Schéma électrique du dispositif expérimental de mesure de la tension de contournement et de courant de fuite.

L'équipement de la station d'essai schématisé sur les fig. 3 :

- |  |  |
|--|--|
| 1 : (T100) Transformateur 0,08 A/135kV ;                   | 8 : Objet d'essai (isolateur sous pollution) ;         |
| 2 : (G270) Diode haute tension ;                           | 9 : (MU11) Voltmètre de crête ;                        |
| 3 : (C) Capacité de filtrage : 10 nF ;                     | 10 : (SG1) Commande de l'alimentation du               |
| 4 : (Ra) Résistance d'amortissement : 106k $\Omega$ ;      | transformateur ;                                       |
| 5.1 : (R0) Résistance haute                                | 11 : Cage de Faraday ;                                 |
| tension du diviseur résistif : 250M $\Omega$ ;             | 12 : Enregistreur XY (oscilloscope à                   |
| 5.2 : (C0) Capacité haute tension                          | mémoire ou table traçante) ;                           |
| du diviseur capacitif ; $C_0 = 0,1nF$                      | 13 : Connecteur ;                                      |
| 6 : électrode en cuivre ;                                  |  |
| 7 : (RM) Résistance de mesure : 100 $\Omega$ ;             | $R_E$ : Résistance d'entrée de MU11 : 4,24M $\Omega$ ; |
| $C_E$ : Capacité d'entrée de MU11 $\leq 50pF$ ;            | $C_C$ : Capacité du câble coaxial ;                    |
| d : distance inter-électrode du modèle en silicone $d=5cm$ |  |

### III.5.3 Circuit d'alimentation

Il est constitué d'un transformateur d'essai (0.08A/135kV, 8kVA) dont le primaire est relié à un transformateur de réglage (autotransformateur intégré dans SG1) permettant ainsi d'ajuster la tension à la valeur désirée.

### III.5.4 Circuit de mesure de la tension appliquée

La tension d'essai est mesurée à l'aide d'un diviseur de tension résistif relié à un voltmètre de crête. Ce diviseur est constitué d'une capacité haute tension en série avec un ensemble de capacités. On distingue les capacités des connexions, la capacité du câble coaxial et la capacité d'entrée des appareils de mesure. Le circuit de mesure permet ainsi de ramener la tension réelle de contournement vers des valeurs mesurables avec des appareils de mesure basse tension. Le voltmètre de crête à affichage numérique permet la lecture de la tension de contournement réduite en la mémorisant automatiquement pendant quelques secondes.

### III.5.5 Circuit de mesure du courant de fuite

La mesure du courant de fuite s'effectue par l'intermédiaire du signal tension capté aux bornes d'une résistance  $R_M = 100\Omega$ , insérée en série avec l'objet d'essai et le retour de terre. Cette tension est mesurée et visualisée à l'aide d'un oscilloscope à mémoire.

## III.6 Modes opératoires

### III.6.1 Préparation des isolateurs

Avant chaque essai, les six l'isolateur doivent être bien rincé avec de l'eau distillée puis séchés à l'aide du papier absorbant. Les électrodes sont fixées et serrées définitivement sur la surface de l'isolateur à l'aide de pincettes. Des plaques en cuivre est inséré entre la surface de l'isolateur et l'électrode pour assurer un contact parfait. (Figure III.4)

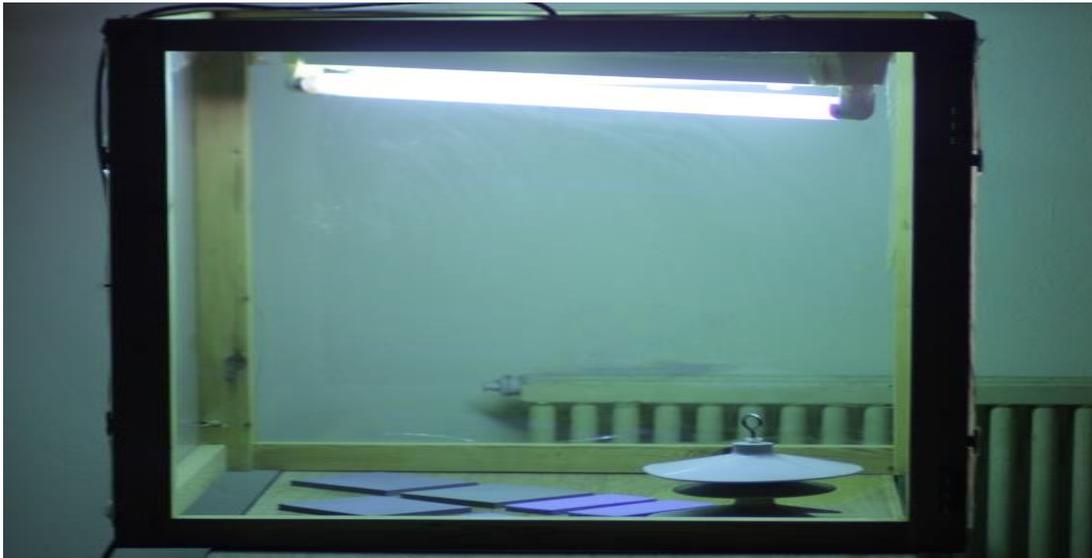
Le vieillissement sous rayons ultra-violet a été effectué par lot de trois échantillons de silicone à la fois, dans une boîte en verre hermétique pour éviter la poussière et ils ont été bien nettoyés avec de l'eau distillée ensuite séchée. Ils ont été placés horizontalement en parallèle avec le tube à UV. Dans une chambre fermée et noir dont la seule lumière à l'intérieur de cette chambre est la lumière qui provient du tube à UV, un seul côté des échantillons est exposé à la lumière UV. L'intensité UV constante du côté cible des échantillons a été contrôlée à 40 W/m en ajustant sa position et la contrainte thermique a été maintenue en voisinons 26°C. Figure 5



**Figure III. 4:** les six échantillons de silicone utilisée

NB : Lot 1 : échantillons bleu.

Lot 2 : échantillons gris.



**Figure III. 5:** Cellule de test pour le vieillissement UV des modèles des isolateurs en silicone dans les conditions de test avec seul lumière de la lampe à UV

### III.6.2 Préparation de la solution polluante

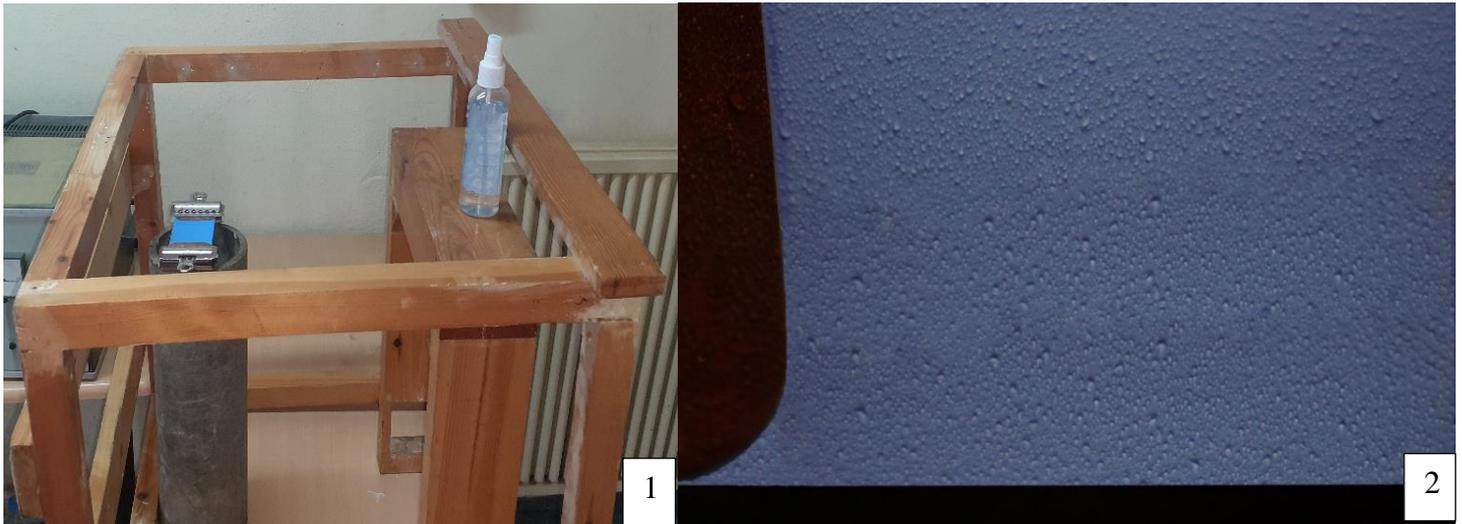
Le dépôt polluant est obtenu à partir d'un mélange de sel dissout dans un litre d'eau distillée. La variation du degré de pollution est obtenue en variant la concentration de NaCl dans l'eau. La conductivité de la solution est fixée à la valeur désirée (11,500, 1000, 1500,2000)  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à l'aide d'un conductimètre qui affiche la conductivité de la solution ionique ramené à la température normale de  $20^\circ\text{C}$ . Les solutions sont réajustées avant chaque début d'une série d'essais, afin de garder les mêmes caractéristiques de la solution



**Figure III. 6:** conductimètre à sonde mobile

### III.6.3 Procédé d'application de la couche de pollution

Le dépôt polluant est obtenu sur la surface de l'isolateur par des pulvérisation à l'aide d'une pompe. Pour assurer une bonne reproductibilité des couches polluantes, il a été gardé durant tous les essais la même méthode de pompage, la quantité et la répartition de la solution sur la surface de l'isolateur utilisé demeure la même à chaque essai . (Figure III.7)



**Figure III. 7:** dispositif expérimentale pour la reproduction de la pollution saline et résultats obtenue

- (1) Dispositif expérimental pour l'application de la couche de pollution
- (2) Répartition de la pollution sur la surface des échantillons hydrophobie

### III.7 Etude de la tension de contournement de l'isolateur rectangulaire en silicone

Le modèle expérimental est constitué de deux isolateurs réels en silicone, de formes rectangulaires. Ces isolateurs sont munis chacun de deux électrodes en cuivre sous forme carre qui épousent parfaitement la forme des isolateurs.

Pour ce cas de configuration de la pollution, une couche de pollution est appliquée sur la totalité de la surface comprise entre les électrodes et ce pour les conductivités volumiques :  $\sigma_v = 11 \mu S/cm$ ,  $\sigma_v = 500 \mu S/cm$ ,  $\sigma_v = 1000 \mu S/cm$ ,  $\sigma_v = 1500 \mu S/cm$

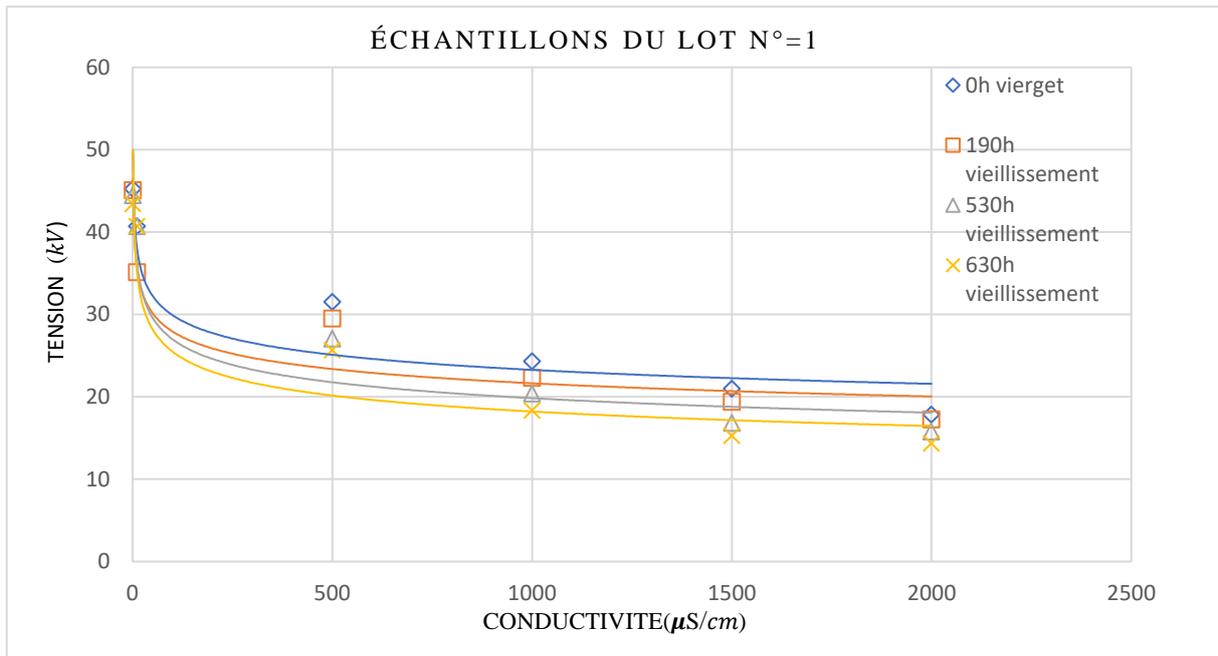
$\sigma_v = 2000 \mu S/cm$ . Les essais ont été effectués pour les deux lots d'échantillons et sous tension alternative.

Les courbes des figures (III.8 et III. 9), montrent l'évolution de la tension de contournement en fonction de la conductivité volumique de la solution polluante exprimée en  $\mu S/cm$ . Pour tous les cas considérés, nous remarquons que la variation de la tension de contournement en fonction de la conductivité suit une fonction de puissance ( $U_c = k\sigma^{-n}$ ). (II.41)

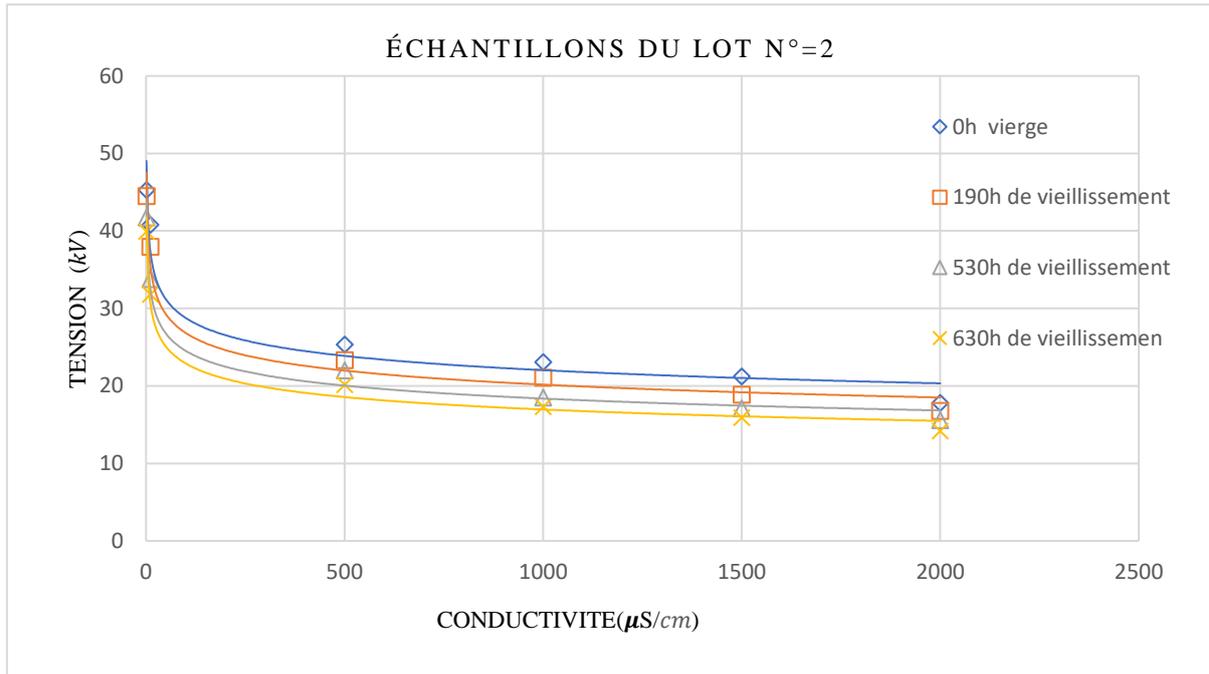
Avec  $U_c$  ; Tension de claquage  $kV$

$\sigma_v$ ; Conductivité volumique de la solution polluants

Ce résultat est prévisible car l'augmentation de la conductivité de la couche de pollution provoque la diminution de l'impédance équivalente vue des électrodes et la tenue diélectrique se dégrade ainsi de plus en plus [45,46]. Les deux figures montrent que pour des différents valeurs de la conductivité volumique, la tension de contournement diminue quand la conductivité sur la surface de l'isolateur augmente et ce pour les deux lots d'échantillon utilisé



**Figure III. 8 :** Tension de contournement en fonction de la conductivité volumique des échantillons du lot 1.

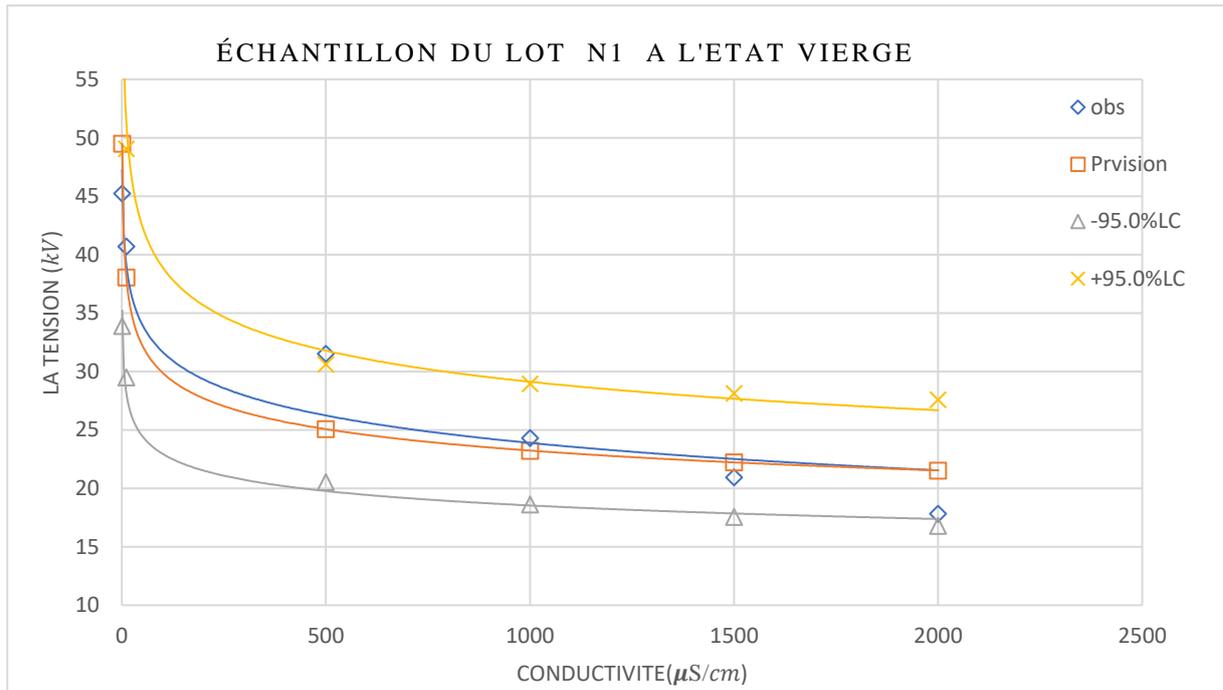


**Figure III. 9 :** Tension de contournement en fonction de la conductivité volumique des échantillons du lot 2.

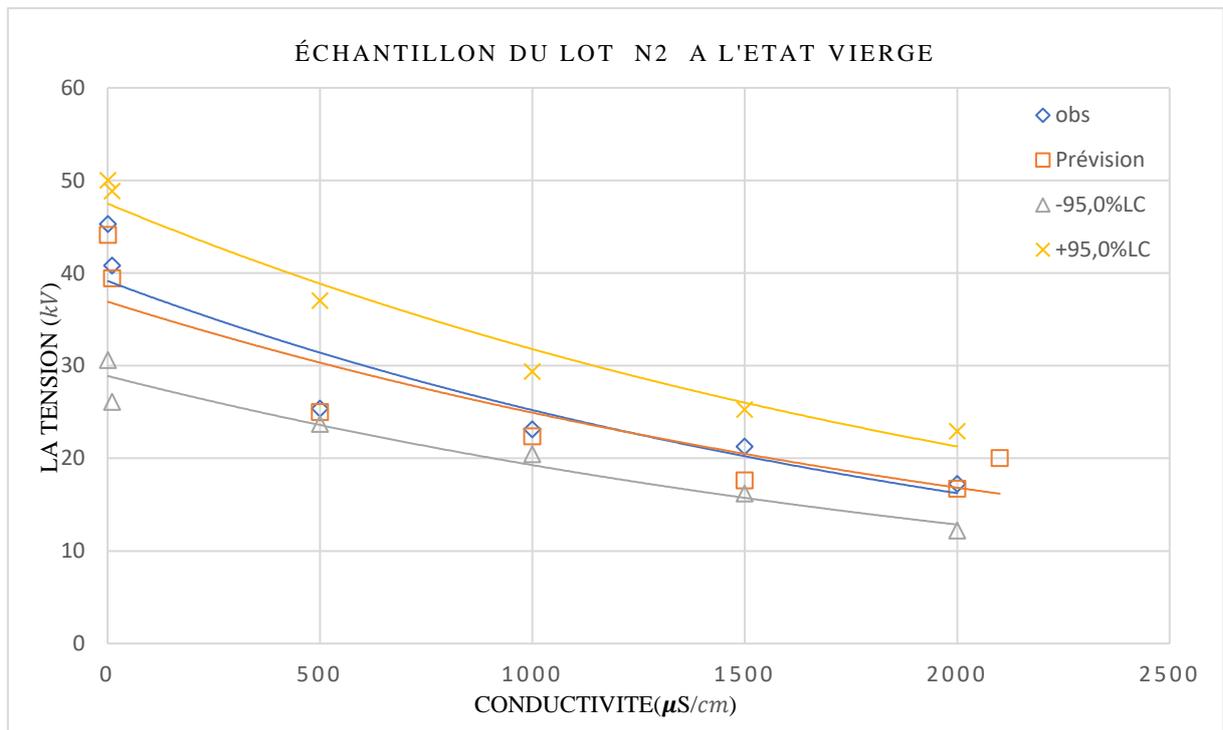
L'utilisation de la régression multiple pour la prévision de la tension de contournement passe par la linéarisation de la loi de variation de la tension de contournement en fonction de la conductivité.

$$\ln(U_c) = \ln(k) - n \ln(\sigma_v) \quad (\text{II.42})$$

On développe ensuite le modèle statistique en utilisant la régression multiple de la variable dépendante qui est le logarithme népérien de la tension de contournement en fonction de la variable indépendante qui est le logarithme népérien de la conductivité volumique de la solution polluante [47-48]. (Figure III.10) et (Figure III.11).



**Figure III. 10:** Tension de contournement prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vierges non vieilli du lot 1



**Figure III. 11:** Tension de contournement prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vierges non vieilli du lot 2

Les courbes et les lois de variation de la tension de contournement en fonction de la conductivité obtenues à l'aide du modèle développé dans le cadre de ce travail sont données respectivement par les figures (III.12, III.20, III.27, III.28, III.29, III.30, III.31, III.32) et par les tableaux III.5, III.6. Les courbes des figures précédentes présentent les prévisions du modèle de calcul de la tension de contournement en fonction du degré de sévérité de pollution dans le cas des isolateurs rectangulaire en silicone. Les calculs sont effectués pour une tension alternative ainsi que pour les deux lots d'échantillons.

Les valeurs obtenues avec notre modèle sont identiques aux valeurs expérimentales et qui sont à l'intérieur de l'intervalle de confiance qui est lui-même très étroit. Dans la zone de prédiction les valeurs obtenues avec notre modèle sont à l'intérieur de l'intervalle de prédiction figure III.12. Ce dernier devient de plus en plus large dans le domaine des conductivités élevées qui correspond au degré de pollution le plus sévère (pollution exceptionnelle) mais reste toujours dans les limites satisfaisant des conditions de validation du modèle.

Les tableaux III.5, III.6, montrent les résultats statistiques des modèles. La faible valeur de la probabilité  $P(F_\alpha > F_{calculé}) = 0,0007 \ll \alpha = 0,05$  montre que le modèle de régression est significatif. Cela est confirmé par le coefficient de détermination qui est très proche de 100% (le plus petit vaut 95.68%). Le coefficient  $R^2_{(prédiction)} = 94.35\%$  montre que le modèle peut être utilisé pour prédire des valeurs de la tension de contournement correspondant à des degrés de sévérité de pollution autres que ceux des valeurs expérimentales.

Les figures III.13 à III.16 présentent les tests des hypothèses probabilistes que nous avons posées. Le premier test consiste à vérifier la constante de la variance des erreurs.

La figure III.13 montre, dans notre cas, que les résidus en fonction des valeurs ajustées, sont distribués aléatoirement autour de l'axe des abscisses. On constate que les résidus n'ont pas tendance à augmenter ou à diminuer en fonction des valeurs ajustées, ce qui permet d'affirmer que la variance des erreurs est constante.

La figure III.14 permet d'avoir un aperçu sur la variation des carrés des résidus en fonction des valeurs prévues. Le tracé qui en découle est particulièrement utile pour détecter des points atypiques ou des groupes d'observations qui conduisent à des prévisions trop fortes ou trop faibles.

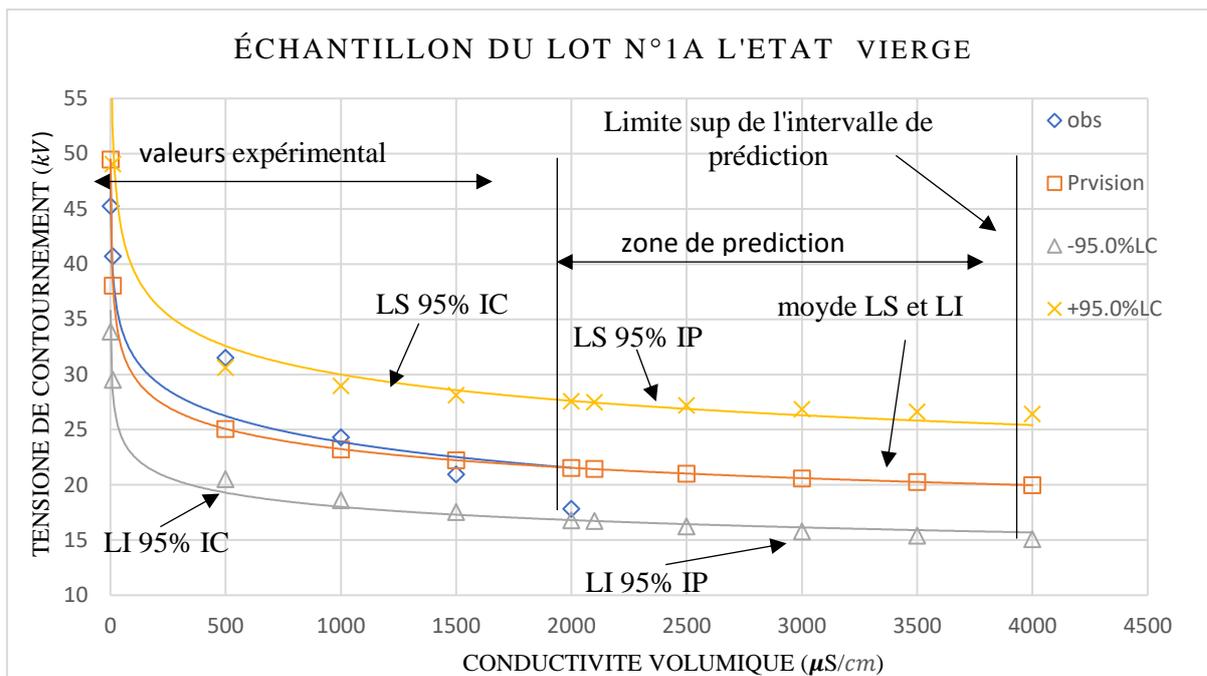
Les figures III.15 et III.23 représentent les valeurs observées en fonction des valeurs prévues, ces tracés sont particulièrement utiles pour identifier des groupes potentiels d'observations qui ne sont pas bien prévus, ils montrent l'accord entre les prévisions et l'expérience. Les points de ces tracés sont à l'intérieur de l'intervalle de confiance à 95%, ils sont ajustés par la première bissectrice.

La figure III.17 et III.26 représente les résidus supprimés en fonction des résidus standardisés. Les résidus supprimés sont les résidus qui seraient obtenus si l'observation respective était exclue de l'estimation de la régression multiple. Ainsi, s'il existe de fortes divergences entre les résidus supprimés et les résidus standardisés ordinaires, nous pouvons en conclure que les coefficients de régression ne sont pas très stables, donc fortement affectés par l'exclusion de simples observations. Dans ce cas, le modèle est jugé peu performant.

Dans la régression multiple, on suppose que les résidus (différence entre valeurs théoriques et celles observées) sont normalement distribués (c'est-à-dire qu'ils suivent la loi normale). Bien que la plupart des tests (particulièrement le test du F) soient assez robustes par rapport aux violations de cette hypothèse, il est toujours bon, avant de tirer des conclusions finales, d'examiner les distributions des principales variables étudiées. Le test de normalité qui permet de se prononcer à ce sujet est représenté par la figure III.16 (Q-Q plot). D'après ce tracé, on voit bien que les points  $(e(i); e^*(i))$  forment une droite alignée sur la diagonale principale, donc les erreurs sont distribuées selon une loi normale centrée et réduite.

Enfin la figure III.18 permet de constater que les résidus sont distribués d'une façon aléatoire en fonction de leurs ordres, ce qui signifie qu'il n'y a pas une autocorrélation entre les erreurs, ou plus précisément qu'il n'y a pas une grande autocorrélation. Cela est vérifié par le test de Durbin-Watson qui a donné une statistique  $d = 1,80727$  qui est comprise, comme mentionné précédemment, entre 0 et 4. Pour qu'il n'y ait pas d'autocorrélation elle doit être proche de 2, ce qui est tout à fait le cas pour ce test.

L'analyse des prévisions du modèle statistique est étendue aux isolateurs en silicone pour toute la période de vieillissement. La procédure suivie est la même et les résultats des tests effectués confortent ceux obtenus dans le cas de l'isolateur vierge (voir figures III.29, III.30, III.31, III.32).



**Figure III. 12:** Tension de contournement prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vierges non vieillis du lot 1

Équation de la régression de la tension de contournement en fonction de la conductivité : 0 heures pollution.

$$\ln(U_c) = 3,7232 - 0,985323 \ln(\sigma_v)$$

Prévu	Cœf	SE Cœf	T	P
Constantes	3,7232	0,043664	85,2711	0.000
$\ln(\sigma_v)$	-0,985323	0,000039	-11,5444	0.00032

S = 0,3725       $R^2 = 97.08 \%$        $R^2 (\text{adj}) = 96.35 \%$

Analyse de la variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Régression	1	0,673519	0,673519	133,2726	0,000322
Résidu	4	0,020215	0,005054		

**Tableau III. 5:** Résultats statistiques du modèle : Tension de contournement en fonction de la conductivité volumique.

Avec,

$\sigma$  La conductivité superficielle ( $\mu\text{S}$ )

$C_1$ - Concentration des éléments chimiques exprimée en mg/l;

SE coef Coefficient standard d'erreur ;

T-Coefficient statistique standard

P - Probabilité de teste de la signification de l'hypothèse nulle ;

S - Ecart type

F - Coefficient statistique standard

$R^2$  La somme des carrés de l'erreur

$R^2$  (adj) - La somme de carré de l'erreur de la série ajustée

DF - Degrés de libertés

SS Somme des carrés

MS - La moyenne des carrés

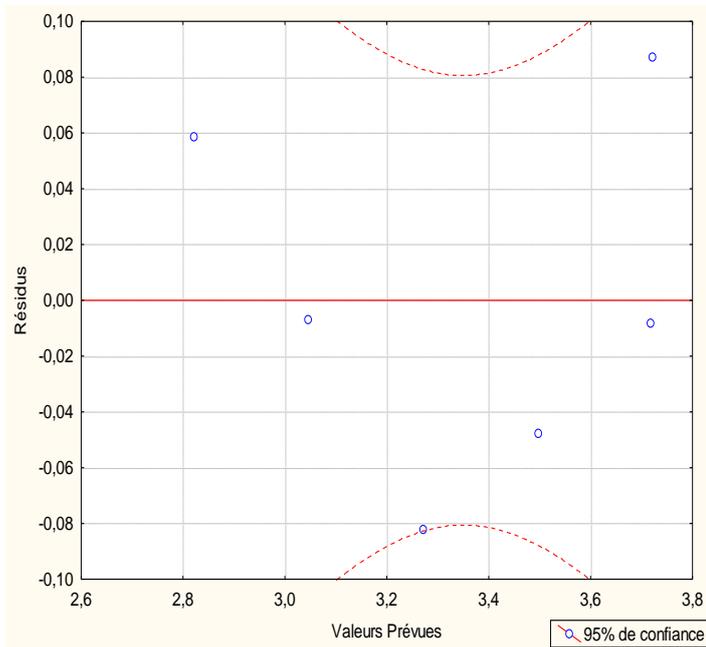


Figure III. 13 : Résidus en fonction des valeurs prévues

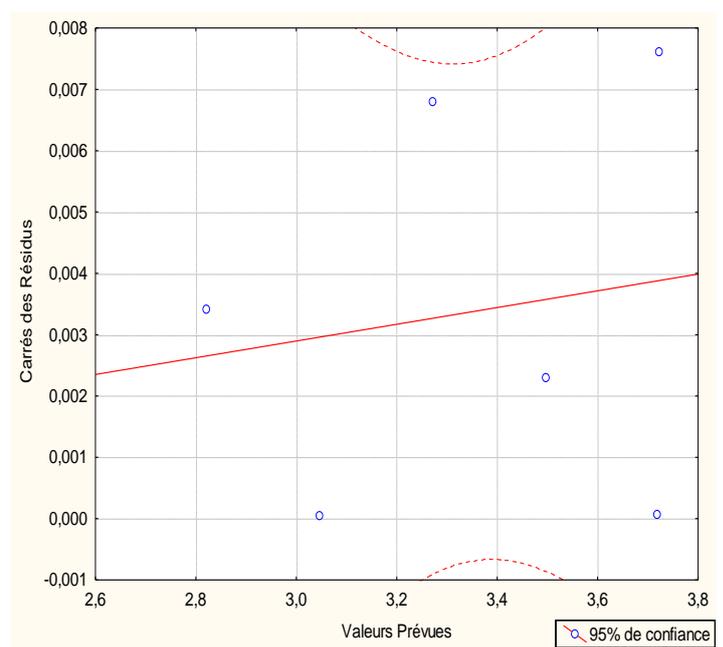
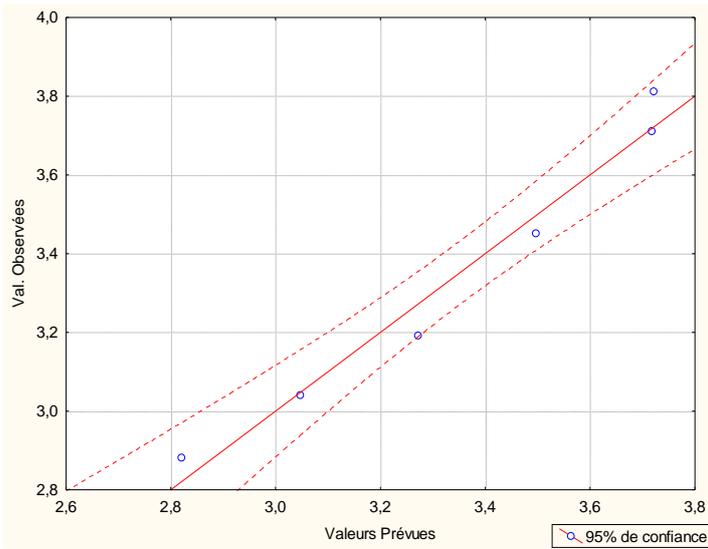
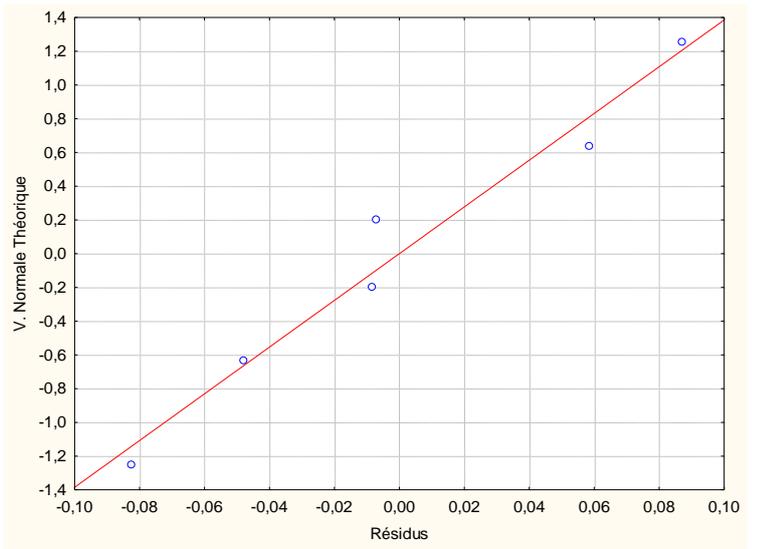


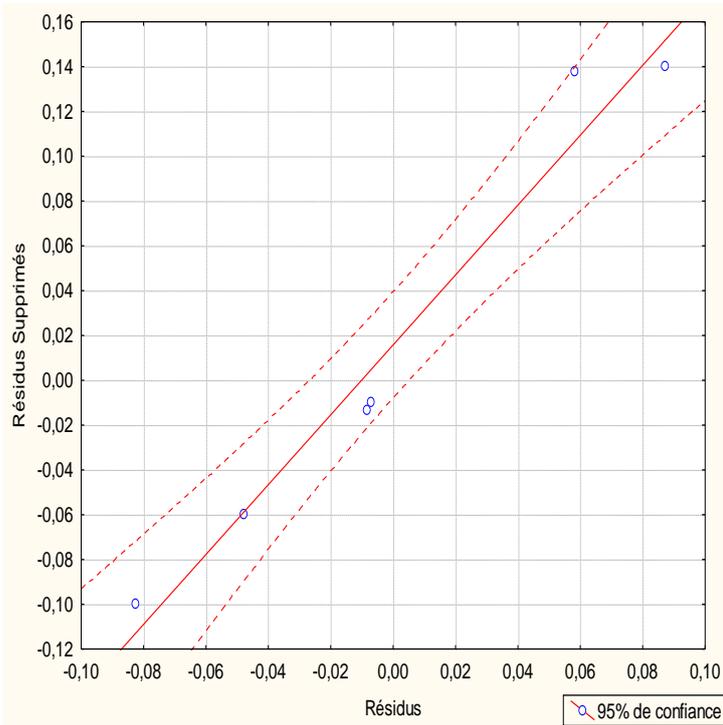
Figure III. 14 : Carrés de résidus en fonction des valeurs prévues



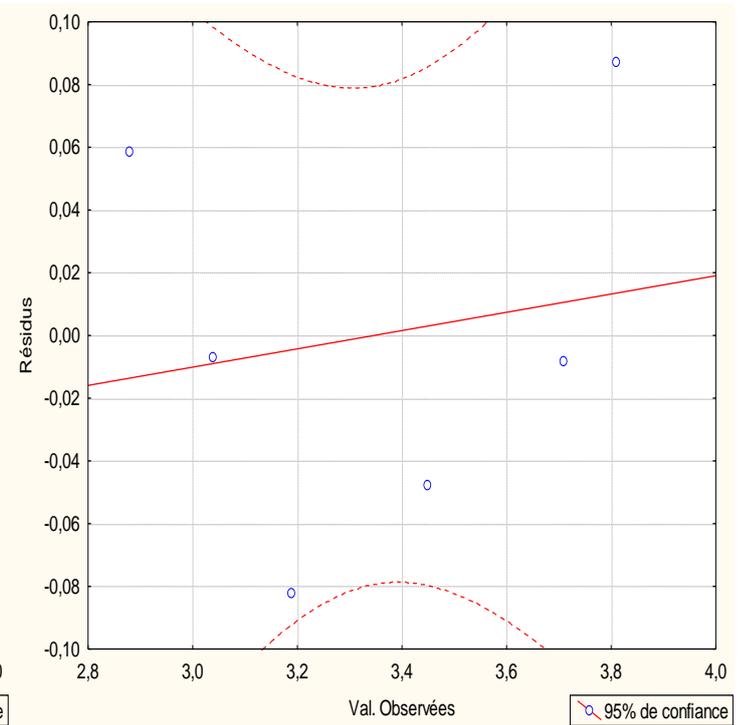
**Figure III.15 :** Valeurs Observées en fonction valeurs prévus par le modèle.



**Figure III.16 :** teste de normalité



**Figure III.17 :** Résidus Supprimés en fonction des résidus



**Figure III.18 :** Valeur résidus en fonction des valeurs Observées

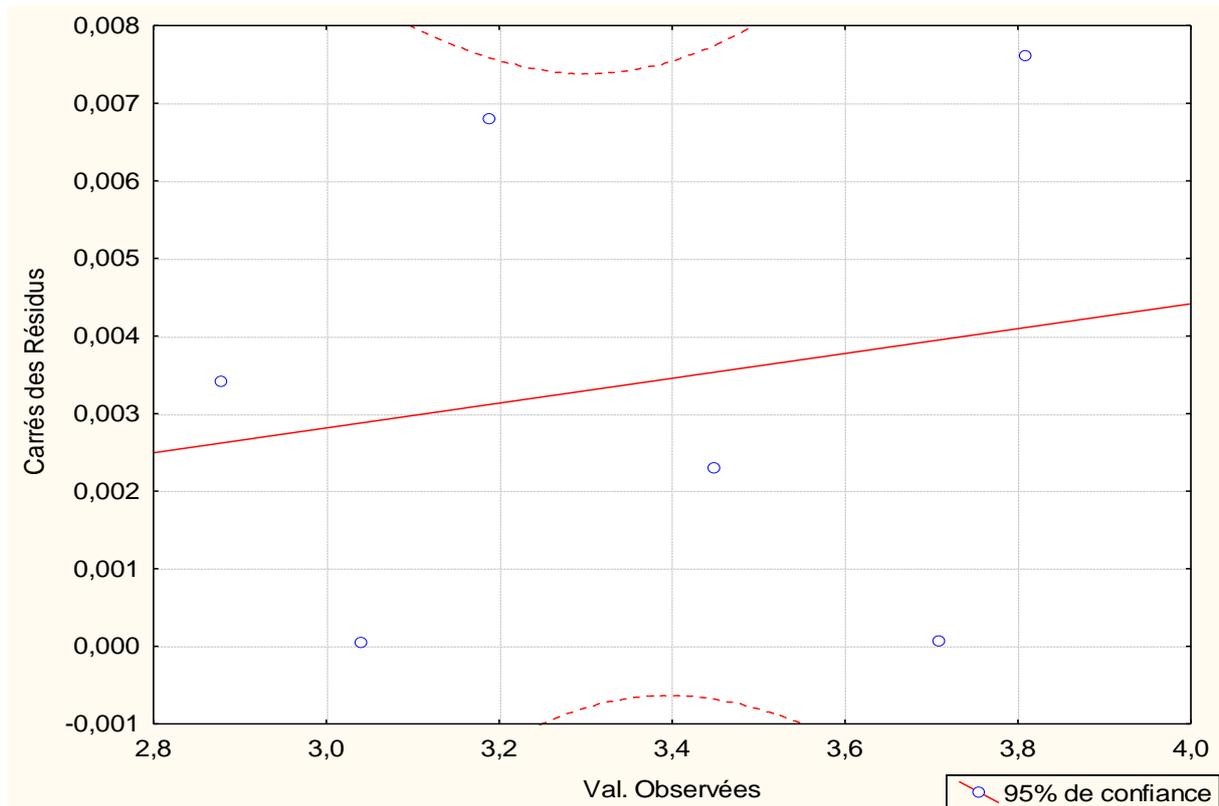


Figure III.19: Valeur du carré des résidus en fonction des valeurs observées

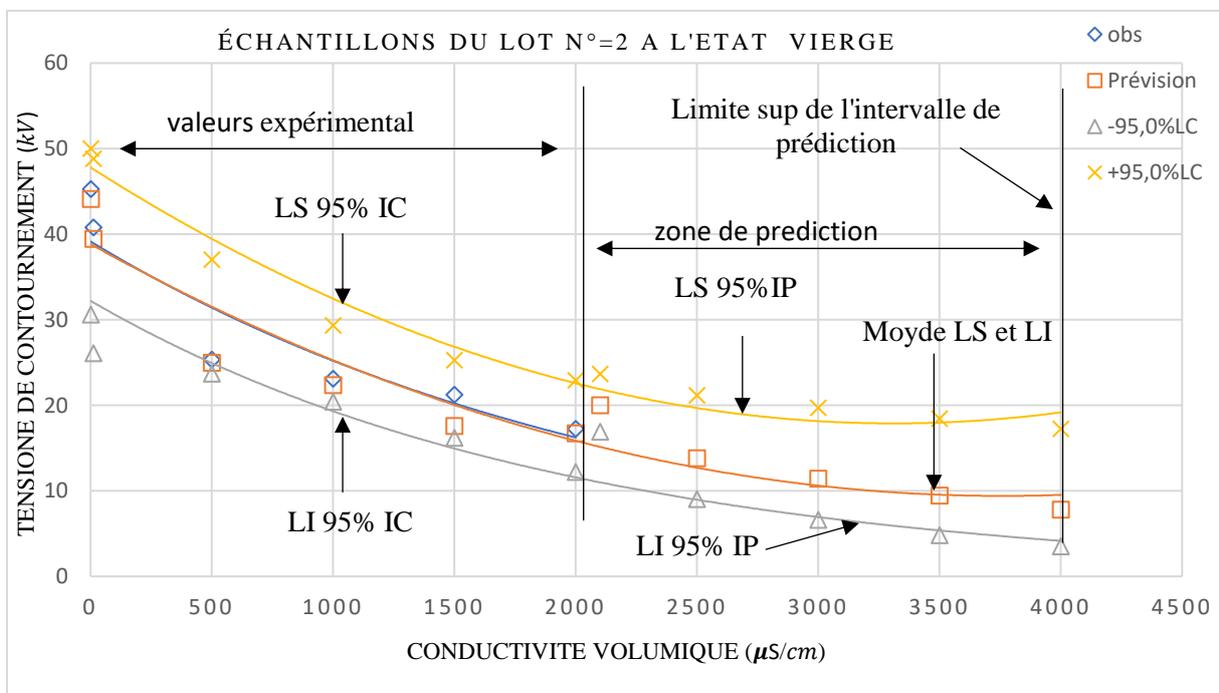


Figure III.20: Tension de contournement prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vierges du lot 2

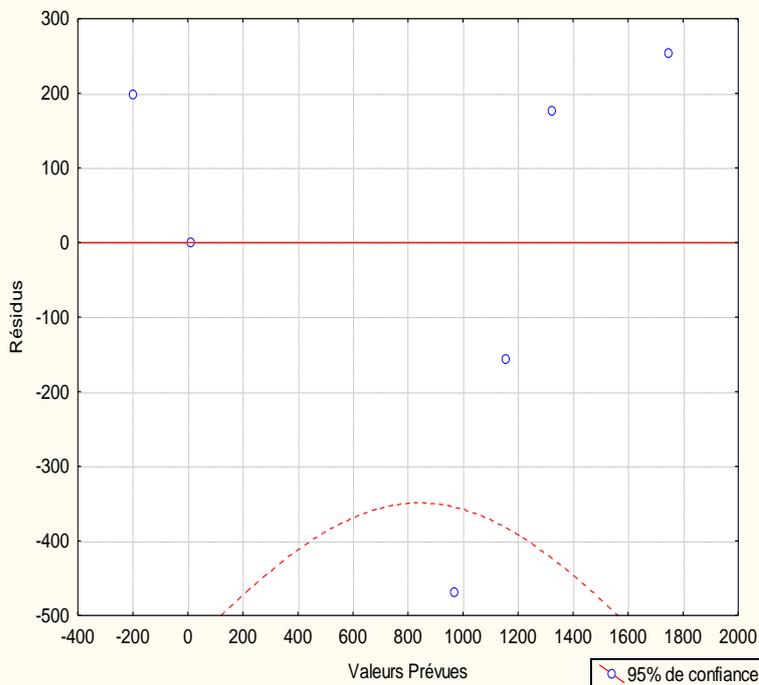
Equation de la régression de la tension de contournement en fonction de la conductivité : 0 heures pollution				
$Ln(U_c) = 3,7107 - 0,977155 Ln(\sigma_v)$				
Prévu	Cœf	SE Cœf	T	P
Constantes	3,7107	0,055178	67,25120	0.000
$Ln(\sigma_v)$	-0,977155	0,000049	-9,19555	0.000777

S = 0,3451       $R^2 = 95.68 \%$        $R^2 (adj) = 94.35 \%$

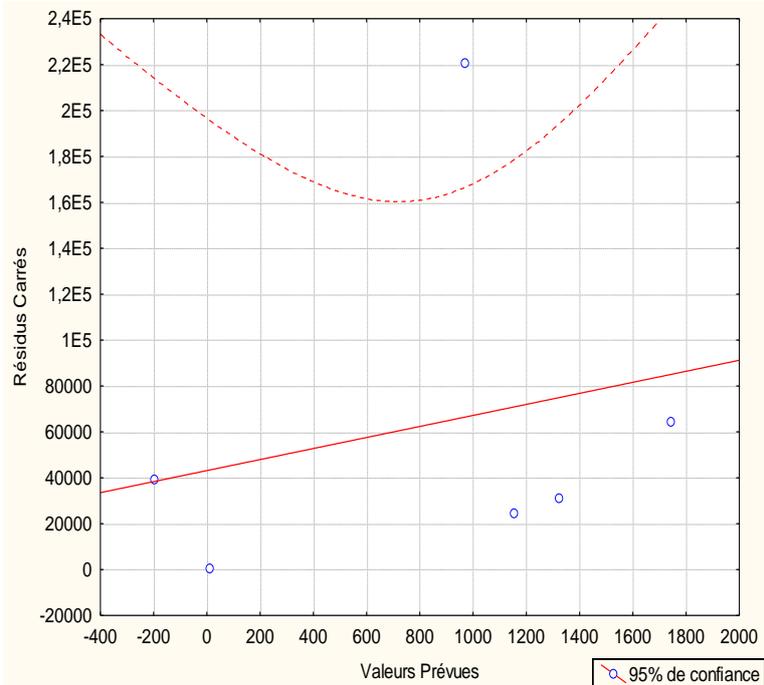
Analyse de la variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Régression	1	0,682402	0,682402	84,55807	0,000777
Résidu	4	0,032281	0,008070		

**Tableau III. 6:** Résultats statistiques du modèle : Tension de contournement en fonction de la conductivité volumique



**Figure III.21 :** Résidus en fonction des valeurs prévues



**Figure III.22:** Carrés des résidus en fonction des valeurs prévues

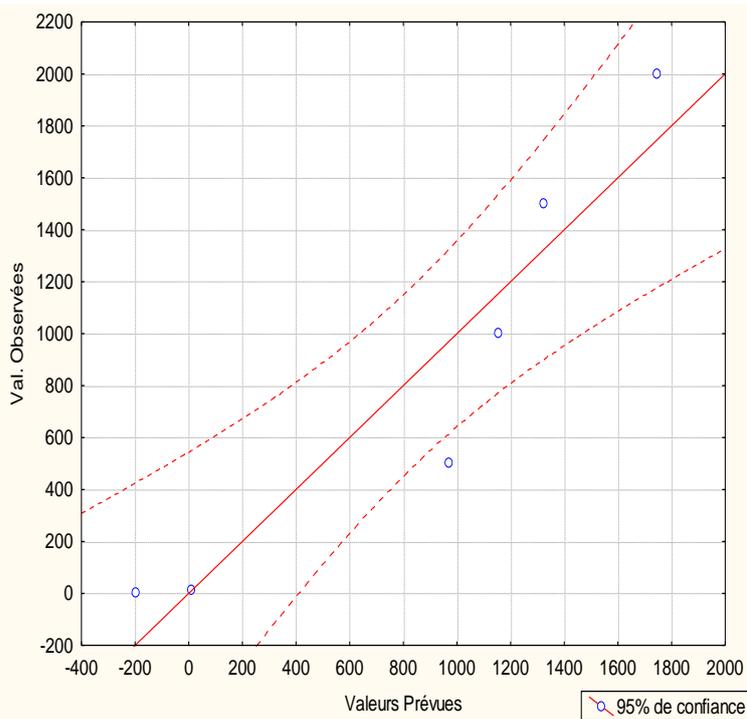


Figure III.23: Valeurs observées en fonction des valeurs prévues

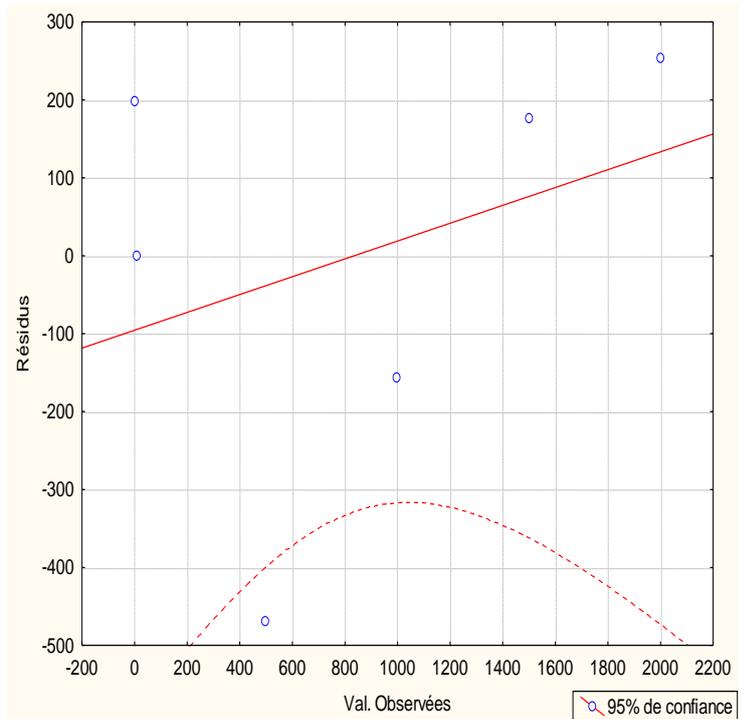


Figure III.24: Résidus en fonction des valeurs observées

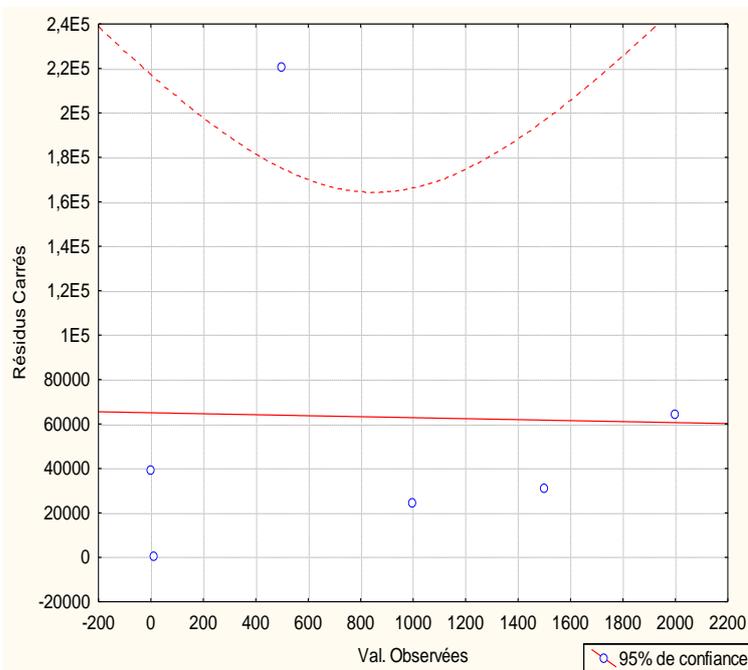


Figure III.25: Carrés des résidus en fonction des valeurs Observées

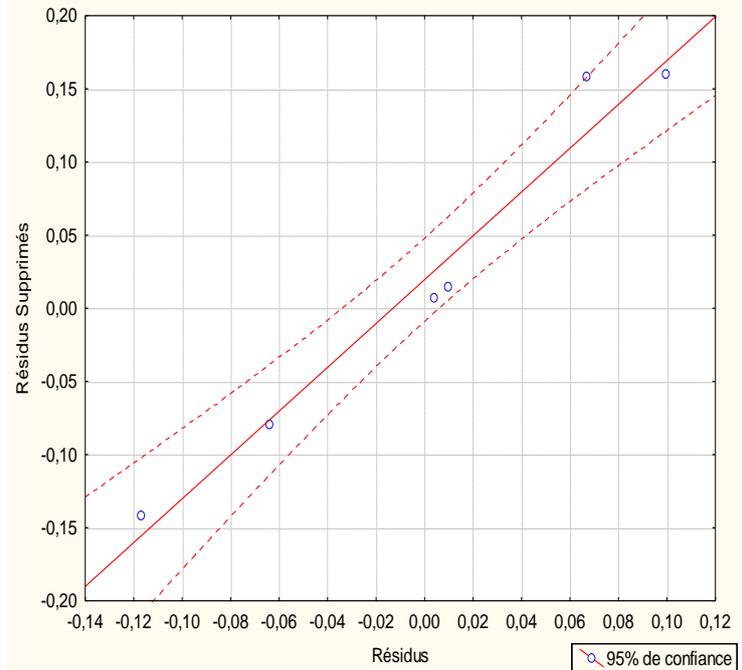
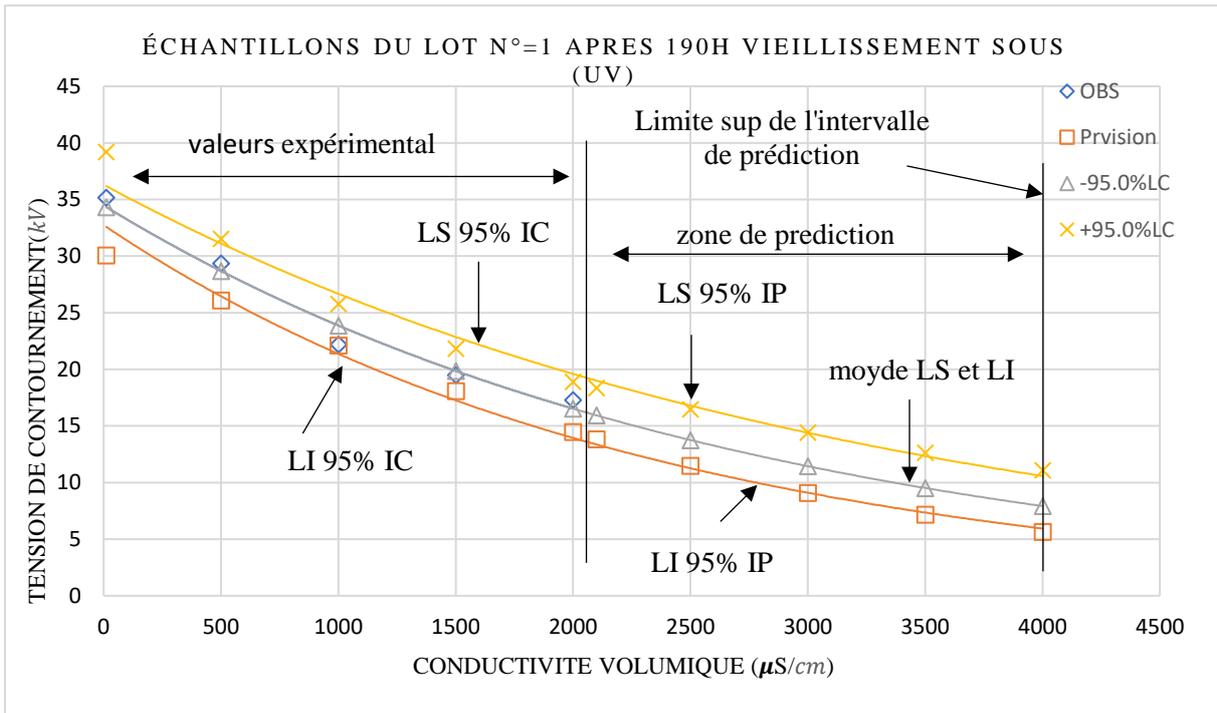
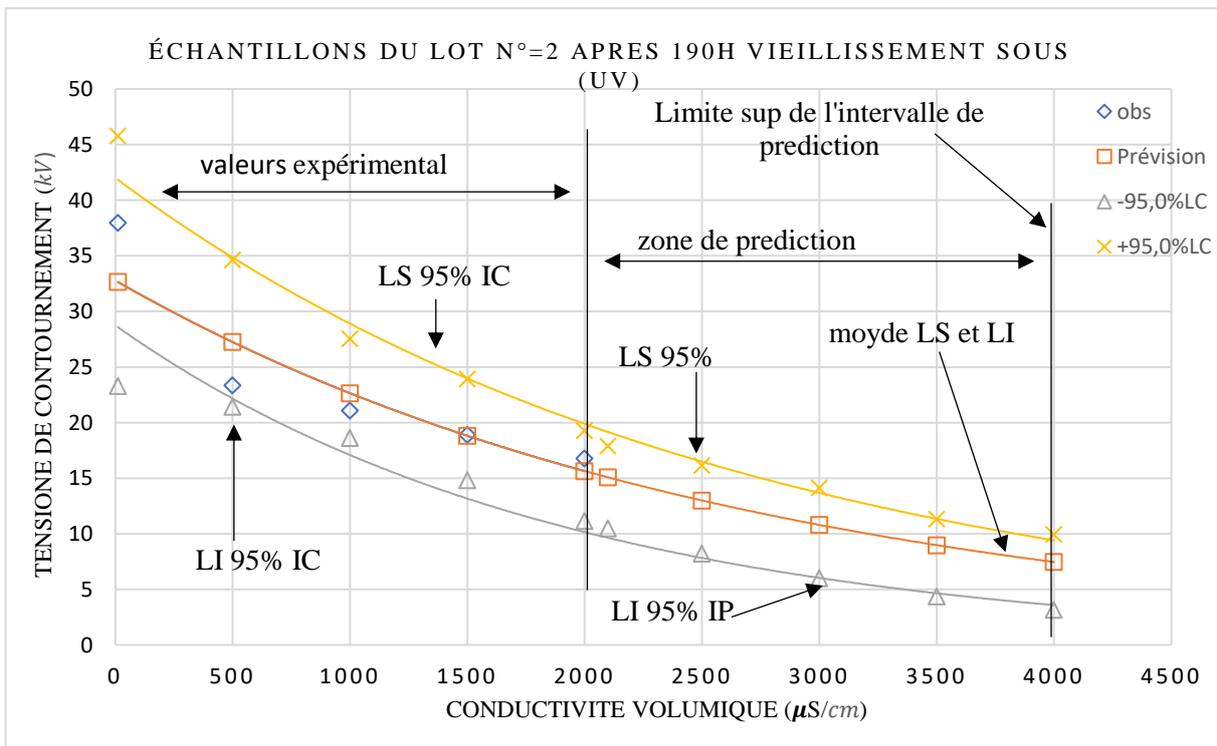


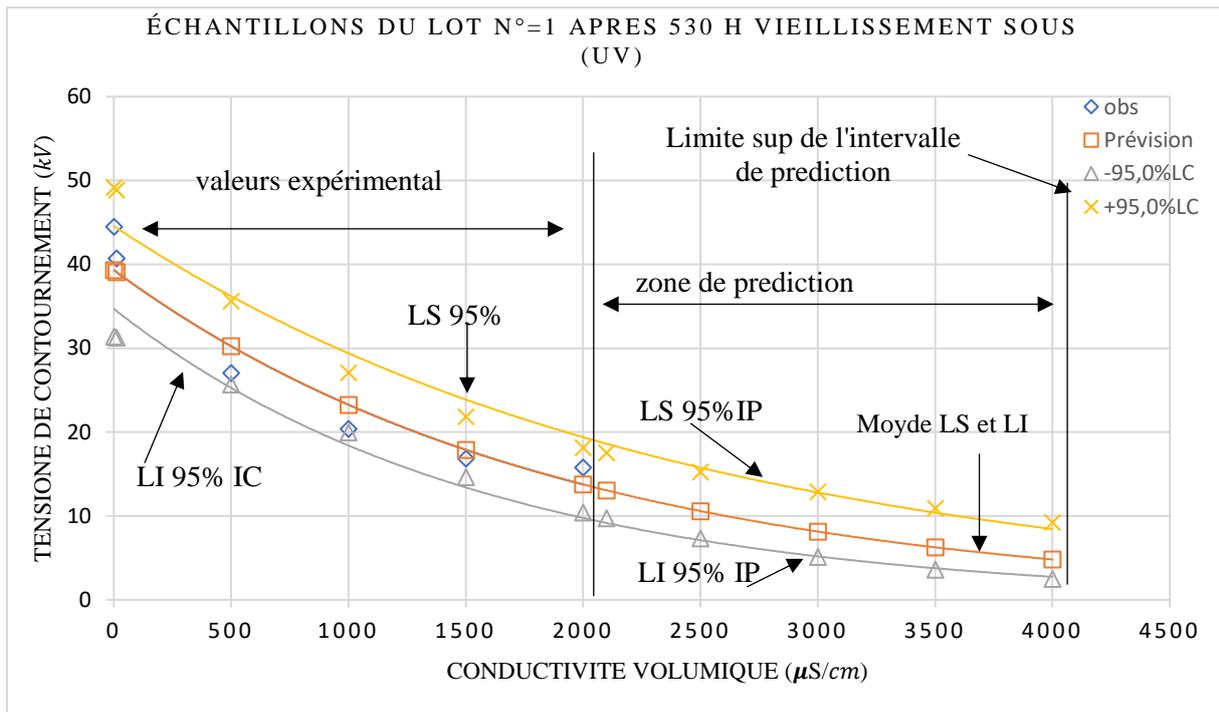
Figure III.26 : Résidus supprimés en fonction des résidus



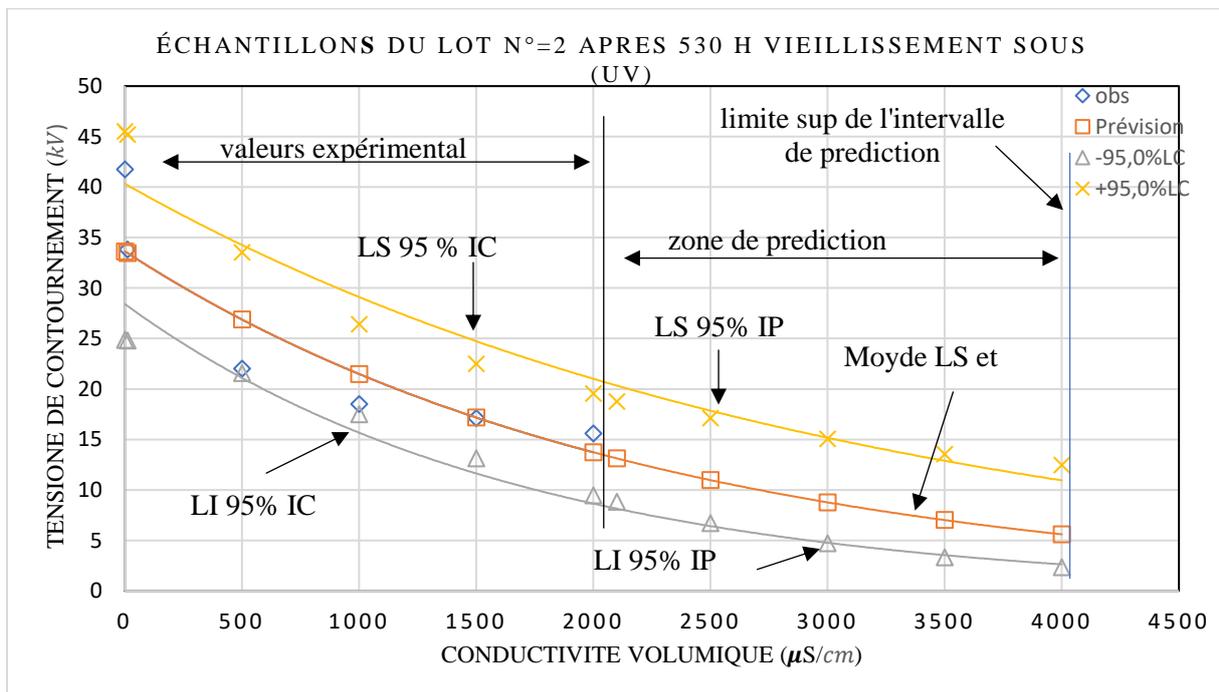
**Figure III.27 :** Tension de contournement prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 1



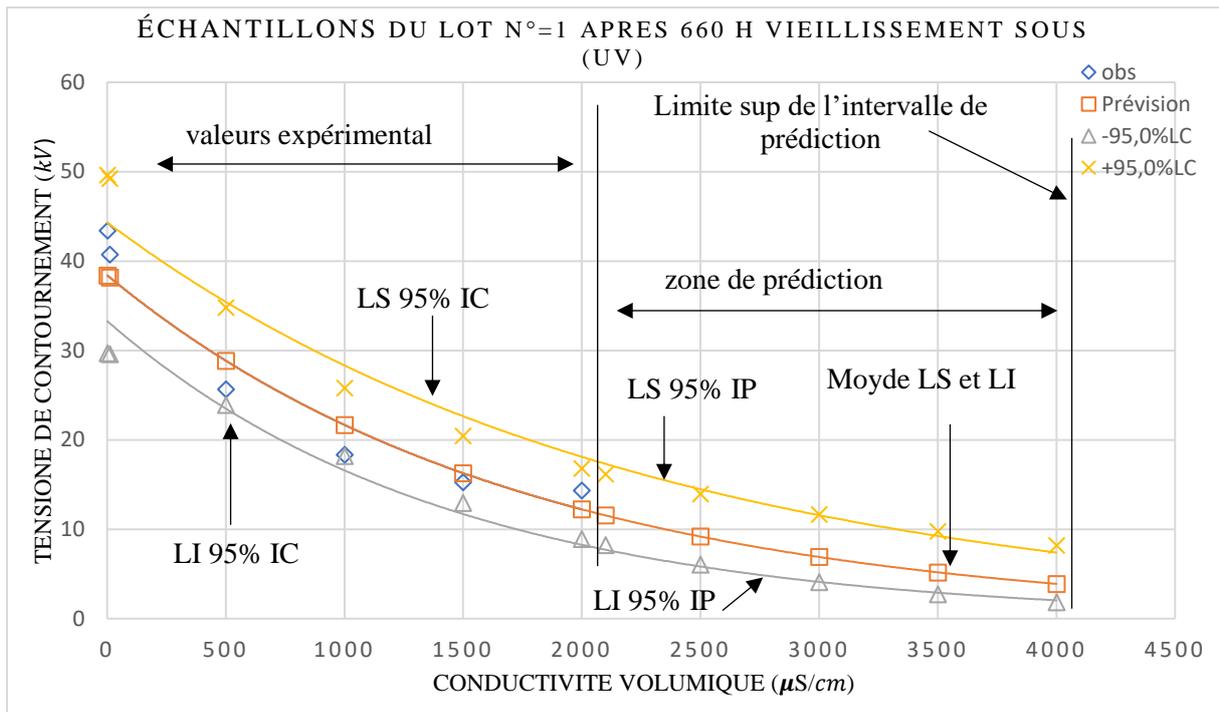
**Figure III.28 :** Tension de contournement prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 2



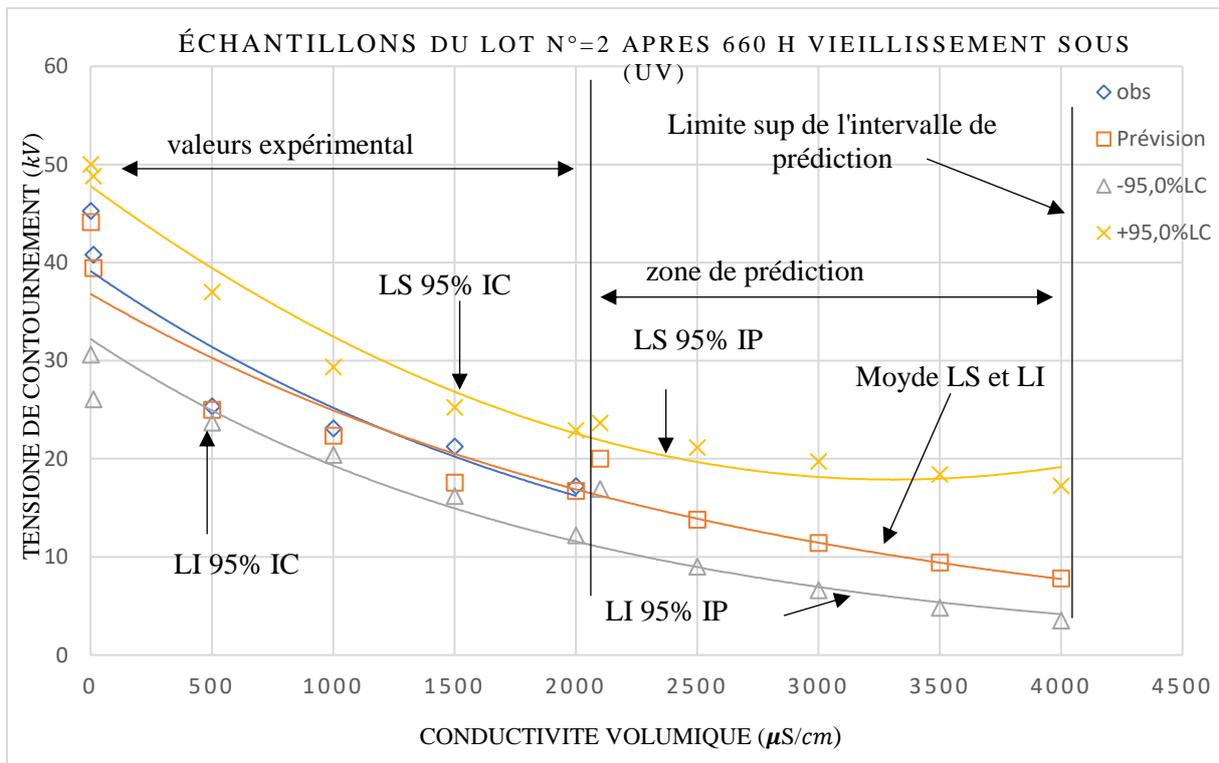
**Figure III.29 :** Tension de contournement prévu 95% à de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 1.



**Figure III.30 :** Tension de contournement prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 2.



**Figure III.31 :** Tension de contournement prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 1.



**Figure III.32 :** Tension de contournement prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 2.

## III.8 Étude du courant de fuite

### III.8.1 Influence de la conductivité et de temps d'exposition aux UV

Les courbes expérimentales des figures (III.33-III.34), représentent la variation du courant de fuite en fonction des conductivités pour une tension appliquée de 16 kV. Le courant croît avec l'augmentation de la conductivité volumique, ceci s'explique par le fait que l'impédance vue des deux électrodes diminue avec l'augmentation de la conductivité superficielle qui est lié à la conductivité volumique à l'exposition aux UV.

Les figures (III.33-III.34), représentent les variations expérimentales du courant de fuite en fonction de la tension d'alimentation dont les variantes sont les suivantes ;

- La conductivité de la couche de pollution.

### III.8.2 Résultats expérimentaux

Dans l'étude du courant de fuite on s'est limité aux isolateurs rectangulaires en silicone testés sous une pollution uniforme.

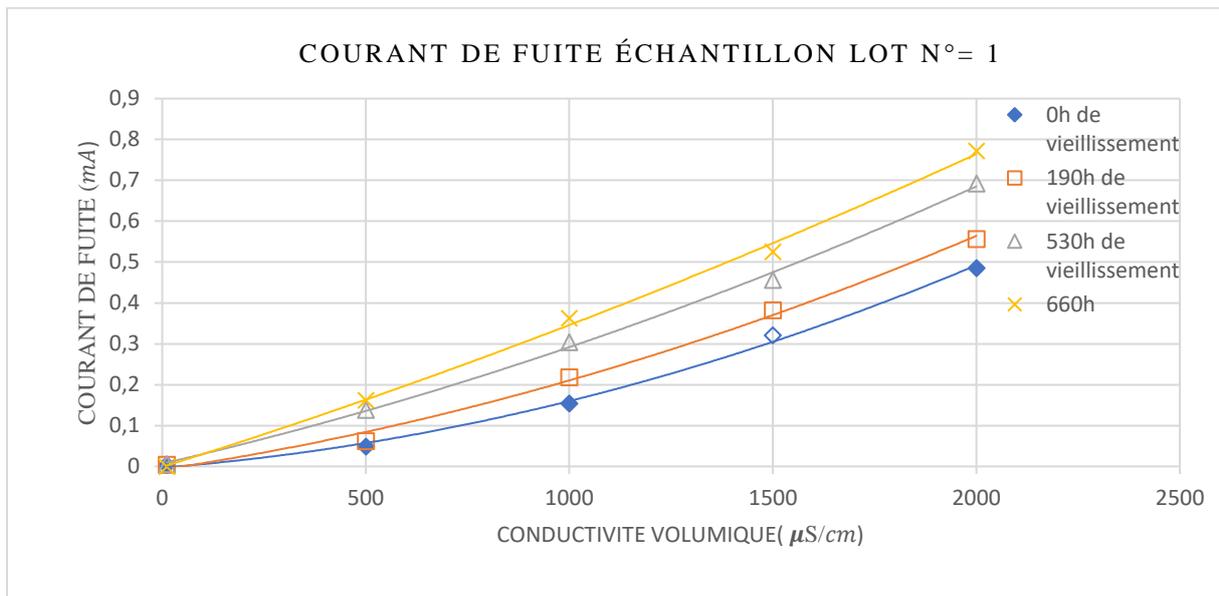
Les résultats obtenus montrent que les courants de fuites dépendent du temps de vieillissement de l'isolateurs. Il augmente avec la période d'exposition aux UV et ce quelles que soient la conductivité de la couche de pollution.

A titre d'exemple, les courants de fuites correspondant à l'isolateur de 190 heures de vieillissement dépassent de 31% en moyenne ceux obtenus en état vierge et dans les mêmes conditions de pollution.

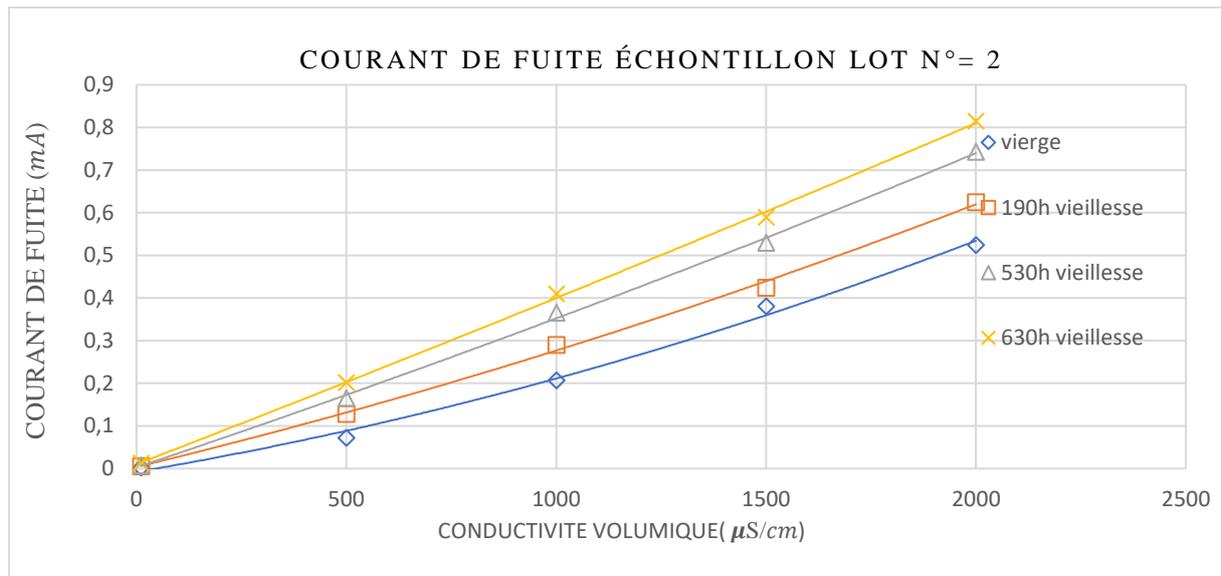
On note également l'influence des rayons UV sur le courant de fuite. Par exemple, lorsque la conductivité de la couche polluante est de  $1000\mu\text{S}/\text{cm}$  à 530 h, le courant de fuite est supérieur à celui correspondant à 190 h. Les écarts observés sont de 46% quand la tension appliquée est de 16 kV.

D'après la figure (III.33,III.34) le courant de fuite augmente en fonction de sévérité de pollution qui couvre la surface des isolateurs pour les différentes périodes d'exploitation aux rayons UV (190,530,660) heures, notons que la pollution et le temps de vieillissement ont un impact sur le courant de fuite qui croît en fonction des deux paramètres mis en jeu et qui est représenté dans les figures (III.35,III.36,III.44,III.45,III.46,III.47,III.48,III.49). On peut aussi constater que les courbes de courant obtenues après le vieillissement suivent une fonction exponentielle.

Cela est représenté dans les courbes des figures (III.33, III. 34) qui nous montre que toute les courbes de courant de fuite des deux lots (1,2) qui ont subi le vieillissement accéléré aux UV sont empilé l'une après l'autre, et on observe que l'échantillon vierge présente les courants de fuites les plus faibles et l'échantillon vieilli à 660h sous les UV présente les valeurs les plus élevés quel que soit le degré de sévérité de pollution.



**Figure III.33:** courant de fuite en fonction de la conductivité volumique des échantillons du lot 1 pour une tension appliquée 16kV.



**Figure III.34:** courant de fuite en fonction de la conductivité volumique des échantillons du lot 2 pour une tension appliquée 16kV.

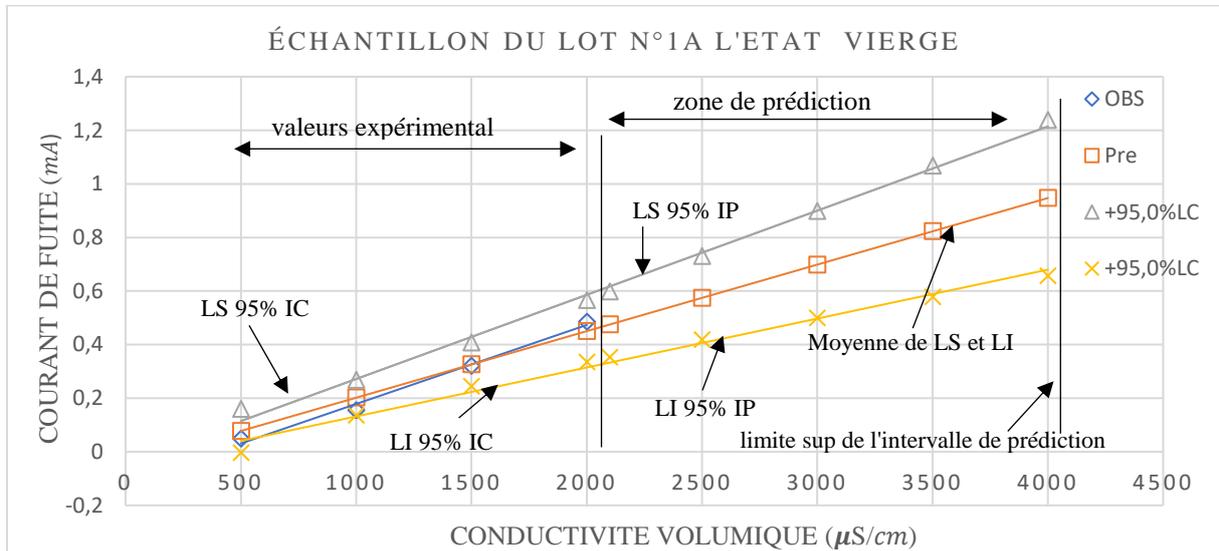
### III.8.3 Modèle statistique de courant de fuite

Nous présentons les résultats obtenus pour l'isolateur en silicone dans le cas d'une tension appliquée égale à 16kV.

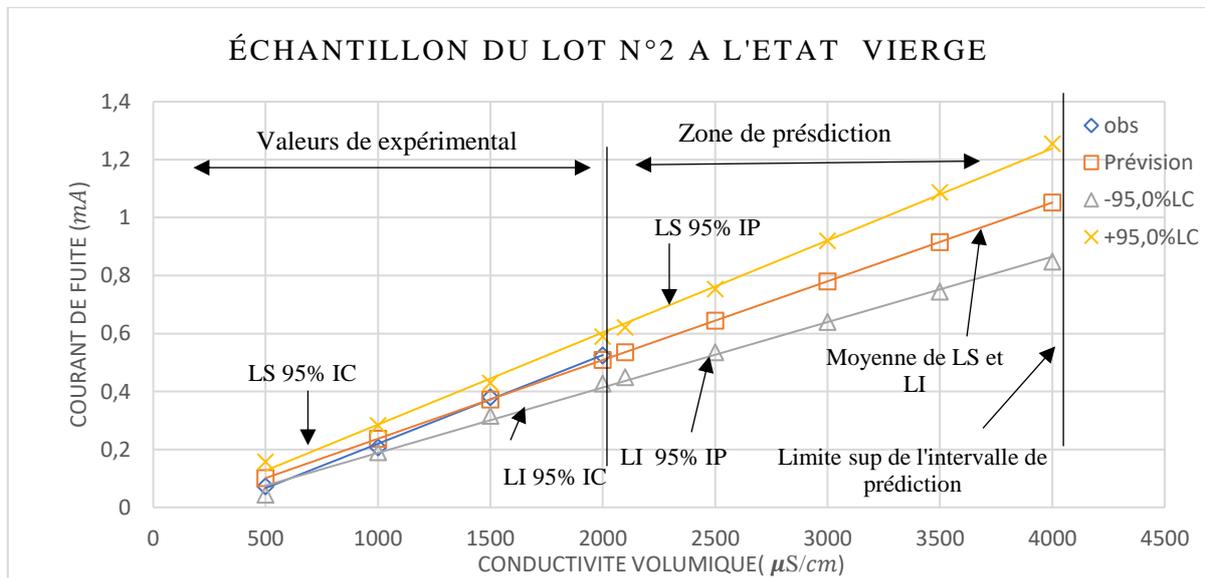
La figure (III.33 et III.34) montre la variation de la valeur crête du courant de fuite en fonction de la conductivité volumique de la couche de pollution. Les résultats expérimentaux montrent que le courant de fuite augmente exponentiellement avec la conductivité volumique de la couche de pollution. Les mêmes résultats montrent aussi que la variation du courant de fuite en fonction de période d'exposition au (UV) suit une loi logarithmique.

L'ajustement des données par la régression linéaire nécessite un changement de variable, on effectue la régression de la variable dépendante (le courant de fuite), en fonction du logarithme népérien de la variable indépendante (conductivité volumique)). Le tableau III.7 montre les résultats statistiques du modèle ainsi développé. D'après la probabilité  $P = 0,0035 \ll 0,05$  la régression est jugée significative avec un coefficient de détermination de 99,99 %. Cette dernière valeur, proche de 100%, implique que le modèle explique presque toute la variabilité des différentes valeurs prises par la variable dépendante (courant de fuite). La capacité de prédiction du modèle est indiquée par le coefficient  $R^2(adj) = 94,53\%$ . Cette valeur proche de 100% signifie que le modèle peut prédire de nouvelles valeurs du courant de fuite pour des conductivités volumiques et des périodes d'exposition au (UV) autres que celles obtenues expérimentalement. Les tests des hypothèses probabilistes sont donnés par les figures III.37,

III.38, III.39, III.40, III.41, III.42 et III.43. Le test de Durbin-Watson a donné une statistique « d » égale à 1,4233. Cette valeur vérifie l'absence d'autocorrélation entre les résidus.



**Figure III.35:** courant de fuite prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vierges non vieilli du lot 1



**Figure III.36 :** courant de fuite prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vierges non vieilli du lot 2

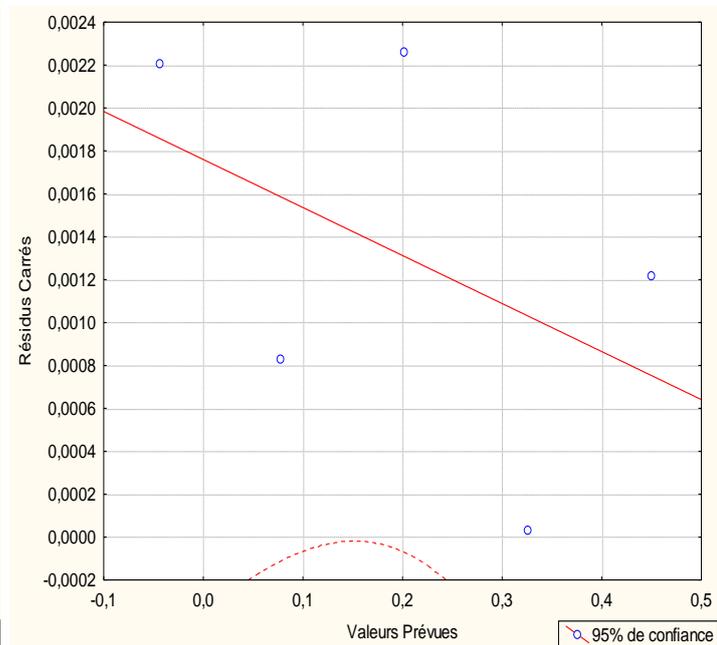
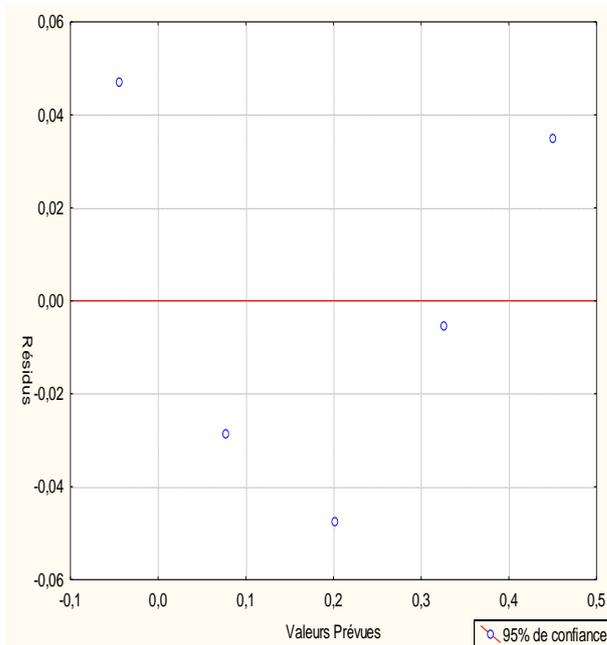
Equation de la régression du courant de fuite en fonction de la conductivité				
$I (mA) = -13.64 + 3.77 \text{ Ln}(\sigma_v)$				
Prévu	Cœf	SE Cœf	T	P
Constantes	-0.04648	0.036310	-1.28026	0.2904
$\text{Ln}(\sigma_v) (\mu S/cm)$	0.000248	0.000030	8.37	0.0035

S = 0.1997       $R^2 = 95.90 \%$      $R^2 (\text{adj}) = 94.53 \%$

Analyse de la variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Régression	1	0.152929	0.1529	70.21	0.0035
Résidu	3	0.006534	0.002178		

**Tableau III. 7:** Résultats statistiques du modèle : courant de fuite en fonction de la conductivité volumique



**Figure III.37:** Valeurs Prévues vs. Résidus

**Figure III.38 :** Valeurs Prévues vs. Résidus Carrés

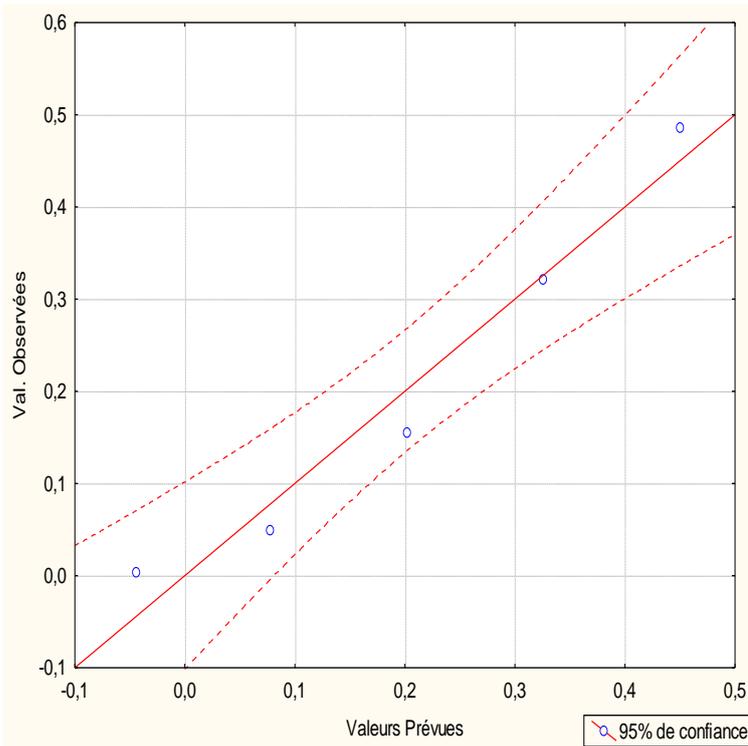


Figure III.39 : Valeurs Prévues vs. Observées

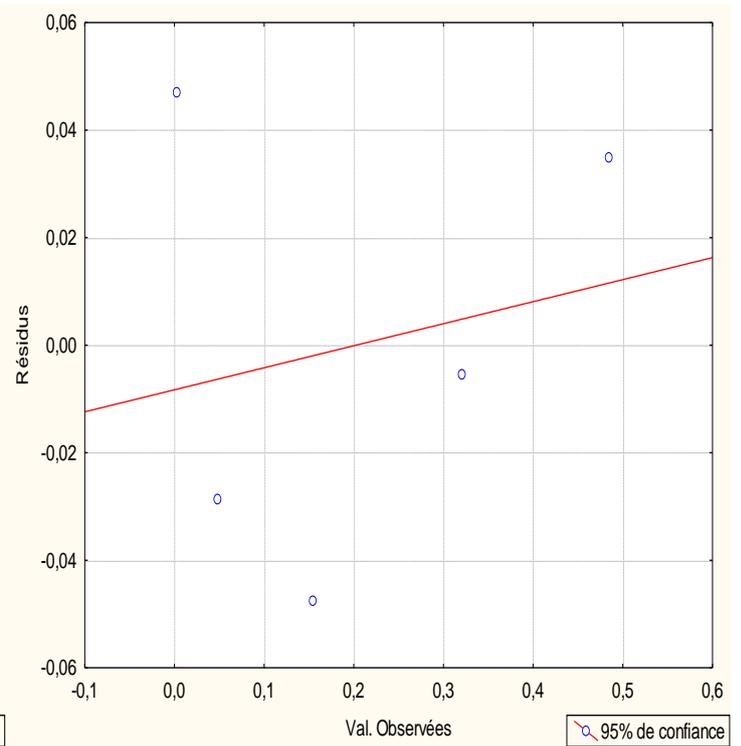


Figure III.40 : Observées vs. Résidus

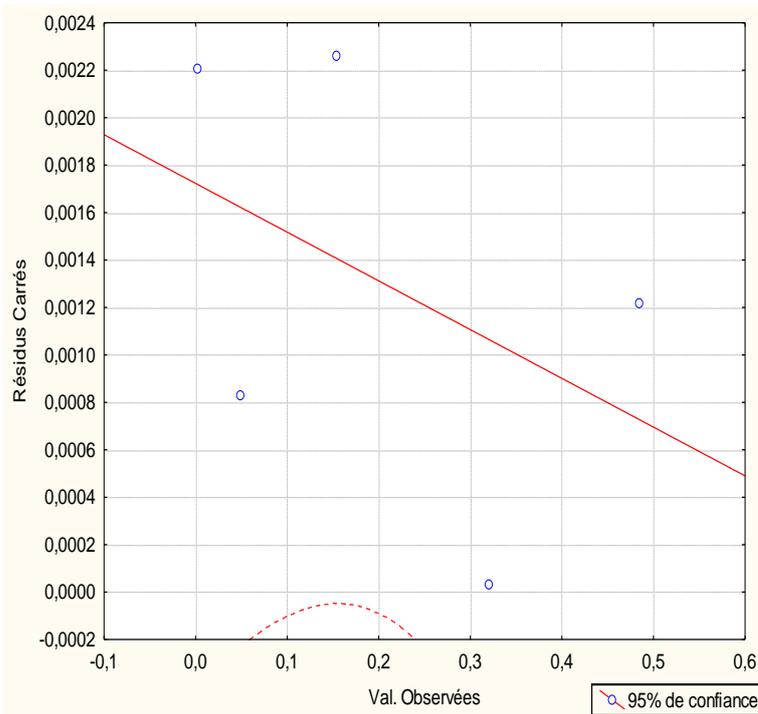


Figure III.41 : Valeurs Observées vs. Résidus Carrés

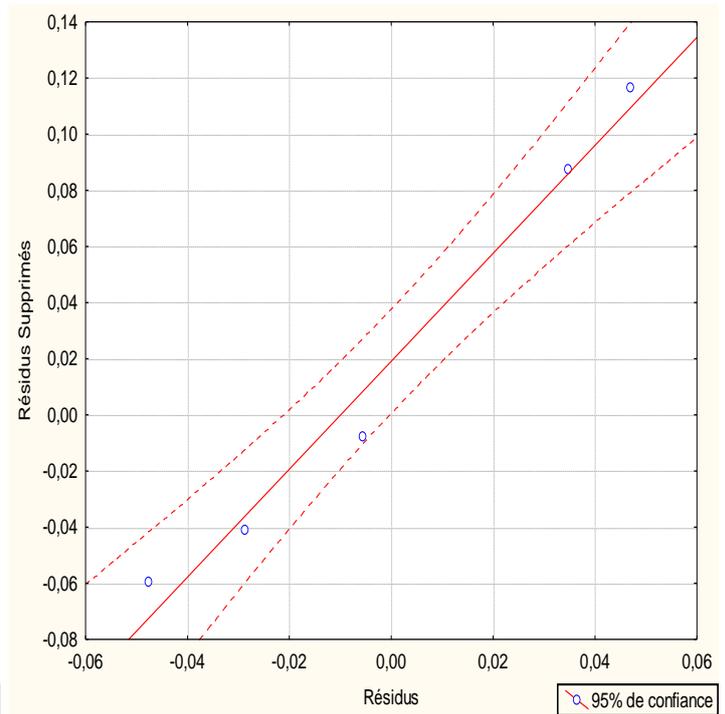
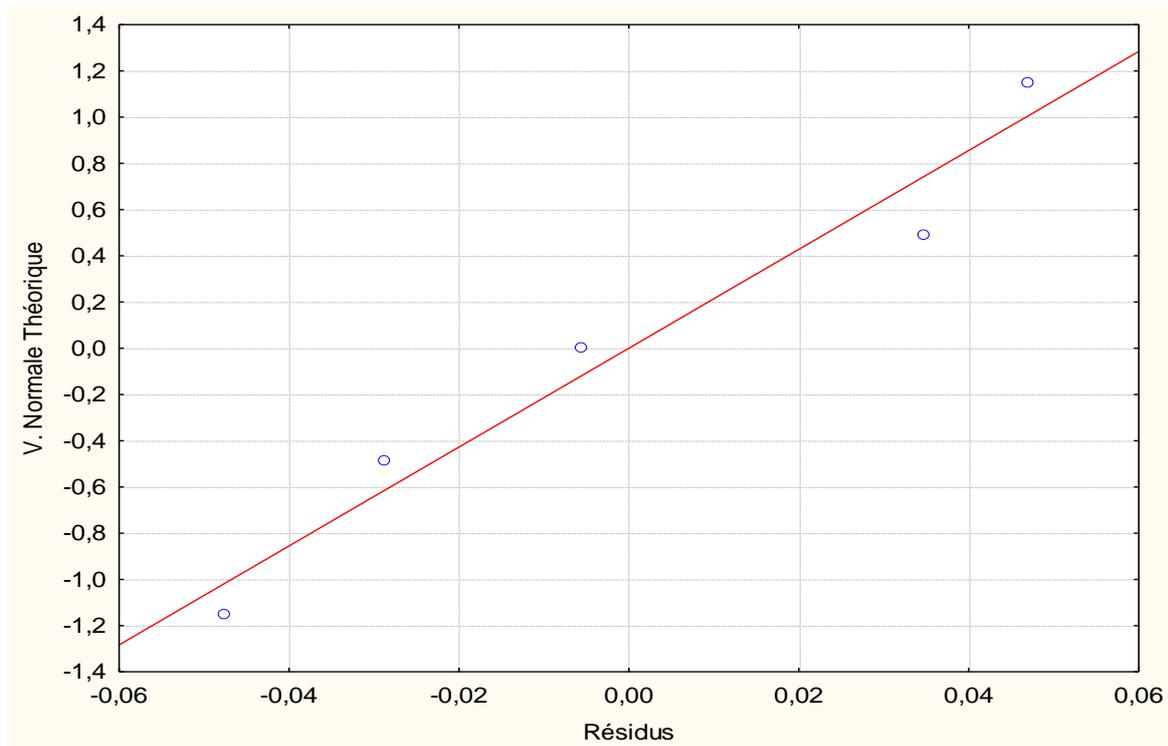


Figure III.42 : Résidus vs. Résidus Supprimés



**Figure III.43 : teste de normalité**

Le tableau III.7 montre les résultats statistiques du modèle. La faible valeur de la probabilité  $P(F_{\alpha} > F_{calculé}) = 0,0035 \ll \alpha = 0,05$  montre que le modèle de régression est significatif. Cela est confirmé par le coefficient de détermination  $R^2 = 99,99\%$  qui est très proche de 100%. Le coefficient  $R_{adj}^2 = 95,90\%$  montre que le modèle peut être utilisé pour prédire des valeurs du courant de fuite pour des niveaux de tension appliquée autres que les valeurs expérimentales.

Les figures III. 37, III.38, III.39, III.40, III.41, III.42 et III.43 présentent les tests des hypothèses probabilistes que nous avons posées. Le premier test consiste à vérifier si la variance des erreurs est constante. La figure III. 39 représente les valeurs observées en fonction des valeurs prévues. Son tracé est particulièrement utile pour identifier des groupes potentiels d'observations qui ne sont pas bien prévus.

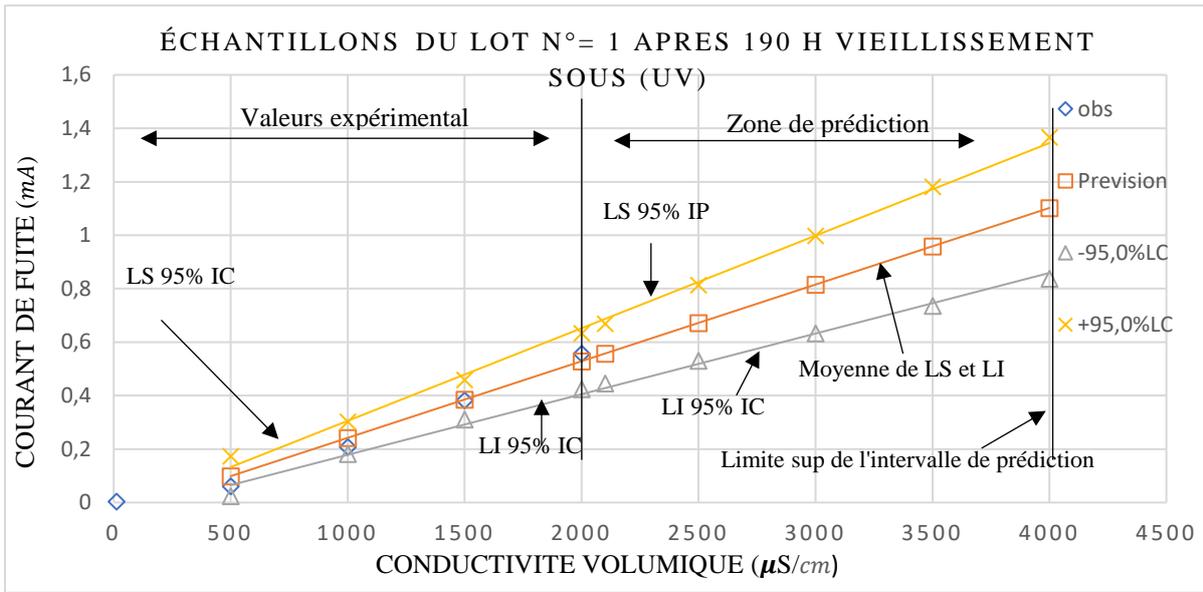
La figure III. 37 montre que les résidus en fonction des valeurs ajustées sont distribués aléatoirement au tour de l'axe des abscisses. Les résidus n'ont pas tendance à augmenter ou diminuer en fonction des valeurs ajustées, par conséquent, on peut affirmer que la variance des erreurs est constante.

La figure III. 38 montre les résidus carrés en fonction des valeurs prévues. Ce tracé est particulièrement utile pour détecter des points atypiques ou des groupes d'observations qui ont systématiquement des prévisions trop fortes ou trop faibles.

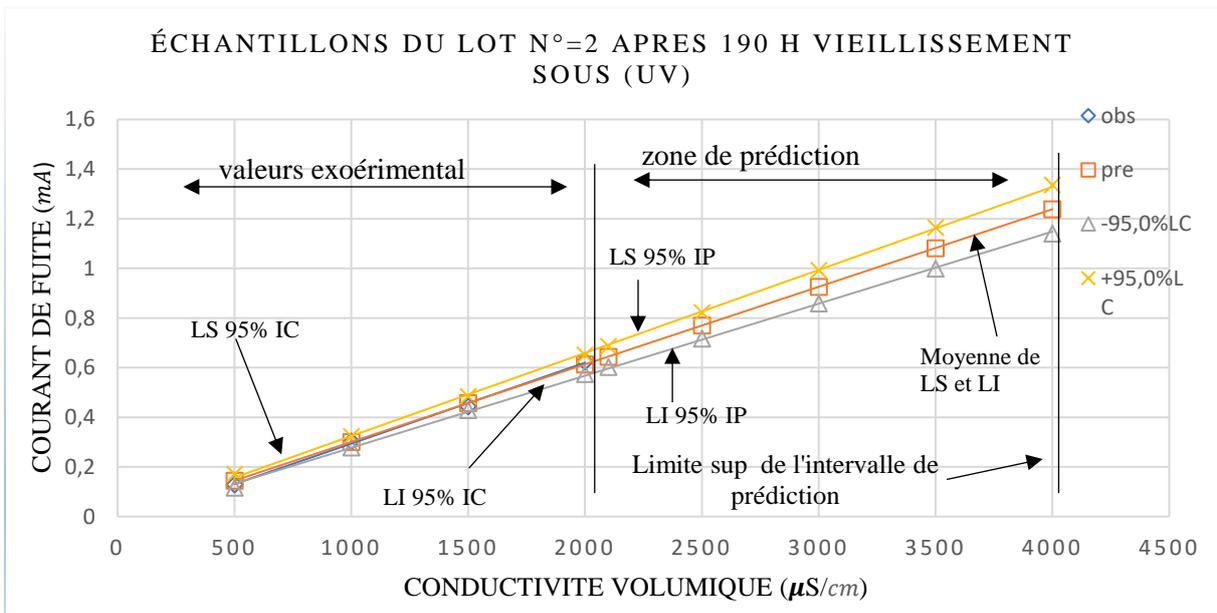
La figure III.42 représente les résidus supprimés relativement proches des résidus standardisés. On rappelle que les résidus supprimés sont les résidus qui seraient obtenus si l'observation respective était exclue de l'estimation de la régression multiple (c'est à dire des calculs des coefficients de régression). Ainsi, s'il existe de fortes divergences entre les résidus supprimés et les résidus standardisés ordinaires, on conclut que les coefficients de régression ne sont pas très stables, c'est-à-dire qu'ils sont fortement affectés par l'exclusion de simples observations.

Dans la régression multiple, on suppose que les résidus (valeurs théoriques diminuées des valeurs observées) sont normalement distribués (c'est-à-dire qu'ils suivent la loi normale). Bien que la plupart des tests (particulièrement le test du F) soient assez robustes par rapport aux violations de cette hypothèse, il est toujours bon, avant de tirer des conclusions finales, d'examiner les distributions des principales variables étudiées. La figure III.43 montre le Q-Q plot ou test de normalité. D'après ce tracé, on voit bien que les points  $(e(i); e^*(i))$  forment une droite alignée sur la diagonale principale, donc les erreurs sont distribuées selon une loi normale centrée et réduite.

Enfin la figure III.37 montre que les résidus sont distribués d'une façon aléatoire par rapport à leurs ordres. Cela signifie qu'il n'y a pas une autocorrélation entre les erreurs ou plus précisément qu'il n'y a pas une grande autocorrélation. On le vérifie par le test de Durbin-Watson qui donne une statistique « d » égale à 1.45.



**Figure III.44** : courant de fuite prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 1



**Figure III.45** : courant de fuite prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 2

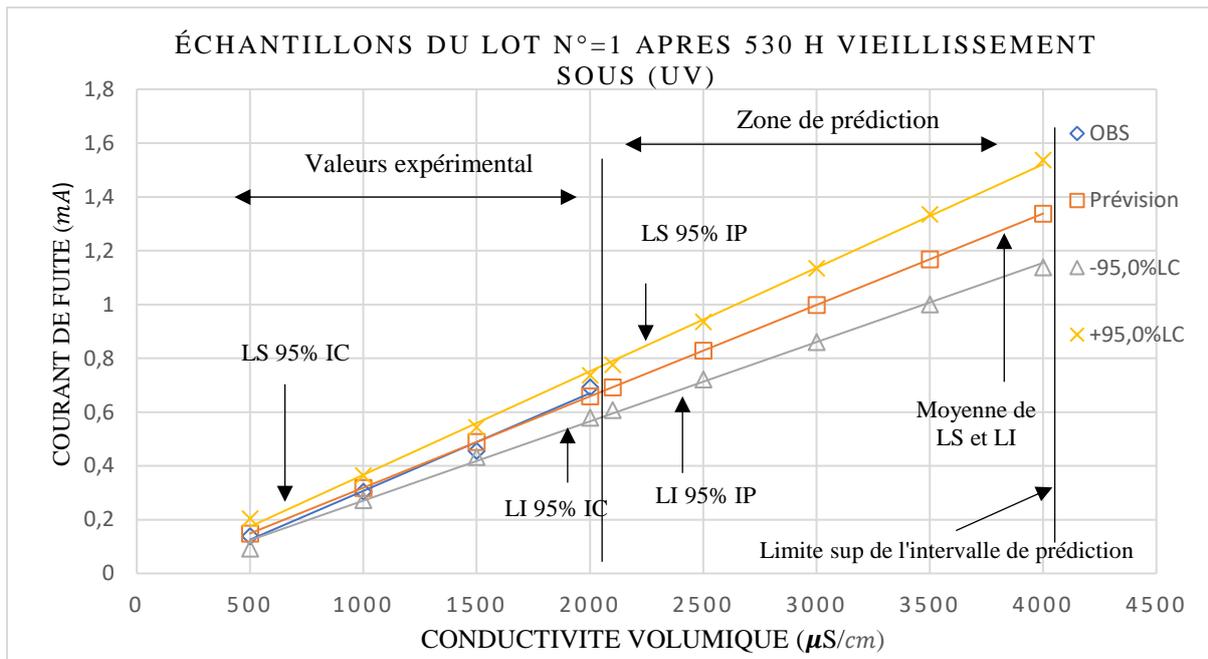


Figure III.46 : courant de fuite prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 1

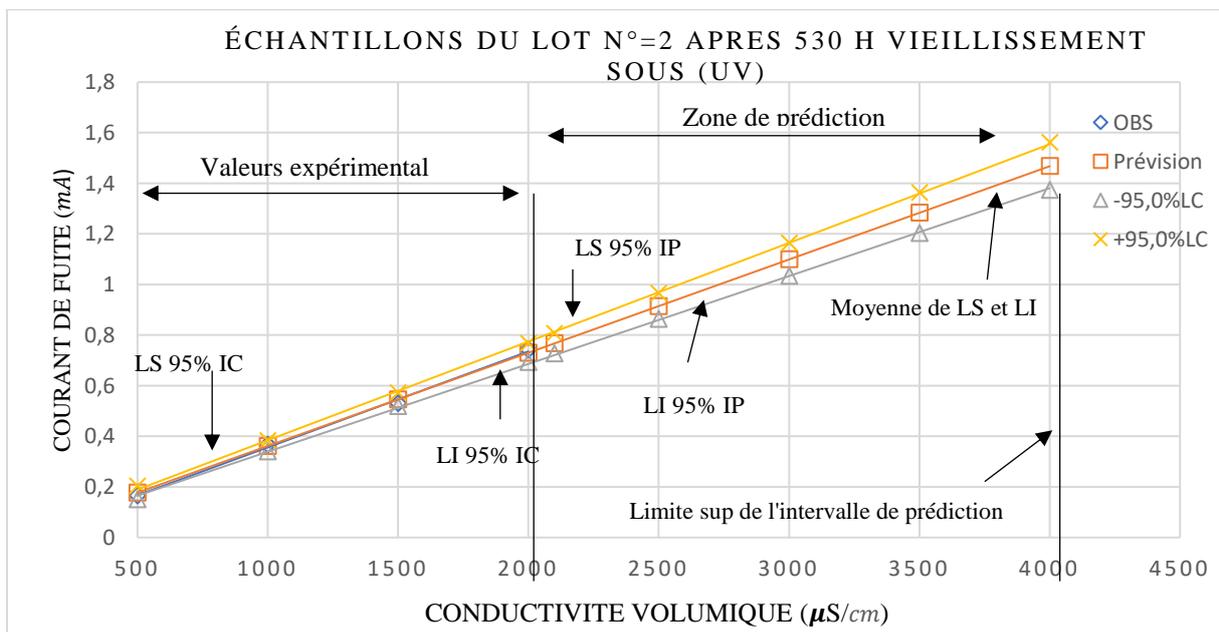
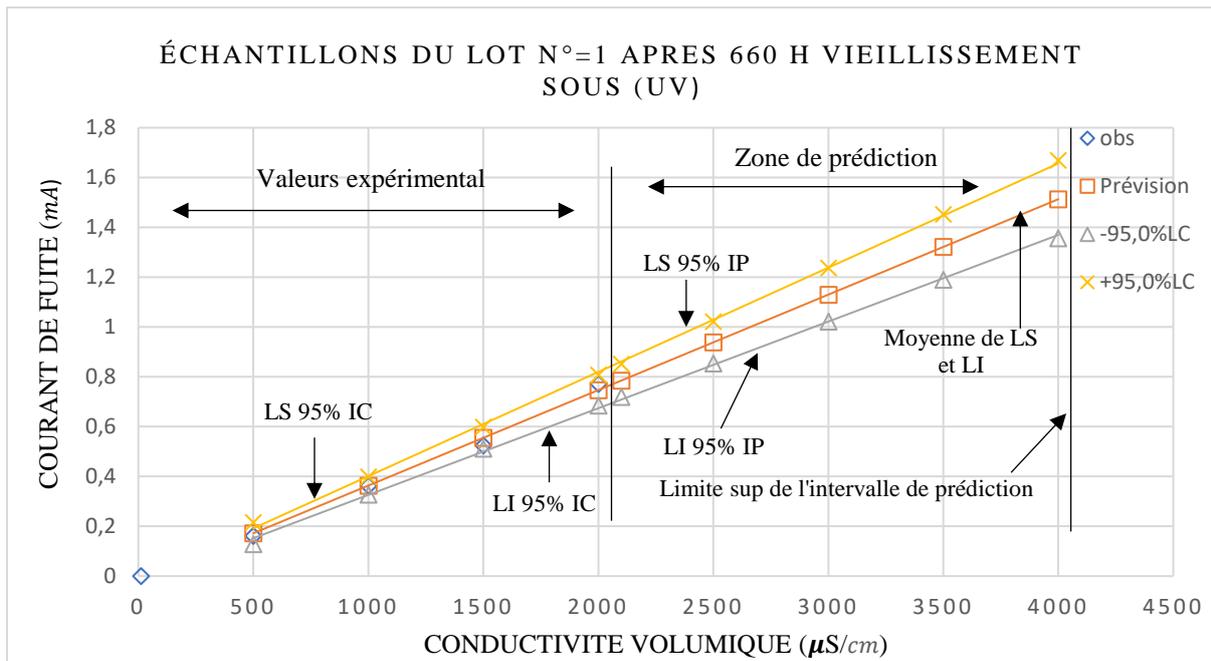
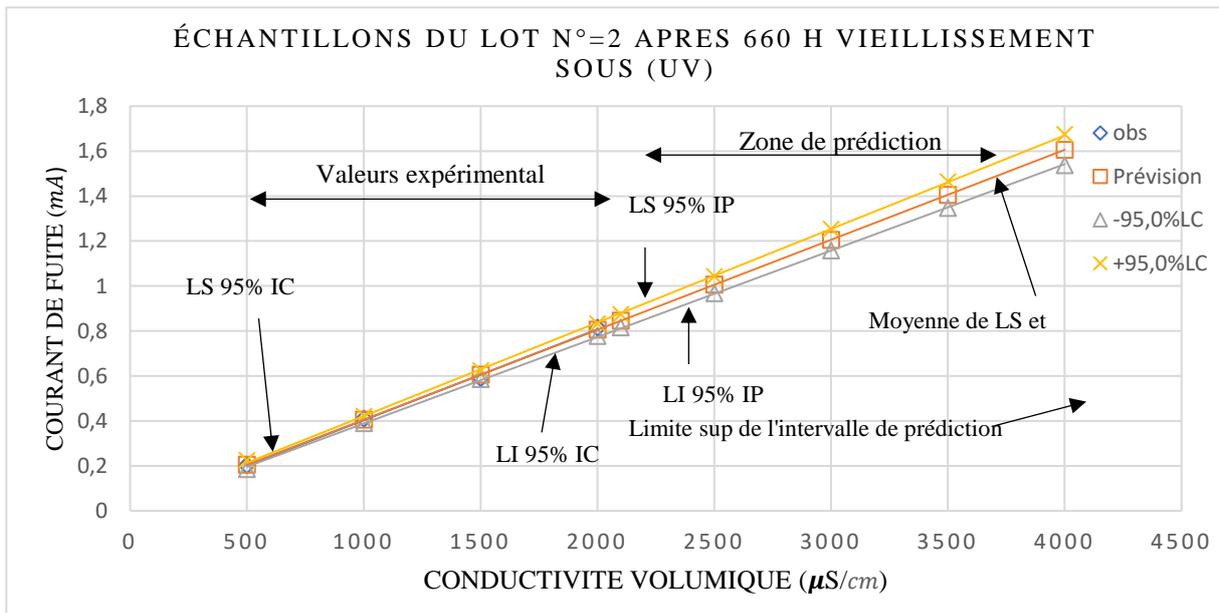


Figure III.47 : courant de fuite prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 2



**Figure III.48** : courant de fuite prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 1



**Figure III.49** ; courant de fuite prévu à 95% de l'intervalle de confiance en fonction de la conductivité de la couche de pollution pour les échantillons vieilli du lot 2.

### **III.9 Conclusion**

Plusieurs techniques statistiques sont utilisées dans le domaine des isolateurs pour l'études de vieillissement et pour la modélisation. La régression est l'une des techniques statistiques la plus utilisée pour modéliser la relation qui existe entre un groupe composé d'un certain nombre fini de variables dites explicatives avec un autre groupe formé d'une seule variable dite expliquée.

Les applications de la régression sont énormes dans la technologie, les sciences, les sciences économiques et la gestion. L'utilisation des modèles de régression est typique dans la description de données, l'évaluation de paramètres et la prévision.

Les résultats de la variation de la tension de contournement et le courant de fuite en fonction de la conductivité de la couche de pollution, des isolateurs soumis aux UV pour des diffèrent période d'exposition aux rayon UV, obtenus avec le modèle statistique sont conforme à ceux obtenus expérimentalement.

L'ajustement de la tension de contournement et de courant de fuite par la méthode de la régression linéaire a nécessité des changements de variables.

Le modèle statistique représente une très bonne alternative dans la mesure où l'expérimentation nécessite un temps laborieux. Ainsi que certaines mesures nécessitent un matériel spécial ou même techniquement impossible à réaliser.

### Conclusion générale

La tenue électrique de l'isolement d'une ligne électrique en milieu pollué est prédéterminée dans de nombreux cas par le conditionnement et la forme des isolateurs utilisés.

Les travaux expérimentaux entrepris dans le cadre de ce travail concernent l'étude des paramètres du phénomène de contournement des isolateurs en silicone vieillis sous l'action des rayons ultraviolets, et l'élaboration de modèles statistiques.

Les essais effectués au Laboratoire de Haute tension de l'université de Abderrahmane Mira de Bejaia, avaient pour objectif d'étudier le comportement d'un modèle d'isolateur en silicone.

Les prévisions théoriques des conditions de pollution conduisant au contournement d'un isolateur de dimension et de forme prédéfini sont obtenues à partir d'un modèle de prédiction statistiques développées sur la base de régression multiple.

Ce modèle a permis d'accéder à des caractéristiques de tension de contournement et de courant de fuite en fonction de conductivité et le temps d'exposition aux rayons ultraviolet.

Les significativités statistiques d'un résultat est une mesure estimée du degré auquel il est vrai.

Plusieurs tests des hypothèses probabilistes ont été posés pour assurer une bonne approximation des prévisions. Les tests réalisés se rapportant essentiellement à la constance de la variance des erreurs et la distribution normale des résidus les résultats obtenus ont permis de valider le modèle statistique développé dans le cadre de ce travail.

En conclusion on peut affirmer que les résultats obtenus au cours de ce travail de recherche ont contribué à la compréhension du comportement des isolateurs en silicone vierge et vieillis sous des rayons ultraviolets.

- Déterminer l'influence de certains paramètres métrologiques tels que les rayons UV sur la tension de contournement et le courant de fuite.
- La tension de contournement sous pollution diminue avec l'exposition prolongée aux rayons UV.
- Le courant de fuite des isolateurs en silicone pollués augmente avec l'exposition prolongée aux rayons UV.

## Références bibliographiques

---

- [1] O. Lamarene, « influence d'une barrière isolante sur la tension de claquage et sur le champ électrique », PFE Ingénieur, UAM Béjaïa septembre 2005.
- [2] F. Amir et KH. Namaoui, « étude du comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative », PFE Ingénieur, UAM Béjaïa, juin 2004.
- [3] S. VITET, «La pollution des isolateurs,» EDF-Epure, Juillet 1990
- [4] Bourim Hammoum, Ahmed Kerbouche, «Etude du Phénomène de Pollution des Isolateurs
- [5] N.BERGER, « Liquides isolants en électrotechnique », Présentation générale, Techniques de l'ingénieur, D 2470, 2002
- [6] A. Chabloz, « Technologie des matériaux a l'usage de profession de l'électricité », 1986.
- [7] <https://material-properties.org/fr/porcelaine-densite-capacite-thermique-conductivite-thermique/>
- [8] <https://material-properties.org/fr/porcelaine-densite-capacite-thermique-conductivite-thermique/>
- [9] <https://www.hoptoys.fr/jouets-sensoriels/lot-silicone-nature-p-15093.html>
- [10] Carette, M. Pouchol, Silicones, dans : Traité plastiques et composites: Techniques de l'ingénieur, 2001, A3475.
- [11] <https://www.choisir.com/energie/articles/161739/lisolant-electrique-isoler-pour-mieux-consommer#:~:text=L%27isolant%20électrique%20se%20définit,d%27où%20ses%20caractéristiques%20isolantes.>
- [12] Norme CEI 60243-1, «Rigidité diélectrique des matériaux isolants. Méthodes d'essai. Partie 1 : essais aux fréquences industrielles», 1998.
- [13] P.J.VUARCHEX, «Caractéristiques des diélectriques liquides», Techniques de l'ingénieur, Traité K 714, Janvier 1988.
- [14] El BahiAzzag, « problèmes de contournement et perforation des isolateurs de haute tension », thèse doctorat d'état, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2007.
- [15] Silicone, H.Guivier, « techniques de l'ingenieur » A3475
- [16] A.Motori, F. Sandrolini, G.C. Montanari, "Chemical, physical and microstructural properties of thermally aged XLPE cable models", IEEE, Conference Record of the International Symposium on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp. 764-768, Beijing, China, September 12-16 1988.
- [17] N.L. Singh, A. Qureshi, F. Singh, D.K. Avasthi, Effect of swift heavy ion irradiation on dielectrics properties of polymer composite films, Materials Science and Engineer-ing: B, Vol. 137, No. 1-3, pp. 85-92, February 2007.
- [18] J. Dunogues, M. Pouchard, Silicium, « ENCYCLOPAEDIA UNIVERSALIS », 2011.
- [19] L. Carette, M. Pouchol, Silicones, dans : Traité plastiques et composites: Techniques de l'ingénieur, 2001, A3475.

## Références bibliographiques

---

- [20] F. Aouabed, "contribution à l'étude d'un circuit équivalent des isolateurs synthétiques sous pollution en utilisant l'EMTP", Thèse de Magister, université Farhat Abbas Sétif Juin 2010.
- [21] P. S. Ghosh, N. Chatterjee, "Polluted Insulator Flashover Model for AC Voltage", IEEE Trans. on Dielect. And Elect. Insul., vol. 2, N°. 1, pp. 128-136, February 1995.
- [22] R. Bouzeroura « Etude du développement d'arcs électriques parallèles sur une surface isolante non uniformément polluée sous tension continue », Mémoire de magister, promotion 2009, Université de Bejaia.
- [23] Goldberg David E. 'Genetic algorithms in search, optimization and machine learning', Addison-Wesley, 1989.
- [24] Benahmed Nadia, 'optimisation de réseaux de neurones pour la reconnaissance de chiffres manuscrits isolés: sélection et pondération des primitives par l'algorithme génétique', Thèse de maîtrise, Ecole de technologie supérieure université du Québec, Montréal, 2002.
- [25] Porcheron, « Lignes aériennes : Matériels entrant dans la constitution d'une R. 2 ligne aérienne », Technique de l'ingénieur D4425.
- [26] W.Taibi, K.Abdeli, « Modèle d'un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz », Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Bab Ezzouar, Juin 2002, Alger, Algérie.
- [27] L. L.Alston, S. Zoledziowski, « Growth of discharges on polluted insulators », IEEE, Trans. PAS, Vol. 110, N°. 7, pp. 1260–1266, Juillet 1963.
- [28] A. Mekhaldi, « Etude des phénomènes de conduction et de décharges électriques sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz », Thèses de R. 3 Doctorat, ENP, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, Septembre 1999
- [29] H. H. Woodson, A.J. McElroy, « Insulators with contaminated surfaces part II: modelling of discharge mechanisms », IEEE Trans., Vol. Pas-89, N°. 8. p. 858-867, November- December 1970.
- [30] M. Tegar, « Etude Mathématique des Mécanismes de Développement des Décharges Électriques sur des Isolateurs Installés en Régions Polluées », Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Juillet 1993.
- [31] D.Dumora, "Matériaux isolants céramiques en électrotechnique", Techniques de l'ingénieur D275-1975.
- [32] D. Namane, « Effet de la discontinuité de la couche de pollution sur le comportement d'isolateur de haute tension, sous la fréquence 50Hz », Thèse de Magister Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, Février 1998.

## Références bibliographiques

---

- [33] H.Streubel, « The influence of non-uniform contamination on the flashover voltage of insulators » 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46-10,5-9 September 1983, Athens, Greece.
- [34] "Essais sous pollution artificielle des isolateurs pour haute tension destinés a courant alternatif ", norme internationale CEI507, Deuxième édition ,1991
- [35] S. BOUAZABIA, T. CHIKHAOUI, 'Méthodes d'essais sur des isolateurs pollués R. 4 dans les conditions désertiques', département de génie électrique, laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger, 1988.
- [36] E.Diday, J.Lemaire, J.pouget, F.Testu,Eléments « d'analyse de données », Edition Dunod
- [37] J-F. Dubois, « Quelques pièges cachés des méthodes de sélection de variables en régression linéaire multiple », Mémoire présente au département de mathématique et d'informatique en vue de l'obtention du grade de maitre des sciences, Janvier 2000.
- [38] S. VENKATARAMAN, R. S. GORUR, «Extending the Applicability of Insulator Flashover Models by Regression Analysis», IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, Vol.14, pp.368-374, 2007
- [39] J.Jonston, J.Dinardo, « Méthode économétriques », Edition Economica.
- [40] S.Weisberg, « Applied linear regression » Wiley series in probability and statistics.
- [41] D.Mouchiroud « Mathématiques : Outils pour la Biologie », Deug science de la vie, Université Claude Bernard, Lyons, 2003.
- [42] J.D.Salvatore, « Econométrie et statistique appliquées ». Edition Mac Graw Hill.
- [43] W.Greene, « Econométrie » 5<sup>ième</sup> édition Pearson Education .
- [44] R.Bourbonnais, « Econométrie » 6<sup>ième</sup> édition Dunod.
- [45] Z.sahli, «Étude de la non uniformité de la pollution sur les caractéristiques du contournement des isolateurs réels pollués sous tension continue », mémoire de magistère, UAM de Béjaïa, 2003
- [46] R.Boudissa,R.Baersch,A.Mekhaldi,Z.sahli, (effet de la non uniformité de la distribution sur le contournement des isolateurs),6 CNHT,5,6 et 7 Nov.2007,Taghit,Béchar,Algérie
- [47] Z.sahli and al, (prédictions paramètres of dimensioning of insulators under non-uniform contaminated conditions by multiple regression analysis),Elect.Power syst.Res.,81(4) (2011) 821-829, April 2011.
- [48] D. C. Montgomery, «Design and analysis of experiments», 6th edition, New York, John
- [49] R. Boudissa, S. Djafri, A. Haddad, R. Belaïcha. R,Baersch, « Effect of insulator shape on surface discharges and flashover under polluted conditions>>, IEEE Transaction on dielectrics and electrical insulation, Vol. 12, No. 3, June 2005, pp. 429-437.
- [50] R. Boudissa, R. Baersch, A. Haddad, Z. Sahli, «Effet de la répartition longitudinale

## Références bibliographiques

---

apériodique de la pollution sur la performance des isolateurs sous tensions alternative et continue >>,

5th international Conference on Electrical Engineering, Université de Batna, Algérie, October 27-29, 2008.