

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

Ecole Nationale Polytechnique
DER de Génie Electrique et informatique

Thèse

Présentée par :

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

M^{me} Namane Dalila (née Sator)

Ingénieur d'état E.N.P

pour l'obtention du diplôme de

Magister en Electrotechnique

Option : Haute Tension

*Effet de la discontinuité de la couche de
pollution sur le comportement d'isolateurs
haute tension, sous la fréquence 50 Hz*

Soutenue en Février 1998 devant le jury composé de :

M.M. A.Hellal.....Maître de conférence à l'ENP.....Président
A.Mekhaldi.....Chargé de cours à l'ENP.....Rapporteur
S.Bouazabia.....Chargé de cours à l'USTHB.....Rapporteur
M.Saidi.....Maître de conférence à l'USTHB.....Examineur
H.Moulay.....Chargé de cours à l'USTHB.....Examineur
A.Boubakeur.....Maître de conférence à l'ENP.....Examineur

Dédicaces

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

A mes parents,

A mon époux,

*A mes enfants chéris
Amine et Fella.*

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier vivement mes deux promoteurs A.Mekhaldi et S.Bouazabia, qui m'ont, sans hésitation, consacré une très grande partie de leur temps pour la réalisation de tous les essais effectués au laboratoire de haute tension de l'ENP.

Je profite également de l'occasion qui m'est offerte pour leur exprimer toute ma gratitude, pour leur apport scientifique précieux, leur dévouement et leur disponibilité sans faille.

Qu'il me soit permis de leur exprimer à cette occasion mon amitié la plus sincère.

Mes remerciements vont également à mon amie M^{lle} Khalèche Nadia et à M^{lle} Guerbas Saida pour les nombreux "coups de mains" qu'elles m'ont si gentiment donné lors des essais.

Je ne pourrais oublier les directives précieuses, et les discussions aussi enrichissantes que constructives que j'ai eu l'occasion d'avoir avec M.A.Boubakeur, qui, malgré un emploi du temps surchargé, m'a fait l'honneur d'avoir lu et corrigé mon travail. Qu'il trouve en ces quelques mots, mes remerciements les plus sincères.

Je ne saurais oublier de remercier également M^{lle} Khelif Fella et ma sœur M^{lle} Sator Meriem pour l'impression de cet ouvrage.

Sommaire

Introduction générale	03
Chapitre I : Rappels fondamentaux	07
I-1-Introduction	08
I-2-Pollution des isolateurs	08
I-3-Degré de pollution	09
I-3-1-Densité du dépôt de sel équivalent	
I-3-2-Conductance superficielle	
I-3-3-Courant de fuite	
I-3-4-Mesure de la pollution de l'air	
I-3-5-Mesures optiques	
I-3-6-Densité de dépôt non soluble	
I-4-Techniques de lutte contre la pollution	11
I-4-1-Allongement de la ligne de fuite	
I-4-2-Isolateurs plats	
I-4-3-Graissage périodique	
I-4-4-Revêtements silicones	
I-4-5-Les isolateurs composites	
I-4-6-Nettoyage des isolateurs	
I-5-Domains de recherche	12
I-5-1-Essais in situ et sous pollution artificielle	
I-5-2-Modèles de laboratoire	
I-5-3-Modèles théoriques et empiriques	
I-6-Conclusion	21
Chapitre II : Etude de la non-uniformité de la couche de pollution	22
II-1-Introduction	23
II-2-Travaux sur l'isolateur réel	23
II-2-1-Répartition naturelle de la pollution	
II-2-2-Travaux sous pollution artificielle	
II-2-3-Travaux de simulation	
II-3-Modèles de laboratoire	39
II-3-1-Modèle de J.Danis	
II-3-2-Modèle de M.N.Rayes et Zhirh	
II-4-Modèle de Claverie	46
II-3-1-Résultats pratiques	
II-3-2-Equations électriques	
II-5-Conclusion	48

Chapitre III : Etude expérimentale.....50

Symboles et définitions.....51

III-1-Introduction.....52

III-2-Essais expérimentaux..... 53

 III-2-1- Dispositif expérimental

 III-2-2- Modes opératoires

 III-2-3- Essais préliminaires

 III-2-4- Essais complémentaires

III-3-Interprétations des résultats.....62

 III-3-1-Courant de fuite

 III-3-2-Tension d'entretien de l'arc électrique

 III-3-3-Tension de contournement

 III-3-4-Essais sur l'aluminium

III-4-Conclusion.....101

Chapitre IV : Modèle empirique et discussion..... 103

IV-1-Introduction.....104

IV-2-Détermination de l'impédance apparente

vue des électrodes.....104

 IV-2-1- Hypothèses de travail

 IV-2-2- Détermination de l'impédance de la plaque propre

 IV-2-3- Détermination de l'impédance de la couche polluée

 IV-2-4- Impédance totale vue des électrodes

IV-3-Détermination de la tension reportée.....112

 IV-3-1-Rapport des impédances

 IV-3-2-Tension reportée U_r

IV-4-Détermination du courant de fuite 116

IV-5-Tension d'arc et contournement.....122

 IV-5-1-Tension minimale d'entretien de l'arc selon **Claverie**

 IV-5-2-Contournement : discussion

IV-6-Conclusion.....129

Conclusion générale.....131

Bibliographie.....135

Annexe.....140

Introduction Générale

Le phénomène de pollution des isolateurs peut être considéré comme un déversement continu ou intermittent d'impuretés d'origines diverses [1]. Ces impuretés peuvent provenir des flots de fumée qui s'échappent des appareils d'évacuation (pollution industrielle ou urbaine [2]), ou alors de fines particules salines dans les régions situées au bord de mer (pollution marine) [3-5]), et même de particules de sable plus ou moins fines dans les régions désertiques (pollution désertique [6-11]).

Ces particules, souvent constituées d'une combinaison de plusieurs types de pollution (pollution mixte [12-14]), portées par les vents et déposées sur les isolateurs peuvent s'accumuler sur une longue période et provoquer, lorsque l'humidité est importante, de nombreux désagréments. En effet, le dépôt polluant provoque l'existence et la persistance d'un courant de fuite plus ou moins notable sur les isolateurs, suivant la sévérité de la pollution du site considéré [15-20]. Il arrive même, lorsque le courant de fuite critique est atteint [15-20], que le contournement se produise et entraîne donc l'interruption de la ligne.

On considère que de nombreux facteurs influent sur la tenue diélectrique des isolateurs pollués. C'est pourquoi, plusieurs axes de recherches sont entrepris dans ce domaine. Les travaux peuvent être effectués dans les conditions naturelles de pollution (essais in situ) [5, 8, 9, 21] ou sous pollution artificielle (essais au laboratoire) [22].

Les essais sous pollution naturelle ont l'avantage de tenir compte de l'effet de toutes les contraintes, dans toute leur complexité, dans un site donné. L'inconvénient majeur de ces types d'essais est de nécessiter plusieurs années pour pouvoir étudier valablement les performances des isolateurs.

C'est pourquoi des essais de pollution artificielle sont souvent adoptés par les chercheurs : les isolateurs sont alors soumis à une ou plusieurs contraintes données (sévérité de la pollution, discontinuité de la pollution, polarité, etc.). Ces contraintes, fortement idéalisées en laboratoire ne sauraient en aucun cas refléter la nature réelle de la couche de pollution compte tenu des fluctuations liées aux phénomènes climatiques (longues périodes sèches, violentes précipitations, brouillard, etc.). Cependant, ces types d'essais ont l'avantage d'être rapides et sont aujourd'hui largement utilisés.

Mieux encore, on procède parfois au choix de modèles simples de laboratoire, et ce, pour contourner la difficulté liée à la forme, souvent complexe, de l'isolateur [23-25]. Le modèle doit, bien sûr, répondre à certains critères pour être adopté et le choix de ce dernier n'est pas fortuit. Il faut en effet préciser que certains modèles donnent des résultats satisfaisants, c'est à dire que leur comportement est proche de l'isolateur réel, tandis que d'autres en sont assez éloignés [26]. Notons tout de même qu'il arrive parfois que le modèle n'est

utilisé que pour observer, par exemple, un phénomène physique précis [27] (surtout le phénomène d'arcs) et qu'il n'est donc pas spécialement destiné à se substituer à l'isolateur, mais plutôt à permettre aux chercheurs de mieux cerner certains phénomènes, encore mal maîtrisés jusqu'à ce jour. Ces phénomènes concernent principalement la formation, l'entretien et la propagation de l'arc électrique sur un isolateur pollué.

De nombreux travaux ont permis d'observer que la répartition de la pollution le long de l'isolateur est très peu uniforme [5, 8, 9, 11, 21, 28]. C'est dans ce cadre que certains chercheurs ont tenté, par l'expérimentation [22] ou par la simulation [29], d'approcher le comportement de l'isolateur face à une distribution non-uniforme de la couche de pollution. Certains d'entre eux ont considéré le profil réel de l'isolateur [22, 29], tandis que d'autres ont adopté des modèles simples de laboratoire [24-25].

La plupart des auteurs [5, 8, 21] ont établi que la répartition de la pollution dépend principalement du profil de l'isolateur. D'autres paramètres, tels que par exemple le niveau de tension ou la position de l'isolateur, ont également fait l'objet de travaux sur site dont les résultats semblent assez concordant. Les résultats de ces travaux semblent montrer, en effet, qu'en général :

- * la pollution est plus élevée sur la surface inférieure de l'isolateur
- * la pollution augmente sensiblement de la zone périphérique vers la zone centrale de l'isolateur.
- * la pollution est plus importante sur les isolateurs *les plus près* de la ligne HT.
- * la pollution est d'autant plus élevée que la tension augmente.

Dans le cas de pollution artificielle, certains auteurs établissent que la rigidité la plus médiocre correspond à une répartition uniforme de la pollution [22], d'autres évaluent ce cas critique à une répartition discontinue précise de la pollution [25] : celle-ci correspondrait à une largeur critique de la zone sèche où la rigidité est la plus faible.

Dans ce travail, nous présentons une synthèse bibliographique constituée de deux chapitres. Le premier concerne une synthèse globale, non approfondie, des travaux concernant le domaine de la pollution, tandis que le second présentera de manière plus précise les travaux consacrés à la non-uniformité de la couche de pollution.

Le troisième chapitre contient les résultats d'essais sous la fréquence industrielle de 50Hz, de l'effet de la discontinuité du dépôt polluant sur le comportement d'un modèle de laboratoire. Ce modèle s'inspire de celui de **P.Claverie et Y.Porcheron** [23]. Il est constitué d'une plaque en verre, munie de deux électrodes planes. L'une est circulaire et placée sous haute tension, tandis que l'autre est rectangulaire et mise à la terre.

Les résultats obtenus concernent :

- **le courant de fuite**
- **la tension d'entretien de l'arc**
- **la tension de contournement**

Plusieurs contraintes ont été imposées au modèle :

- **le niveau de tension d'essai,**
- **la conductivité de la pollution**
- **la position de la couche polluée (côté terre ou côté haute tension).**

Nous établirons qu'il existe un régime critique à partir duquel nous obtenons une hausse brutale du courant (effet couronne, régime d'arcs).

Par ailleurs, nous constatons que :

- * **le courant de fuite** dépend de la position de la couche polluée (côté terre ou côté haute tension) lorsque le régime critique est atteint . Le courant de fuite est alors *toujours* plus élevé lorsque la pollution est côté terre.
- * **la tension d'entretien** dépend de la conductivité, cette dernière diminuant /sensiblement pour une même largeur de la zone sèche lorsque la conductivité augmente.
- * **la tension de contournement** ne dépend pas de la position pour les conductivités utilisées. Elle dépend par contre de la conductivité du dépôt polluant.

Nous présentons, dans le quatrième chapitre, un modèle empirique, établi par l'expérimentation, afin de comparer les résultats concernant le courant de fuite, présentés au chapitre précédent. Ce modèle théorique semble donner de bons résultats tant que l'isolateur garde son caractère ohmique.

La dernière partie de ce chapitre sera consacrée à la comparaison des caractéristiques de tension d'entretien d'arc et de contournement avec ceux obtenus par d'autres chercheurs. Nous observons que certains de nos résultats sont très proches de ceux de **Claverie et Porcheron** [23] et de **A.Roth** [75].

Chapitre I :

Rappels fondamentaux

I-1- Introduction

I-2- Pollution des isolateurs

I-3- Degré de pollution

I-4- Techniques de lutte contre la pollution

I-5- Domaines de recherche

I-6- Conclusion

I-1-Introduction

Le problème de la pollution se présente comme un ensemble de facteurs, tout aussi complexes les uns que les autres et provoquant par leur action commune de nombreuses perturbations dans le fonctionnement des réseaux électriques. Ils peuvent dans les cas les plus critiques, conduire au contournement des isolateurs, ce qui constitue la situation la plus grave, car conduisant à une rupture de la ligne.

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique *non approfondie* des divers aspects de la pollution des isolateurs. Il est constitué tout d'abord d'un très bref rappel des processus de conduction des isolateurs, en présence d'une couche de pollution, puis, d'une synthèse des connaissances actuelles en matière de surveillance, de maintenance et de lutte contre les perturbations causées par les phénomènes de pollution .

Nous présentons ensuite, succinctement, différents axes de recherche dans le domaine, concernant les essais sur site, en laboratoire ou sur des modèles expérimentaux.

Enfin, une dernière partie traitera de modèles théoriques et empiriques élaborés par certains auteurs, modèles élaborés en vue de mieux comprendre les processus physiques accompagnant le comportement d'isolateurs pollués.

I-2-Pollution des isolateurs

Le comportement des isolateurs pollués est un sujet d'intérêt croissant dans de nombreux pays. Cet intérêt, lié au désir de choisir au mieux l'isolation d'une ligne aérienne, est suscité par les nombreuses perturbations causées par la pollution, laquelle, déposée de manière progressive ou non, peut prendre des aspects aussi variés les uns que les autres suivant le site considéré.

Les dépôts de pollutions sur les isolateurs peuvent provoquer de nombreux incidents. Ceux-ci peuvent conduire à la longue à des situations aussi graves que le contournement et la mise hors service de la ligne d'alimentation. En effet, ces dépôts, associés à une humidité plus ou moins intense, réduisent parfois de manière considérable la résistivité superficielle de l'isolateur et provoquent donc :

- la circulation d'un courant de fuite plus ou moins important selon le degré de pollution. Celui-ci exprime la sévérité la pollution [14, 15, 17] : il peut être contrôlé régulièrement de manière à prendre des mesures de lutte contre le dépôt polluant, lorsque le courant de fuite atteint un seuil critique [15, 17]. L'intensité de ce courant doit être nécessairement très inférieure à la valeur de crête du courant de fuite, dans la demi-période précédant le contournement [16-20].

- l'apparition de décharges dues à la détérioration de l'isolement de la zone sèche face à une tension trop élevée à ses extrémités (surtout à proximité de la borne haute tension où le phénomène est accentué par l'effet couronne). Ces décharges sont dues à l'assèchement partiel de l'isolateur, là où la densité de courant est la plus élevée. Ce phénomène de conduction des zones à impédances élevées (sèches) est dû à un "report" de la tension sur ces dernières. Ces décharges peuvent également, lorsque la tension reportée devient critique contourner la zone sèche (formation d'arcs). Ces arcs provoquent des pertes d'énergies assez élevées, le courant de fuite enregistré dans ce cas étant relativement important [30]. La présence d'harmoniques [32], également importantes, peut conduire à une distorsion de la tension délivrée et à des problèmes de perturbations radio [31].
- le contournement, lorsque la longueur d'arc atteint la valeur critique. En effet, il existe toujours une longueur d'arc critique, spécifique à la répartition de la pollution et à la forme de l'isolateur, à partir de laquelle le contournement de ce dernier devient inévitable : cette longueur critique correspond, selon certains auteurs aux deux tiers de la ligne de fuite lorsque la répartition de la couche polluante est continue et distribuée de manière linéaire sur toute la ligne de fuite [23].

Toutes ces étapes, bien décrites par certains auteurs [33], constituent le processus de conduction, qui va de la simple décharge incomplète, jusqu'au court-circuit total de l'isolateur, lorsqu'il perd brutalement ses propriétés d'isolement.

Ainsi, afin de lutter contre ces perturbations, la surveillance et la maintenance des isolateurs constituent un des moyens les plus importants.

Parallèlement, des techniques de lutte comme par exemple la recherche de nouveaux matériaux ou de nouvelles formes d'isolateurs sont développés.

I-3- Degrés de pollution

Devant la gravité de certaines situations causées par la pollution des isolateurs, des dispositifs de surveillance du degré de pollution sont devenus nécessaires. Ceux-ci ont pour objectif de contrôler de la meilleure façon qui soit l'état de propreté des isolateurs. Plusieurs méthodes de surveillance de cet état sont utilisées [34]:

I-3-1-Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE)

Cette méthode, très utilisée [5, 9, 17, 34], consiste à déterminer la quantité de dépôt équivalent, exprimée en milligrammes de NaCl/cm² de la surface d'un isolateur, dont la conductivité est égale à celle du dépôt réel, dissous dans le même volume d'eau. Il suffit donc de prélever des échantillons du dépôt polluant et de les dissoudre dans une quantité d'eau donnée. On peut ainsi connaître la DDSE en fonction de la solution obtenue, de la surface de l'isolateur, du volume d'eau et de sa température.

I-3-2-Conductance superficielle

Elle s'exprime par le rapport du courant à fréquence industrielle parcourant un isolateur à la tension appliquée [34].

I-3-3-Courant de fuite

Le courant de fuite est induit par la tension de service et est mesuré au niveau de l'extrémité mise à la terre de l'isolateur [14-17].

I-3-4-Mesure de la pollution de l'air

Les mesures de pollution de l'air s'effectuent sur une période de temps donnée et permettent d'évaluer l'intensité et les caractéristiques de la pollution de l'air sur un site. Les méthodes de mesure adoptées partent du principe qu'en ce qui concerne les phénomènes de contournement, une corrélation peut être établie entre l'analyse physico-chimique de l'air sur un site et la sévérité de la pollution sur ce même site [34].

I-3-5-Mesures optiques

Le but des mesures optiques est d'évaluer l'épaisseur de la couche de pollution déposée à la surface de l'isolateur. Un dispositif à rayons lasers permet à partir des rayons réfléchis (amplitude, décalage de phase etc.) de calculer la constante diélectrique et l'épaisseur de la couche de pollution. La mesure de la sévérité de la pollution peut ainsi se faire sans toucher à cette couche [34].

I-3-6-Densité de dépôt non soluble

La densité de dépôt non soluble (DDNS) correspond à la quantité de produits polluants non solubles présents dans une couche de pollution. Elle s'exprime en mg/cm². Les mesures de DDSN s'accompagnent également souvent d'une analyse physico-chimique de la pollution, au terme de laquelle les sources polluantes peuvent être identifiées [11, 34].

I-4-Techniques de lutte

Nous présentons brièvement dans ce paragraphe les principaux moyens de lutte utilisés contre la pollution afin de prévenir autant que possible les incidents lorsque la ligne est en service [35]. Ces moyens de lutte doivent tenir compte des données propres au site considéré et du changement possible de la sévérité de la pollution due à de nouveaux facteurs (construction d'une nouvelle usine, de travaux routiers ou simplement des conditions météorologiques exceptionnelles (tempêtes de sable dans le désert par exemple, [9]). Tout ceci pour noter que même un dimensionnement initialement correct peut s'avérer insuffisant dans certaines conditions, qu'elles soient permanentes ou seulement exceptionnelles.

I-4-1-Allongement de la ligne de fuite

Elle permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution. Deux techniques sont employées :

- le changement de types d'isolateurs (pour allonger la ligne de fuite) : c'est une opération très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste [35].
- l'utilisation de prolongateur de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants [36].

I-4-2-Isolateurs plats

Tandis que les deux précédentes méthodes conduisent à allonger la ligne de fuite des isolateurs, l'utilisation d'isolateurs plats conduit à la diminuer.

En effet, ces isolateurs, sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'auto-nettoient bien sous l'effet du vent [7, 11]. Il faut noter que le vent est parfois le seul facteur d'auto-nettoyage dans certaines régions comme les régions désertiques où la pluie se fait plutôt rare et où la principale source d'humidification est la condensation.

I-4-3-Graissage périodique

Grâce à ses propriétés hydrophobes, la graisse protège temporairement les isolateurs [7, 35]. La longévité du graissage dépend à la fois de l'environnement et de la qualité du produit. Elle est généralement comprise entre 1 et 4 ans [35]. Le graissage est largement utilisé dans le monde, mais l'opération est pénible, longue et coûteuse. De plus, elle nécessite une interruption de service.

I-4-4-Revêtements silicones

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc siliconé [8] qui vulcanise à température ambiante la surface des isolateurs. Ce revêtement, possédant également des propriétés hydrophobes, protège les isolateurs et améliore leur tenue sous pollution. Par contre, sa longévité est en général nettement supérieur à celle des graisses.

I-4-5-Les isolateurs composites

Il sont constitués d'un noyau de fibre de verre imprégné d'une résine et de revêtement à ailettes de type élastomère. Ces isolateurs présentent l'avantage d'une grande légèreté alliée à une haute résistance mécanique que lui confère le noyau. Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévère [37]. Cependant ces isolateurs présentent le désavantage de vieillir sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électriques et mécaniques) [35].

I-4-6-Nettoyage des isolateurs

- * **Le nettoyage manuel** ou **le lavage hors tension** peuvent être utilisés de façon périodique, en particulier dans les postes. Comme ces méthodes sont utilisées hors tension, elles entraînent nécessairement des interruption de service parfois assez longue. Aussi, il faut limiter autant que possible leur utilisation.
- * **Le lavage sous tension** permet d'éviter ces coupures. Dans son principe, ce type de lavage permet de garder propre l'isolateur. Ce dernier est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans les deux cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau de lavage, le processus de lavage, les distances de sécurité à respecter, afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage [35].
- * **Le nettoyage des isolateurs à l'aide d'un abrasif** pulvérisé sous pression est une technique utilisée dans certain pays (Amérique du nord en particulier). Cette technique permet le nettoyage d'isolateurs recouverts de pollution très adhérente (ciment, par exemple), et peut être utilisé pour dégraisser les isolateur [35].

I-5-Domains de recherche

Devant les innombrables problèmes causés par la pollution, et que nous avons décrits dans les paragraphes précédents, de nombreux travaux expérimentaux sont effectués in situ (**pollution naturelle**) ou au laboratoire (**pollution artificielle**).

Ces essais ont pour objectif d'étudier et donc de prévenir autant que possible les incidents électriques, résultat d'un dépôt plus ou moins admissible

de pollution. Il est évident qu'il y aurait avantage à effectuer les essais sur isolateurs dans les conditions naturelles locales, plutôt que d'avoir recours à des essais artificiels. Cependant, les essais de pollution naturelle tendent à être de longue durée et donnent des résultats capricieux. D'où la nécessité de développer les techniques d'essais sous pollution artificielle.

Parallèlement, et devant le nombre incalculable de paramètres pouvant intervenir dans le comportement des isolateurs, des **modèles de laboratoires**, se prêtant mieux aux essais de par leur simplicité géométrique sont parfois adoptés par les chercheurs.

Les recherches actuelles sont également axées sur l'élaboration de **modèles théoriques** permettant de simuler le comportement de l'isolateur grâce à des formulations mathématiques. Notons que ces travaux sont souvent une combinaison de formules empiriques et de formules illustrant le phénomène physique. Ces travaux doivent être ensuite validés par des comparaisons entre les résultats expérimentaux et théoriques.

D'autres travaux, utilisant également des formulations mathématiques, sont par contre purement **empiriques**, c'est à dire qu'ils sont établis exclusivement à partir de résultats expérimentaux.

I-5-1-Essais in situ et au laboratoire

D'innombrables essais in situ ont été effectués de par le monde. Ceux-ci ont concerné un nombre impressionnant de paramètres influant sur le contournement.

Parallèlement, des essais sous pollution artificielle ont été élaborés sur de nombreux types d'isolateurs. Le but de ces essais est de reproduire au mieux un dépôt de pollution comparable à celui résultant de la pollution naturelle. C'est ainsi que les résultats de diverses méthodes de pollution artificielle sont parfois comparées aux résultats de pollution naturelle [17, 38, 39].

Notons que les essais de pollution artificielle doivent répondre à certaines normes bien définies [40], afin de pouvoir reproduire les mêmes conditions de travail pour l'ensemble des chercheurs, et par la même, permettre une exploitation valable des résultats.

Nous présentons très brièvement les principaux paramètres considérés par l'ensemble des chercheurs:

a-La conductivité du dépôt polluant :

Elle constitue la première étape du processus de conduction de l'isolateur. Exprimée souvent en DDSE, elle concerne l'ensemble de toutes les recherches dans ce domaines. La DDSE peut être très élevée, même dans les zones les plus arides comme les régions désertiques où l'humidité, loin d'être négligeable peut conduire, en concomitance avec les grains de sable à un courant superficiel relativement important.

Il arrive que dans les régions du Sahara Algérien, la variation diurne de l'humidité devienne très importante [11, 45] : elle peut être de 30 à 40 % au

milieu de la journée pour atteindre 80 à 100 % au levé du jour.

b-Les conditions météorologiques :

Celles-ci dépendent de la situation géographique du site considéré. Une identification météorologique de la région est alors envisagée pour prévenir les possibles incidents à une époque de l'année, par exemple [11, 15, 41, 45]. Les conditions météorologiques (humidité, vents, brouillard, insolation, température, précipitations, etc.) ont un lien très étroit avec le comportement de l'isolateur. Elles peuvent soit favoriser l'auto-nettoyage de ce dernier (pluie, vent), soit conduire parfois à des situations de pollution très critiques dans un temps relativement court (cas de tempêtes de sable par exemple [9]). C'est pourquoi le climat constitue le facteur le plus décisif (et le plus aléatoire) dans le contournement de l'isolateur.

c-Nature de la pollution :

On distingue plusieurs aspects de la pollution que nous énumérerons comme suit :

*** pollution marine**

Celle-ci est constituée de particules salines dans les régions situées au bord de mer [3, 4, 5].

*** pollution industrielle et urbaine**

La pollution industrielle concerne toutes les impuretés provenant des flots de fumée qui s'échappent des appareils d'évacuations [2].

*** pollution rurale**

Celle-ci est constituée d'engrais ou de pollen dans les régions rurales.

*** pollution désertique**

Celle-ci est très contraignante dans les pays qui possèdent des lignes dans des régions désertiques (Algérie, Egypte, Arabie, etc.) et est constituée de fines particules de sable [6, 8, 9, 10, 11] s'incrétant sur la surface de l'isolateur.

*** pollution par dépôts de glaces**

Elle concerne les pays très froids comme le Canada par exemple [42, 43] où le gel forme une "carapace" sur les chaînes d'isolateurs et compromet alors la tenue électrique et mécanique des isolateurs.

*** Pollution mixte**

C'est en fait la plus fréquente : elle est constituée d'une concomitance entre les différents types de pollution [12-14].

d-Profil de l'isolateur :

Celui-ci comprend non seulement la ligne de fuite, mais également le type d'isolateurs (capot-tige, long fut, isolateur plat, etc.). Tous les types d'isolateurs ne conviennent pas forcément à telle ou telle région. C'est pourquoi des essais doivent être effectués pour choisir au mieux l'isolation spécifique à un site donné [4, 5, 8, 15, 18, 41, 44] : par exemple, les isolateurs plats sont recommandés dans le désert ainsi que nous l'avons noté dans les paragraphes précédents [8, 45].

e-Nature de l'isolateur :

Elle peut également jouer un rôle non négligeable dans la tenue d'isolateurs. Elle peut prendre divers aspects comme le revêtement de l'isolateur de caoutchouc siliconé [7, 8] ou de couche semi-conductrices [9, 7, 46]. L'isolateur peut être également constitué en résine époxy [7, 8], polymère [47] ou bien en matière composite [37]. Il faut cependant être prudents car de bonnes caractéristiques électriques et mécaniques ne sont pas le seul critère de choix, d'autres paramètres tels que la tenue thermique ou le vieillissement doivent être également pris en considération [9, 35].

f-Position de l'isolateur :

La répartition de la pollution n'étant jamais uniforme, la position de l'isolateur permet de modifier la répartition de la couche polluante, ce qui devrait influencer sur la tenue de l'isolateur. Elle peut être verticale, horizontale, ou alors inclinée [22, 48].

Certains essais effectués n'ont pas permis de montrer clairement une différence entre les deux premières configurations sus-citées, en ce qui concerne le contournement, bien que l'on ait observé que les chaînes horizontales retenait moins de pollution que les chaînes verticales soumises aux mêmes contraintes [22].

Des travaux récents [48], ont cependant tranché en observant que la position horizontale serait beaucoup plus avantageuse du point de vue rigidité, l'écart observé entre les deux configurations se situant autour de 20 à 30%.

g-La longueur de la chaîne d'isolateurs :

Il a été montré que la longueur de la chaîne provoque non seulement une répartition inégale du potentiel pour chaque élément de la chaîne, (due probablement aux capacités parasites de chacun d'eux avec la terre et avec le conducteur sous tension), mais également a pour effet une répartition non uniforme de la pollution, les éléments les plus près de la borne haute tension étant plus pollués que ceux près de la terre [22, 37].

Ce phénomène pourrait être dû au pouvoir attractif de l'électrode haute tension où le champ est le plus élevé.

h-la polarité :

Dans le cas d'une source continue, la polarité joue également un rôle non négligeable dans le comportement des isolateurs. Divers essais ont en effet montré que les tenues en polarité positive constituent la contrainte la plus sévère pour les réseaux électriques à très haute tension [33].

Certains auteurs ont toutefois obtenu des résultats contraires concernant la tenue de certains types d'isolateurs [22]. D'autres travaux, concernant la pollution par dépôts de glace, ont confirmé également que la polarité négative constitue le cas le plus critique [43].

On en déduit forcément qu'il n'y a pas de règles précises sur l'influence de la polarité, celle-ci dépendant probablement des conditions d'expériences et des contraintes appliquées.

I-5-2-Modèles de laboratoire

Afin de contourner la difficulté liée à la configuration souvent complexe de l'isolateur, des modèles de laboratoires ont été adoptés par un certain nombre de chercheurs. Si quelques modèles reflètent assez bien le comportement de l'isolateur, d'autres par contre en restent assez éloignés [26].

Il existe donc des modèles "meilleurs" que d'autres, bien que certains d'entre eux ne servent parfois qu'à étudier un phénomène bien précis (arc, par exemple [27], lequel constitue un facteur peu maîtrisé), et ne sont donc pas destinés à se substituer à l'isolateur. Ces modèles 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.).

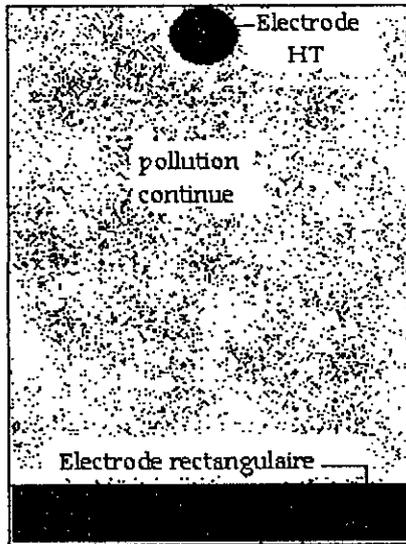
Nous citons brièvement quelques uns de ces modèles, les plus utilisés.

a-Modèles plans :

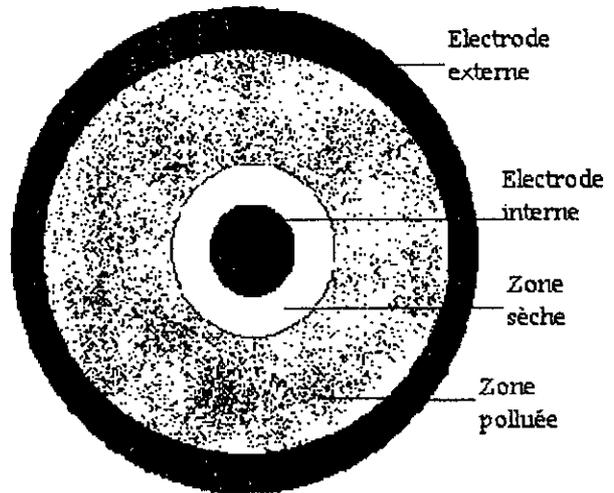
Le modèle plan le plus utilisé est celui considéré par **Claverie et Porcheron** [23] (1973). Celui-ci est constitué d'un modèle plan, muni de deux électrodes planes et recouvert d'une couche de pollution. L'électrode mise sous tension est circulaire et disposée à une distance donnée de l'électrode terre, laquelle est rectangulaire (figure I-1-a).

Antérieurement (1970), **Woodson et McElroy** [49] ont proposé un modèle plan à géométrie circulaire (figure I-1-b). Celui-ci ne donna pas de résultat satisfaisant, sans doute parce que la configuration proposée est trop éloignée de celle de l'isolateur.

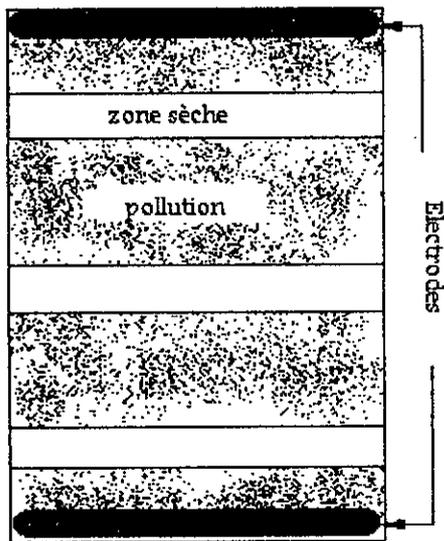
Plus tard, un autre modèle plan, tenant compte de la discontinuité de la couche de pollution a été proposé par **J.Danis** [24] (1983)(figure I-1-c). Celui-ci comprend plusieurs zones sèches en alternance avec les zones polluées (nous y reviendrons avec plus de détails dans le prochain chapitre).



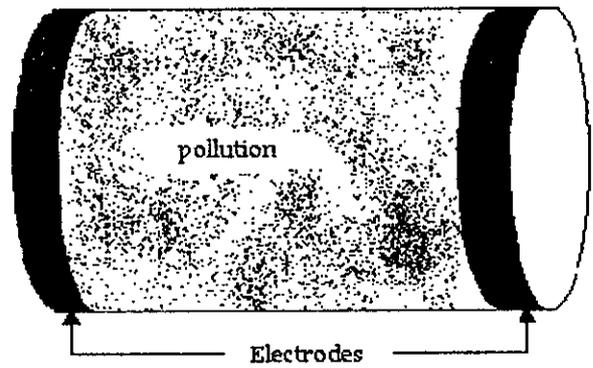
a-Modèle de Claverie et Porcheron [23]



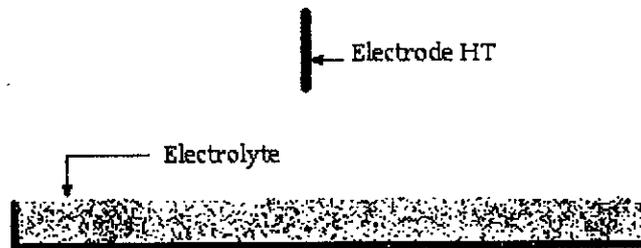
b-Modèle de Woodson Mc Elroy [49]



c-Modèle de J.Danis [24]



d-Modèle d'Alston et Zoledzowski [50]



e-Modèle de Wilkins [52]

FigI-1 : Modèles de laboratoire

b-Modèle cylindrique (Alston et Zoledzowski) [50] (1963)

Il est constitué d'un cylindre muni de deux électrodes, ces dernières étant disposées tout autour des extrémités du cylindre (figure I-1-d). Ce modèle sera adopté plus tard par d'autres auteurs [51].

c-Modèle de Wilkins [52]

Celui-ci, utilisé également plus tard par d'autres auteurs [27], 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 (voir figure I-1-e). Ce modèle est très utilisé pour étudier le critère de propagation de l'arc [27].

Tous ces modèles ont permis par la simplicité de leur configuration, d'examiner aisément l'influence de nombreux paramètres (tension appliquée, distance inter-électrodes, conductivité, rayon de courbure de l'électrode HT, épaisseur de la pollution, couche discontinue de pollution, etc.) sur le comportement de l'isolateur (courant de fuite, contournement, tension d'entretien de l'arc, etc.) [53-56].

I-5-3-Modèles théoriques et empiriques

Il serait très intéressant et surtout très pratique de pouvoir simuler *sans effectuer d'essais* le comportement d'isolateurs pollués (courant de fuite, arcs, contournement, etc.). En fait, cela réduirait de façon impressionnante le budget alloué à la recherche dans ce domaine. Malheureusement, la connaissance précise des phénomènes physiques liés à la pollution est loin d'être au point.

Aussi, les modèles théoriques proposés par de nombreux chercheurs, comportant souvent une multitude d'hypothèses simplificatrices, ne peuvent en aucun cas se substituer aux essais sur isolateurs réels.

Cependant, ces modèles sont souvent très utiles pour comprendre d'une manière qualitative (et même parfois quantitative lorsque le modèle est bon), les phénomènes physiques liés aux différents processus de conduction de l'isolateur par développement de l'arc électrique.

a-Modèles en courant continu

Nous devons aux travaux d'**Obenaus** (1958) [57], les équations théoriques de base. Ces équations, élaborées pour une tension continue, sont en effet indispensables pour comprendre le mécanisme de contournement d'un isolateur pollué.

En fait, le principal problème théorique rencontré par les chercheurs est la connaissance des phénomènes liés aux champs très élevés lesquels enlèvent à toute matière son caractère ohmique. L'arc électrique fait partie de ces phénomènes, difficiles à cerner sur le plan physico-mathématique.

Obenaus surmontera la difficulté en proposant une expression empirique du champ interne de l'arc électrique. Cette expression, utilisée dans l'équation électrique de l'ensemble arc-couche polluée conduira à un critère d'entretien de l'arc. Ce critère (dédit de l'équation électrique reliant les trois variables : la tension appliquée, le courant parcourant l'arc en série avec la couche polluée et la longueur de l'arc) exprime la nécessité d'une tension minimum U_c , associée à un courant critique I_c , pour l'apparition d'un arc donné de longueur x . Ce résultat sera ensuite repris et complété par la plupart des auteurs. Plusieurs améliorations y seront donc introduites pour approcher au mieux l'isolateur réel. Nous en présentons ci-dessous quelques unes de ces améliorations.

∅ la répartition de la pollution

l'hypothèse d'une répartition uniforme de la pollution par unité de longueur de fuite fut envisagée par Neumärker [58](1959).

∅ le critère de propagation de l'arc

Hampton [59] (1964) compléta les travaux sur les critères d'apparition de l'arc en établissant un critère de propagation de l'arc qui nécessite un champ électrique dans l'eau supérieure au champ intérieur de l'arc.

Ce critère fut complété plus tard par Hesketh [60] (1967) qui fait l'hypothèse que l'arc se modifie automatiquement de manière à rendre maximal le courant qu'il tire de la source d'alimentation.

Wilkins et Al-Baghdadi [61] (1971) supposèrent un accroissement du courant critique I_c dû à l'impédance de la couche mouillée en parallèle avec l'air ionisé durant le processus de transition.

∅ L'approche plus réaliste du profil de l'isolateur

Afin de tenir compte de l'aspect réel de l'isolateur, qui cadre mal avec le modèle à une répartition uniforme de la pollution, Obenaus et Boehme [62] (1966) ont considéré que l'isolateur était équivalent à deux couches résistantes en série, de résistances linéiques différentes. Cette distinction s'est faite dans le but de tenir compte de la forme de la jupe de l'isolateur.

Bien plus tard, R.Sundarajan et R.S.Gorur [29] (1993) proposeront un modèle théorique qui tiendra compte d'une part de la forme réelle de l'isolateur, puis du comportement dynamique de ce dernier d'autre part. Un programme informatique de calcul fut établi par ces auteurs pour déterminer la tension de contournement pour différents types d'isolateurs soumis à des couche plus ou moins conductrices.

Une non-uniformité de la couche de pollution a même été envisagée (nous y reviendrons de manière plus précise dans le chapitre II) : Des essais ont été effectués pour valider le modèle et qui ont montré une corrélation relativement bonne entre les résultats théoriques et expérimentaux.

b-Modèles en courant alternatif

Sous tension alternative, le problème se complique davantage du fait de l'extinction de l'arc deux fois par période. Il est donc apparu nécessaire d'établir un critère de réamorçage de l'arc partiel (par analogie au critère d'entretien en courant continu).

Des équations théoriques ont alors été proposées par **Maikopar** [63] (1965) qui considère un modèle par rupture énergétique lequel attribue à l'arc une résistance non ohmique et qui s'exprime en fonction de la fréquence d'alimentation et d'une constante de temps. Cette constante de temps prendra deux valeurs distinctes : l'une pour la période précédant l'annulation du courant, et l'autre pour la période lui faisant suite.

Un critère de réamorçage de l'arc a été donc déduit à partir de cette résistance, critère qui impose une tension minimum U_c (comme pour le modèle en continu) pour le réamorçage d'un arc de longueur x .

Cependant, ce modèle théorique ne donna pas de résultats satisfaisants lors des comparaisons avec les mesures effectuées bien plus tard par **Claverie et Porcheron** [23] (1973) concernant la relation entre U_c et x .

Un autre modèle théorique établi par **Rizk** [64] (1971) propose un critère de réamorçage par rupture diélectrique. Celui-ci se fonde sur l'hypothèse que la *conductance électrique* de l'arc résiduel devient quasiment nulle au moment de l'annulation du courant. En fait, ce modèle suppose l'arc de forme cylindrique et de rayon variable r_a . Ce rayon dépendra non seulement de la valeur instantanée du courant, mais également des conditions ambiantes. Le modèle fera intervenir des conditions aux limites concernant les températures axiales ($r=0, T=3000^\circ$), et latérale ($r=r_a, T=300^\circ$) de l'espace résiduel, c'est à dire au moment de l'annulation du courant. Il sera établi ensuite une expression de la rigidité de cet espace résiduel chaud en fonction de la rigidité de l'espace à la température ambiante, du temps, ainsi que du rayon r_a .

Le critère d'amorçage sera ainsi corrigé en tenant compte de la nouvelle expression de la rigidité du plasma résiduel.

D'autres modèles purement empiriques, donc *établis uniquement par expérimentation* sont proposés, comme, par exemple, celui de **Hurley et Limbourn** [65] (1969), qui établit un critère d'entretien de l'arc en alternatif à partir d'une formule empirique simple, formule qui sera modifiée un peu plus tard par **Claverie et Porcheron** [23] (1973).

Notons que plusieurs des modèles décrits ci-dessus sont très bien synthétisés par **F.A.M.Rizk** [66] (1981).

I-6-Conclusions

Cette brève synthèse bibliographique, touchant l'ensemble des préoccupations des chercheurs dans le domaine de la pollution, car regroupant des aspects aussi variés que la surveillance sur site des isolateurs ou la recherche purement théorique de modèles mathématiques, nous a permis d'avoir une vue d'ensemble de la gestion des phénomènes liés à la pollution.

Loin d'être approfondie, car elle n'entre pas dans le cadre précis du sujet traité dans cette thèse, cette synthèse nous a tout de même apporté un grand nombre de connaissances qui nous serviront dans les prochains chapitres.

Nous avons choisi délibérément de ne pas présenter les équations mathématiques liées aux différents modèles présentés, afin de ne pas alourdir le texte, et de considérer uniquement l'aspect essentiel de ce qui touche au domaine de la pollution.

Dans le prochain chapitre, une recherche bibliographique plus détaillée car concernant de plus près le thème de notre étude sera présentée.

Chapitre II

Etude de la non-uniformité de la couche de pollution

II-1-Introduction

II-2-Travaux sur isolateurs réels

II-3-Modèles de laboratoire

II-4- Modèle de Claverie

II-5-Conclusions

II-1- Introduction

Nous présentons tout d'abord dans ce chapitre les principaux travaux d'observations et de mesures effectués sur site, et concernant principalement la répartition de la pollution le long de :

- * la chaîne d'isolateurs
- * la surface de l'isolateur

En effet, la distribution de la pollution sur les isolateurs est loin d'être uniforme. Cette non-uniformité peut être due à de nombreux facteurs :

- ◆ la forme de l'isolateur et de ses capacités d'auto-nettoyage
- ◆ la position des isolateurs (horizontale, verticale ou alors inclinée)
- ◆ la position de l'isolateur par rapport à la borne haute tension
- ◆ la position des isolateurs par rapport à la direction du vent
- ◆ les conditions climatiques.

Un autre paragraphe traitera de travaux sous pollution artificiel. C'est ainsi que, afin de respecter la distribution naturelle de la pollution, des essais avec des couches discontinues ont été pris en compte par les chercheurs. Certains d'entre eux ont considéré l'isolateur réel et ont donc procédé à une répartition répondant au mieux à la distribution naturelle de la pollution.

D'autres auteurs ont étudié de manière purement mathématique (simulation) le contournement sous pollution discontinue, les résultats ont ensuite été validés par la comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux.

Une dernière partie traitera des modèles de laboratoire, ceux-ci permettant d'une manière plus aisée d'observer les phénomènes physiques et d'établir une formulation mathématique simple pour décrire le comportement de l'isolateur.

II-2-Travaux sur isolateurs réels

II-2-1-Répartition naturelle de la pollution (essais in situ)

De nombreuses stations d'essais ont été conçues et installées sur des sites pollués à travers le monde. Ces stations ont pour but d'observer et d'analyser le degré de pollution et donc de mieux dimensionner les isolateurs correspondant à ces mêmes sites. C'est ainsi que de nombreux travaux ont permis d'observer que la répartition de la pollution le long de l'isolateur est très peu uniforme. Ce paragraphe a justement pour objectif de rassembler les principaux travaux d'observations et de mesures effectués dans les conditions naturelles de pollution (essais sur sites).

a-Pollution marine

Des travaux sur site, effectués dans plusieurs stations de mesure placées à différentes distances de la mer, ont permis à **T.Keller-Jacobsen** [5] (1978), d'évaluer d'une part le degré de pollution et d'autre part, d'établir une distinction entre la pollution sur la surface supérieure de l'isolateur et sur la surface inférieure de l'isolateur. Le degré de pollution est ainsi mesuré sur de nombreux types d'isolateurs. La méthode utilisée sera celle de la Densité du dépôt équivalent (DDSE) (voir chapitre I), en prenant soin de différencier le "côté de dessus" et le "côté de dessous" des surfaces de l'isolateur.

Les résultats semblent montrer que :

- * les isolateurs du type capot-et-tige anti-brouillard reçoivent le dépôt maximal .
- * les isolateurs à long fût avec les dessous de la surface de l'isolateur nervuré recevront plus de dépôts par rapport aux isolateurs dont les dessous de la surface sont lisses.

On peut penser que les nervures situées sur la surface inférieure de l'isolateur constituent en général un facteur favorable à l'accumulation de la pollution et qu'elles diminuent donc les propriétés d'isolement de la chaîne d'isolateurs. Cependant, elles ont probablement l'avantage de rallonger la ligne de fuite de l'isolateur et donc de réduire la longueur totale de la chaîne pour une ligne donnée.

Concernant la répartition de la pollution marine sur l'isolateur du type capot-et-tige anti-brouillard, une autre étude, très précise, fut effectuée bien plus tard par **D.A.Swift** [21](1991).

En effet, l'auteur ne se contente pas d'établir une distinction entre la répartition côté dessous et côté dessus (ce qui est un processus normal étant donné l'aptitude à l'auto-nettoyage nettement plus élevée côté dessus), mais étudie minutieusement la répartition de la pollution côté dessous.

L'auteur prend donc bien soin de faire la distinction entre la partie centrale de l'isolateur (surtout au niveau de l'espace tige-porcelaine constitué par le mortier de scellement, voir figure II-1), et la zone périphérique.

Les résultats, obtenus également par la méthode de la DDSE, ont montré que sur une durée de 5000 heures d'exposition à la pollution saline :

- * la pollution est plus élevée sur la surface inférieure de l'isolateur
- * la pollution augmente sensiblement de la zone périphérique vers la zone centrale

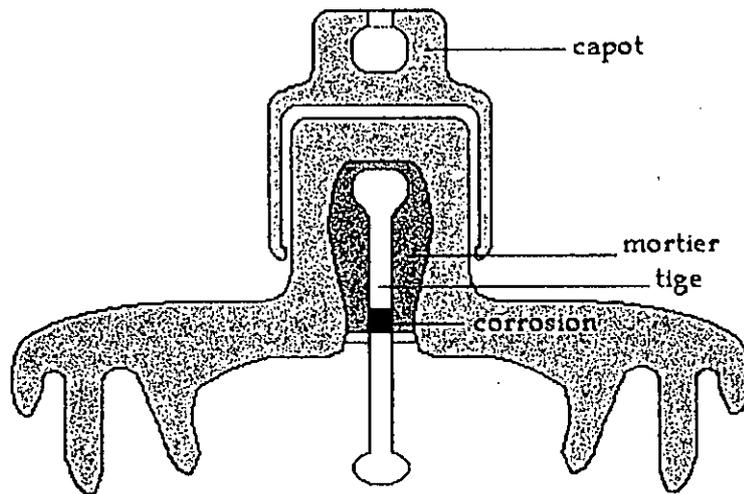
* la DDSE peut être cinq fois plus élevée autour de la tige par rapport à la zone périphérique. Ce phénomène serait dû principalement au profil de l'isolateur et surtout aux propriétés "adhérentes" du ciment de scellement situé entre la tige et la porcelaine qui retient donc mieux les particules polluantes.

Par ailleurs, **Swift** a voulu montrer l'effet de la tension de service sur la répartition de la pollution. Il en résulte que (figure II-2):

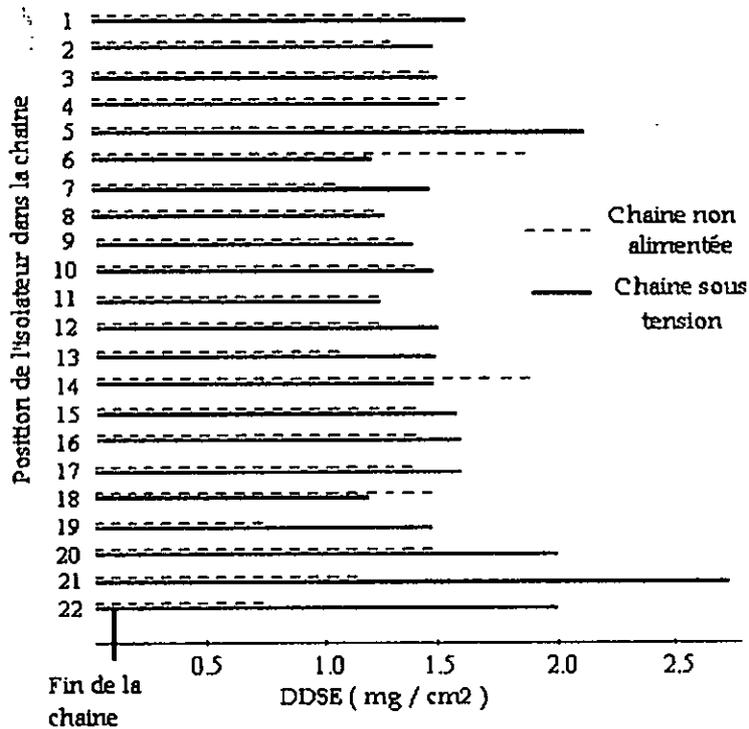
- * lorsqu'une tension est appliquée à la chaîne, la DDSE est plus importante sur les isolateurs *les plus près* de la ligne HT (figure II-2, traits pleins). De plus, la DDSE sur ces mêmes isolateurs est d'autant plus élevée que la tension augmente.
- * la DDSE relevée ne dépend pratiquement pas de la position des isolateurs lorsqu'aucune tension n'est appliquée (figure II-2, traits en pointillés).
- * la DDSE sur *chaque* isolateur est plus élevée lorsque la chaîne est alimentée, par rapport au cas où aucune tension n'est appliquée (comparer traits pleins-trait pointillés).

Swift arrive à la conclusion que la trop grande concentration des particules polluantes autour de la tige est due, non seulement aux mauvaises propriétés d'auto-nettoyage de la surface inférieure de l'isolateur, mais également à la nature "rugueuse" du ciment compris entre la tige et la porcelaine, lequel a donc le défaut de "retenir" les particules de sel.

Cette rétention provoque alors la corrosion de la tige (figure II-1), laquelle peut à la longue conduire au claquage de la porcelaine. L'auteur préconise alors entre autre de diminuer la proportion de sable dans le mortier utilisé, ou alors de recouvrir, par exemple, la zone de scellement par une fine couche de bitume afin de "lisser" l'espace tige-porcelaine.



FigII-1 : Isolateur utilisé par Swift [21]



FigII-2 : DDSE le long de la chaîne des 22 isolateurs considérés par Swift

b-Pollution désertique

Bien que la pollution désertique soit de nature très différente par rapport à la pollution marine, une grande similitude est tout de même notée dans les travaux d'observation d'un grand nombre de chercheurs.

En effet, **M.A.B.El Koshairy** et ses collaborateurs [9] (1982), dans des conditions de pollution désertique ont observé, après une exposition de six mois de chaînes d'isolateurs, une densité de pollution maximale sur les isolateurs situés le plus près des conducteurs sous tension, alors qu'elle est minimale sur les éléments reliés aux consoles.

Par ailleurs, la quantité de pollution déposée sur un isolateur augmente lorsque la tension qui lui est appliquée augmente. Lorsque la chaîne devient plus longue, le rapport entre la densité maximale et la densité minimale du dépôt de pollution augmente. Ce qui accentue encore davantage la non-uniformité de répartition de la pollution le long de la chaîne.

Des travaux antérieurs, plus précis, imputés à **A.El-Arabaty** et **A.Nosseir** [8] (1980), font également état de distribution non uniforme de la pollution. Ces travaux d'une durée de trois ans ont concerné non seulement le degré de pollution, mais également la répartition de la pollution sur différents types d'isolateurs.

De plus, alors que la pollution marine considérée par **J.Keller** [5] ou **D.A.Swift** [21] est répartie de manière transversale (c'est à dire que ces derniers observent une symétrie circulaire), la pollution désertique étudiée par **A.El-Arabaty** et **A.Nosseir** [8] rend compte non seulement d'une distribution transversale de la pollution, mais également d'une pollution longitudinale (asymétrique circulaire) lorsque certaines conditions le permettent (cas des tempêtes de sable). En fait, l'objectif visé par ces auteurs était la mesure de la répartition de la pollution sur quatre familles d'isolateurs dans le but d'étudier les propriétés d'auto-nettoyage de ces isolateurs dans les conditions de pollution désertique et de comparer les performances de ces derniers.

Les résultats obtenus sont d'ailleurs à comparer avec ceux de **J.Keller**[5] .

Ces quatre familles d'isolateurs se répartissent comme suit (figure II-3):

* **Isolateurs capot-tige conventionnels** : (figure II-3-a)

Pour ces isolateurs, la densité de pollution à la surface inférieure est beaucoup plus importante qu'à la surface supérieure.

* **Isolateurs à profils aérodynamique:** (figure II-3-b)

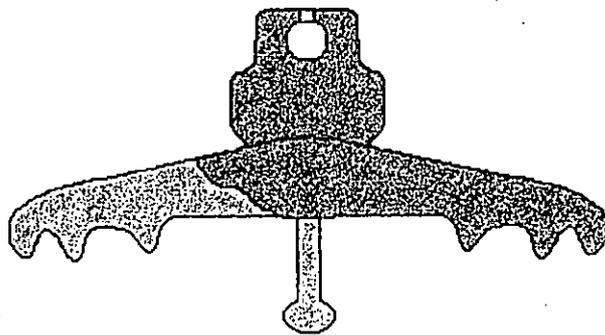
On peut partager ces isolateurs à profil aérodynamique en deux groupes. Le premier est constitué par les isolateurs ayant la partie inférieure des jupes inclinée vers le haut (1) et cela donne d'excellentes propriétés d'auto-nettoyage et la densité de pollution est plus faible sur la surface inférieure que sur la surface supérieure. Le second groupe est constitué par des isolateurs ayant également des jupes unies mais avec leur partie inférieure inclinée vers le bas (2). Cela donne une zone, en-dessous de la jupe, qui se trouve protégée du vent direct ce qui aboutit à une certaine accumulation de poussière sur la surface inférieure. Cependant, la densité de pollution est, dans de ce cas, encore beaucoup plus faible que dans le cas des profils conventionnels.

* **Isolateurs long fut conventionnels :** (figure II-3-c)

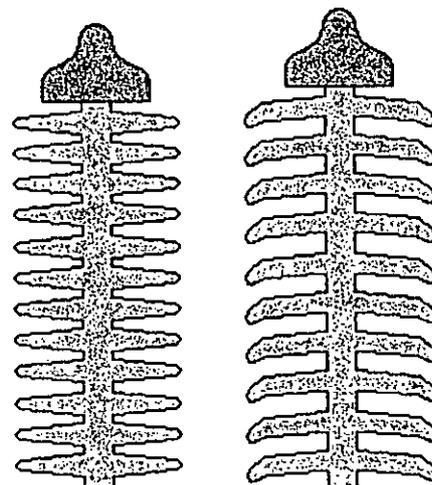
Les résultats des essais montrèrent que la densité de pollution est minimale sur la tige verticale de l'isolateur et est maximale dans la zone protégée, sur la surface inférieure des jupes, tandis que la densité de pollution sur le dessus des jupes se situe entre ces deux valeurs.

* **Isolateurs capot-tige à profil anti-brouillard :** (figure II-3-d)

La densité de pollution moyenne à la surface de ces isolateurs est *très importante* comparativement avec les autres types. Cependant, la densité moyenne de pollution sur les surfaces supérieures est plutôt faible et les parties verticales du dessus des jupes sont relativement propre.



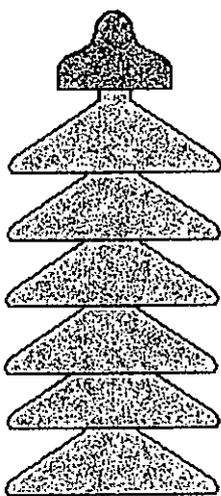
a-Isolateur capot-tige conventionnel



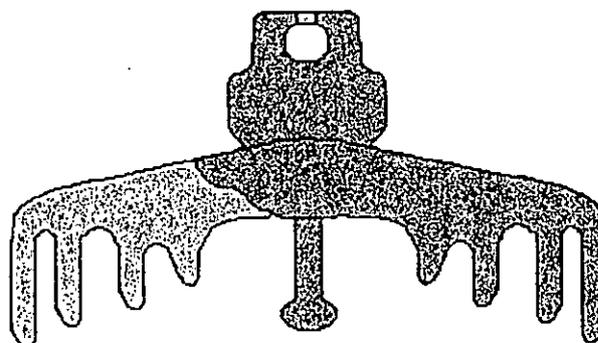
(1)

(2)

b-Isolateurs à profil aérodynamique



c-Isolateur long fût conventionnel



d-Isolateurs capot-tige à profil anti-brouillard

FigII-3 : Profils d'isolateurs utilisés par El-Arabaty [8]

Des travaux ont été effectués en Algérie par **S.Bouazabia** et **T.Chikhaoui** [28], où des observations identiques sont faites sur différents types d'isolateurs, pollués dans les conditions naturelles. Les auteurs remarquent, en effet, une accumulation plus importante des dépôts polluants autour de la tige et dans les parties difficilement nettoyables par les agents naturels (vent, pluie, etc.)(mêmes observations effectuées plus tard par **D.A.Swift** [21](1991), au sujet de la pollution marine).

Commentaires

Tous ces résultats concernent une accumulation *progressive* de la pollution, et ne peuvent pas rendre compte de l'accumulation aléatoire de la pollution en cas de conditions atmosphériques exceptionnelles comme l'ont bien montré **A.El-Arabaty** et **A.Nosseir** [8] lorsqu'il s'agit de tempêtes de sable par exemple.

D'autre part, les résultats présentés concernent les chaînes d'isolateurs en position verticale, et ne rendent pas compte de la distribution de la pollution en cas de position horizontale ou inclinée : la plupart des auteurs [22, 48] se contentent de constater que dans ces cas là, la chaîne d'isolateurs retient en général moins de pollution et possède de meilleures propriétés d'auto-nettoyage (voir I-5-1-f).

Il faut noter que les travaux d'observation sont d'une grande utilité puisqu'ils permettent, surtout lorsqu'ils sont effectués d'une manière minutieuse, de déceler les défauts de tel ou tel isolateur dans une région donnée : par exemple une trop grande concentration des particules polluantes dans une partie précise de l'isolateur. Le travail d'observation permet donc :

- * de déceler les défauts de certains types d'isolateurs
- * de remédier à ces défauts en prenant des mesures appropriées

Il semblerait également que le mode de répartition de la pollution ne dépend pas de la nature de cette dernière puisqu'on observe des résultats similaires pour les deux types de pollution, marine et désertique. Tous les auteurs que nous avons cités établissent, en effet, que :

1. la répartition naturelle de la pollution est loin d'être uniforme.
2. la répartition de la couche polluante dépend :
 - * du profil de l'isolateur
 - * de la position de l'isolateur par rapport au conducteur sous tension
 - * du niveau de tension appliqué

II-2-2-Travaux sous pollution artificielle

Si les travaux d'observation (sur site) sont très nombreux et touchent à peu près à tous les types de pollution, ceux considérant une pollution artificielle sont en revanche peu nombreux. Au terme de nos investigations, nous avons tout de même noté une étude intéressante effectuée par **L.E.Zaffanella** et **H.M.Schneider** [22] (1986), sous pollution artificielle et sous tension continue (et sur isolateur réel).

Cette étude aura donc pour objectif (entre autre) de respecter la distribution naturelle de la pollution et donc d'approcher au mieux la réelle contrainte appliquée à l'isolateur.

Deux types de discontinuité seront alors pris en considération :

- * non-uniformité de la pollution le long de la chaîne
- * non-uniformité entre les surfaces inférieures et supérieure de l'isolateur

a- Effet de la non-uniformité de la pollution le long de la chaîne

L.E.Zaffanella et **H.M.Schneider** [22] souligneront, à juste titre, que puisqu'il a été observé que les isolateurs soumis à une tension continue présentent une distribution naturelle très peu uniforme, il était donc nécessaire d'élaborer des méthodes pour déterminer la tension de contournement dans ces conditions.

C'est ainsi que des essais sous pollution artificielle ont été effectués sur des chaînes d'isolateurs pollués de manière continue tandis que d'autres l'ont été de façon discontinue avec la même DDSE.

Les résultats montrèrent que, la tension d'amorçage d'une chaîne polluée uniformément, avec la même DDSE, était de 20% inférieure à celle de la chaîne non-uniformément polluée.

Des essais ultérieurs montrèrent que la tension de contournement des chaînes non-uniformément polluées est égale à la somme de celles de chacun de ses composants. Il est ainsi possible d'additionner les tensions de contournement de chaque isolateur ou de diviser la chaîne en plusieurs parties et de calculer la tension d'amorçage de la chaîne complète par sommation.

b-Effet d'une pollution différente entre les surfaces inférieure et supérieure de l'isolateur

Les nombreux travaux d'observation ont établi qu'il existe toujours une distinction nette entre la DDSE côté dessus, et la DDSE côté dessous d'un isolateur soumis à la pollution naturelle. Les auteurs (**L.E.Zaffanella** et **H.M.Schneider** [22]) ont donc eu recours à des procédures particulières pour obtenir des rapports de DDSE différents lors des essais de pollution artificiels.

Initialement, la DDSE de la face inférieure est maintenue constante (0,03 mg/cm²), puis la DDSE de la face supérieure est polluée de manière à varier le

rapport n, n étant donné par :

$$n = (\text{DDSE côté dessus}) / (\text{DDSE côté dessous})$$

Par la suite une deuxième valeur de la DDSE ($0,15 \text{ mg/cm}^2$) de la face inférieure est adoptée et on procède de la même manière pour obtenir également des rapports dans la même plage de variation, celle-ci allant de $n=0.05$ à 10.

Les résultats (figure II-4), présentés en pourcentage de la tension d'amorçage pour $n=1$ (pollution continue) ont conduit à la formule empirique suivante :

$$U_c (\%) = 100[U_c(n)/U_c(1)] = 100 [1 - k \cdot \log (n)]$$

Avec k , désignant une constante dépendant de la DDSE côté dessous ainsi que du type d'isolateur étudié.

Les auteurs présentent de nombreux résultats concernant cette constante k en fonction de la DDSE côté dessous, sans toutefois préciser pour quels types d'isolateurs les essais ont été effectués.

Notons que cette équation permet d'évaluer la tension de contournement pour n'importe quel rapport n compris entre 0.05 et 10 (donc pour une grande plage de variation).

Une valeur moyenne a été déterminée à partir de la caractéristique k en fonction de la DDSE côté dessous (pour différents types d'isolateurs (figure II-5)) :

$$k=0,38$$

II-1- Introduction

Nous présentons tout d'abord dans ce chapitre les principaux travaux d'observations et de mesures effectués sur site, et concernant principalement la répartition de la pollution le long de :

- * la chaîne d'isolateurs
- * la surface de l'isolateur

En effet, la distribution de la pollution sur les isolateurs est loin d'être uniforme. Cette non-uniformité peut être due à de nombreux facteurs :

- ◆ la forme de l'isolateur et de ses capacités d'auto-nettoyage
- ◆ la position des isolateurs (horizontale, verticale ou alors inclinée)
- ◆ la position de l'isolateur par rapport à la borne haute tension
- ◆ la position des isolateurs par rapport à la direction du vent
- ◆ les conditions climatiques.

Un autre paragraphe traitera de travaux sous pollution artificiel. C'est ainsi que, afin de respecter la distribution naturelle de la pollution, des essais avec des couches discontinues ont été pris en compte par les chercheurs. Certains d'entre eux ont considéré l'isolateur réel et ont donc procédé à une répartition répondant au mieux à la distribution naturelle de la pollution.

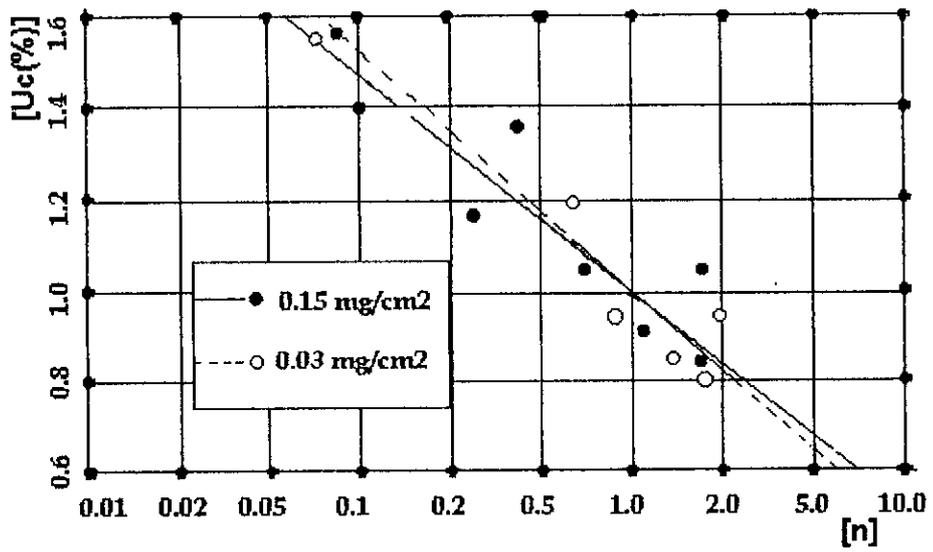
D'autres auteurs ont étudié de manière purement mathématique (simulation) le contournement sous pollution discontinue, les résultats ont ensuite été validés par la comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux.

Une dernière partie traitera des modèles de laboratoire, ceux-ci permettant d'une manière plus aisée d'observer les phénomènes physiques et d'établir une formulation mathématique simple pour décrire le comportement de l'isolateur.

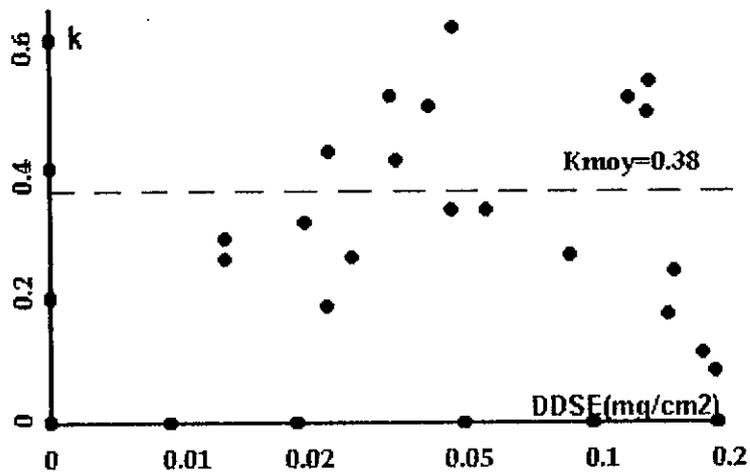
II-2-Travaux sur isolateurs réels

II-2-1-Répartition naturelle de la pollution (essais in situ)

De nombreuses stations d'essais ont été conçues et installées sur des sites pollués à travers le monde. Ces stations ont pour but d'observer et d'analyser le degré de pollution et donc de mieux dimensionner les isolateurs correspondant à ces mêmes sites. C'est ainsi que de nombreux travaux ont permis d'observer que la répartition de la pollution le long de l'isolateur est très peu uniforme. Ce paragraphe a justement pour objectif de rassembler les principaux travaux d'observations et de mesures effectués dans les conditions naturelles de pollution (essais sur sites).



FigII-4 : Tension de contournement relative en fonction de n selon Zaffanella [22]



FigII-5 : Variation du facteur k en fonction de la DDSE face inférieure, d'après des essais sur différents isolateurs.

Commentaires

Cette étude, très intéressante puisqu'elle tient compte de manière assez large de la distribution de la pollution, ne précise malheureusement pas très exactement le profil des différents isolateurs sur lesquels les essais ont été effectués.

D'autre part, il semblerait que le rapport k ne dépend pas de la DDSE côté dessous puisqu'apparemment les courbes à 0,03 et 0,15 mg/cm² sont confondues. L.E.Zaffanella et H.M.Schneider [22] ont même trouvé des résultats très proches pour l'isolateur étudié (figure II-4), à savoir :

$$k(0,03 \text{ mg/cm}^2) = 0,474$$

$$\text{et } k(0,15 \text{ mg/cm}^2) = 0,488$$

ce qui fait une différence de $\delta k = 0,014$ et un pourcentage d'erreur de :

$$\delta k (\%) = \delta k / k \cong 0,029 = 2,9\%$$

Nous pensons qu'une différence inférieure à 3% peut être considérée comme négligeable, ce qui signifierait que la constante k ne dépend pas de la DDSE côté dessous mais probablement uniquement du profil de l'isolateur (peu de précisions ont été données par l'auteur à ce sujet).

II-2-3-Travaux de simulation

Les études de simulation du comportement de l'isolateur réel sont à peu près inexistante, puisque la plupart du temps, les formulations mathématiques sont issus de modèles de laboratoires sensés représenter l'isolateur réel (nous y reviendrons dans les paragraphes suivants).

Cependant, nous avons relevé un intéressant travail, effectué par R.Sundarajan et S.Gorur [29] (1993), proposant un modèle dynamique de la tension de contournement.

Ce modèle, élaboré pour une alimentation continue, tient donc compte de la configuration géométrique de l'isolateur, du développement à chaque instant de l'arc et également de la non-uniformité de la couche de pollution.

La tension de contournement est déterminée à partir d'un programme informatique élaboré en plusieurs étapes. Celui-ci s'inspire du modèle d'Obenaus [57] qui considère le schéma électrique équivalent de l'isolateur, comme étant un arc en série avec la couche de pollution (en réalité il peut y en avoir plusieurs mais on constate, généralement, qu'il existe en effet un seul arc dominant, celui-ci absorberait donc la plus grande partie de l'énergie dissipée sur la surface de l'isolateur).

a-Programme de calcul de R.Sundarajan et S.Gorur [29]

Les étapes de calcul de la tension de contournement sont les suivantes :

Etape 1

Puisqu'on suppose l'arc en série avec la couche de pollution, l'équation électrique de l'ensemble arc-pollution s'écrit [57] :

$$U = (R_{arc}L_{arc}+R_{pol}) I$$

Avec :

U =Tension appliquée (V)

R_{arc} :Résistance de l'arc par unité de longueur (Ω/cm)

L_{arc} :Longueur de l'arc (cm)

R_{pol} : Résistance de la pollution (Ω).

I : Courant de fuite traversant la couche de pollution en série avec l'arc (A)

Etape 2

L'expression ci-dessus conduit à :

$$I = U / (R_{arc} L_{arc}+ R_{pol})$$

D'autre part, les auteurs tiendront compte dans cette deuxième étape du profil réel de l'isolateur en introduisant un facteur de forme f donné par l'expression [40] :

$$f = \int dy / 2\pi r$$

Avec :

dy = variation de la longueur de l'arc sur la surface de l'isolateur (cm)

r = rayon à la distance dy (cm)

Notons que le facteur de forme permet de déterminer la résistance de la pollution pour différents profils d'isolateurs [67]. La résistance de la pollution est, en effet, donnée par :

$$R_{pol} = (1/\sigma_S) \cdot f, \sigma_S \text{ étant la conductivité surfacique de la couche polluante } [\mu S]$$

($\sigma_S = \sigma \cdot e$, e étant l'épaisseur de la pollution et σ la conductivité volumique).

L'auteur fixera des conditions initiales qui sont à t=0 :

* $R_{arc} = 100 \Omega /cm$

* $L_{arc} = (1/100)L$, L étant la longueur de fuite totale

En cas de couche non uniforme, on peut alors subdiviser l'isolateur en deux ou plusieurs tronçons où seul le paramètre σ_S (conductivité) change. C'est ainsi

que **R.Sundarajan** et **S.Gorur**, bien que développant la méthode pour une répartition uniforme de la pollution ($\sigma = \text{const}$), l'ont également appliquée dans le cas de non-uniformité de la pollution en variant le paramètre σ pour chacun des tronçons considérés.

Etape 3

R.Sundarajan et **S.Gorur** [29] expriment le champ électrique interne de l'arc à partir de la formule empirique d'Obenaus [57] :

$$E_{\text{arc}} = A \cdot I^{-n}$$

A et n étant des constantes déterminées de manière empiriques.

Ces constantes ne sont pas fixes et dépendent souvent des conditions expérimentales. C'est pourquoi certains auteurs trouvent parfois des résultats assez différents, comme, par exemple, **Wilkins** [45] qui trouve $A=63$ et $n=0.76$, tandis que **Claverie** et **Porcheron** [40] établissent les valeurs $A=100$ et $n=0.5$.

Quoi qu'il en soit, **R.Sundarajan** et **S.Gorur** adopteront les valeurs :

$$A=63 \quad \text{et} \quad n=0.5$$

Etape 4

Le champ de la couche polluée juste au bout de l'arc est donné par :

$$E_p = A^{1/(n+1)} R_p^{n/(n+1)}$$

Cette expression étant obtenue à partir des valeurs critiques correspondant à la stabilité de l'arc.

Avec :

R_p = Résistance de la pollution par unité de longueur, c'est à dire que l'on obtient finalement :

$$R_p = R_{\text{pol}} / (L - L_{\text{arc}})$$

Etape 5

Les auteurs, à partir de l'expression du champ interne de l'arc E_{arc} et celle du champ de la couche de pollution E_p , appliquent le critère de propagation déjà établi par d'autres auteurs [59] (voir chapitre I), à savoir :

$$E_p > E_{\text{arc}}$$

Dans le cas où l'inégalité est vérifiée, l'arc se propage, et si on admet que la longueur critique d'arc est égale à $2.L / 3$ [23] (voir chapitre I), on obtient alors le contournement total dès que la longueur d'arc atteint cette limite.

Si la longueur critique n'est pas encore atteinte, la variation de la résistance de l'arc est donnée par l'expression suivante, (celle-ci ayant déjà été établie par **A.Al-Baghdadi** [68]):

$$dR_{\text{arc}} / dt = R_{\text{arc}} / [\tau - (R_{\text{arc}}^2 \cdot I^{n+1} / \tau \cdot N)]$$

Avec :

τ = constante de temps de l'arc et égale à 100 μ s [68].

N = constante définie par l'auteur.

La résistance de l'arc s'écrit alors, pour une variation dt du facteur temps comme :

$$R_{\text{arc}}(t+dt) = R_{\text{arc}}(t) + dR_{\text{arc}}$$

La variation dt est obtenue à partir de la variation dL_{arc} , laquelle est donnée par l'expression suivante :

$$dL_{\text{arc}} = \mu \cdot E_{\text{arc}} \cdot dt$$

Avec :

μ = mobilité de l'arc, comprise entre 5 $\text{cm}^2/\text{V.s}$ et 50 $\text{cm}^2/\text{V.s}$, selon **A.Al-Baghdadi** [68]).

C'est à partir de toutes ces étapes de calcul que **R.Sundarajan** et **S.Gorur** établissent la tension de contournement d'un isolateur en tenant compte :

- * du profil de l'isolateur en insérant le facteur de forme
- * du caractère dynamique de la propagation de l'arc en tenant compte de la variation de la résistance d'arc en fonction du temps
- * de la répartition non-uniforme de la couche de pollution en divisant l'isolateurs en plusieurs tronçons, possédant différentes conductivités (nous y reviendrons dans ce qui suivra).

b-Effet de la non-uniformité des couches polluantes

Afin de valider le modèle théorique présenté ci-dessus, **R.Sundarajan** et **S.Gorur** ont appliqué le programme de calcul à deux types de non-uniformité qui seront les seules à être prises en considération :

- * Non-uniformité de la couche de la tige à la périphérie de l'isolateur selon une distribution donnée.
- * Non-uniformité de la couche le long de la chaîne d'isolateur, la distribution

sera fonction de la position de l'isolateur par rapport au conducteur HT.

Notons que presque tous les auteurs ne considèrent que ces deux types de non-uniformité ainsi que nous l'avons déjà constaté dans les paragraphes précédents.

C'est ainsi que, de la même manière que **L.E.Zaffanella** et **H.M.Schneider** [22], l'auteur considérera une distribution définie par le rapport n donné par :

$$n = \frac{\text{DDSE (surface supérieure)}}{\text{DDSE (surface inférieure)}} \quad n \text{ variant de } 0,1 \text{ à } 5.$$

Il sera alors établi la variation de la tension de contournement en fonction de la DDSE supérieure pour différents rapports n (en maintenant de la même manière que **L.E.Zaffanella** et **H.M.Schneider** [22] la DDSE de la surface inférieure fixe).

Les résultats montrèrent que, théoriquement :

- Dans tous les cas, la non-uniformité de la couche polluante conduit à une rigidité supérieure ou égale à la rigidité obtenue dans le cas de distribution continue.
- La meilleure rigidité est obtenue pour le rapport n le plus réduit à savoir 0,1.
- Etant donné que, dans le cas de pollution naturelle, il est observé effectivement un rapport n inférieur à 1 (et ce, grâce aux propriétés d'auto-nettoyage plus élevées de la partie supérieure de l'isolateur), la tension de contournement est donc *invariablement* supérieure à celle de la pollution continue : celle-ci constitue donc le cas le plus défavorable (selon l'auteur).

Notons que concernant ces résultats, aucune comparaison avec des essais pratiques n'a été présentée.

Par contre, dans le cas de non-uniformité longitudinale des couches polluantes, **R.Sundarajan** et **S.Gorur**, utilisant la même technique de calcul (programme informatique présenté précédemment) prendront l'exemple de deux chaînes d'isolateurs, respectivement composées de 12 et de 25 éléments.

Chaque élément est affecté d'une valeur de la DDSE qui dépend de sa position par rapport au conducteur HT. Cette valeur sera inspirée de résultats expérimentaux déjà effectués par **T.C.Cheng** [69] et **I.Kimoto** [70].

Une répartition uniforme est comparée aux résultats ci-dessus : une moyenne arithmétique de toutes les DDSE de chaque élément est établie, puis l'auteur calcule le contournement *équivalent* si tous les éléments possédaient la même DDSE (celle-ci étant donc la moyenne calculée au préalable).

Les résultats, comparés également à quelques essais expérimentaux ont montré que :

- * Pour la chaîne de 25 isolateurs, la rigidité diélectrique correspondant à une distribution discontinue des couches polluantes, est légèrement plus élevée que celle correspondant à une distribution continue.
Pour celle de 12 éléments, la rigidité diélectrique est pratiquement la même dans les deux cas de distribution.
- * La comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux, concernant la chaîne de 12 éléments montre une assez bonne corrélation entre les deux approches.
- * L'auteur semble insister surtout sur le fait que dans tous les cas de figures, la rigidité dans le cas discontinu est toujours supérieure ou égale à celle où la distribution est uniforme.

Commentaires

R.Sundarajan et **S.Gorur** bien que présentant deux courbes comparatives (pratique-théorique) concernant la chaîne de 12 éléments, ne font qu'une comparaison qualitative entre les deux approches en insistant sur le fait que les essais en pollution continue et discontinue sont pratiquement confondus dans ce cas de figure précis.

Pendant, nous constatons que sur le plan quantitatif, les résultats théoriques sont tout de même inférieurs aux points expérimentaux, l'erreur étant de l'ordre de 30% dans le cas le plus défavorable.

II-3-Modèles de laboratoire

Les travaux effectués sur quelques modèles de laboratoire sont présentés dans ce paragraphe. Ceux-ci ont l'avantage de mieux observer les phénomènes électriques (arcs, contournement, courant de fuite) et de comprendre le processus physique accompagnant ces phénomènes par l'établissement d'équations simples illustrant le modèle en question.

C'est dans ce contexte que certains auteurs ont effectué des travaux sur la non-uniformité de la couche de pollution.

II-3-1-Modèle de J.Danis [24] (1983)

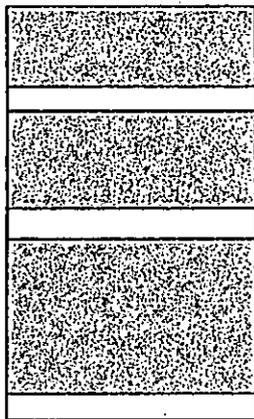
L'auteur a pris en considération un modèle simple, constitué d'une plaque isolante, munie de deux électrodes identiques, rectangulaires et placées aux deux extrémités de la plaque (voir chapitre I, figure I-1-c).

Des zones sèches sont préétablies sur le modèle (figure II-6-a), à différents endroits de la plaque, afin d'étudier le développement de l'arc électrique. L'auteur décrit à l'aide de photographies à grande vitesse (3000 images/seconde), et avec beaucoup de précision, les différentes étapes précédant le contournement.

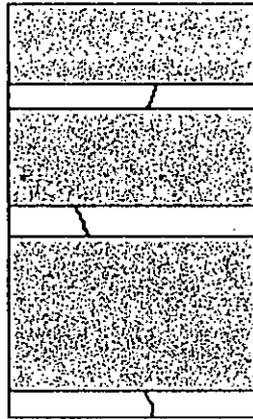
Nous résumons les constatations de l'auteur comme suit :

- * L'arc se développe toujours d'abord à travers la zone sèche, *puis* dans la zone humide (figure II-6-b).
- * L'arc peut se développer à *n'importe quelle* position le long de la zone sèche : aucune position n'est donc 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 fines ramifications. De plus, le développement de l'arc à proximité de la cathode est plus rapide que celui à proximité de l'anode.
- * Plusieurs arcs peuvent se développer en parallèle aux premiers stades du processus : ceux-ci disparaissent ensuite lorsque le courant augmente et un *seul* arc dominant persiste au cours des étapes suivantes. Celui-ci se développe donc, seul, à travers la zone humide.
- * Dans le cas de plusieurs zones sèches, le développement de l'arc d'une zone sèche à travers la zone humide s'effectue de manière à "rejoindre" l'arc développé sur la zone sèche voisine (figure II-6-c).
- * Le contournement se fait à travers les chemins déjà préétablis par les différents arcs de chaque zone sèche (figure II-6-d).
- * Lorsque l'expérience est répétée, les positions des arcs développés sont différentes, et le contournement se fera donc à travers un tout autre chemin (figure II-6-e).

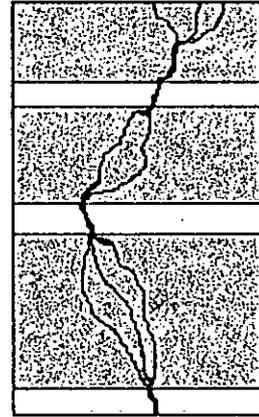
A travers ces constatations, l'auteur conclura que la rupture des zones sèches survient d'une manière aléatoire. Comme la tension de contournement *dépend* de la rupture de ces zones sèches, celle-ci possède également le même caractère, c'est à dire obéit aux lois statistiques.



a-absence d'arcs



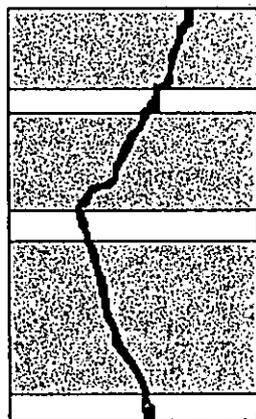
b-formation d'arcs



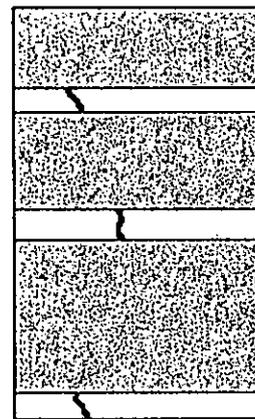
*c-les arcs se
"rejoignent"*

Zone polluée

Zone propre



d-le contournement



*e-création d'arcs
(2^e expérience)*

FigII-6 : Modèle de J.Danis [24]

II-3-2-Modèles de M.N.Rayes et M.Zhirh [25] (1991)

Les auteurs considèrent deux modèles différents. Le premier modèle considéré est de forme cylindrique, surmonté d'un système permettant de pulvériser la solution sur toute la colonne, sauf sur la partie inférieure du modèle, laquelle est protégée par une sorte de "couronne" dont la position x par rapport à la terre est variable (figure II-7-a). Une tension de nature impulsionnelle (impulsion positive 250/2500 μ s) est appliquée à ce modèle, en variant la largeur de la zone sèche de 0 à L , L étant la longueur totale de la colonne.

Le deuxième modèle est constitué d'une électrode placée au dessus d'une plaque isolante, à une distance 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 II-7-b). Une tension alternative de fréquence 50 Hz est alors appliquée au deuxième modèle, en variant la longueur des colonnes.

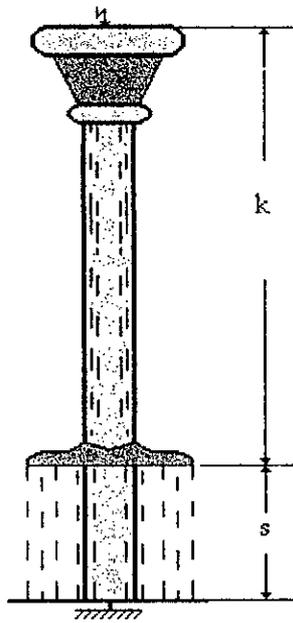
L'auteur s'est alors intéressé à la variation de la tension de contournement, en fonction de la largeur s de la zone sèche pour les deux configurations et pour plusieurs conductivités.

Les résultats ont montré que :

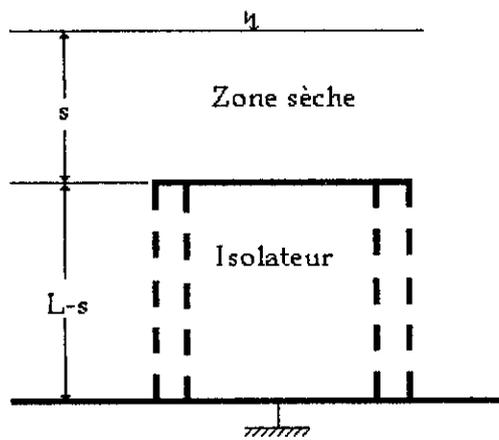
- * Pour les essais sous impulsion positive, la tension de contournement U_c en fonction de s atteint un minimum, correspondant à une largeur s_{min} qui se situe à environ 45-50% de la longueur totale : ce sont des courbes en forme de "V" (figure II-8).
- * La tension de contournement, pour une même 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 $s > s_{min}$, (figure II-9).
- * Les mêmes allures et les mêmes constatations sont faites pour le contournement à 50 Hz, avec cependant un minimum *beaucoup moins marqué* que dans le cas où la tension est de nature impulsive.

L'auteur conclura que :

- ◇ Le contournement de l'isolateur sous impulsion positive ou sous tension à fréquence 50 Hz dépend du rapport des largeurs zones sèche et polluée.
- ◇ Les courbes en "V" obtenues ont montré que le contournement total 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.

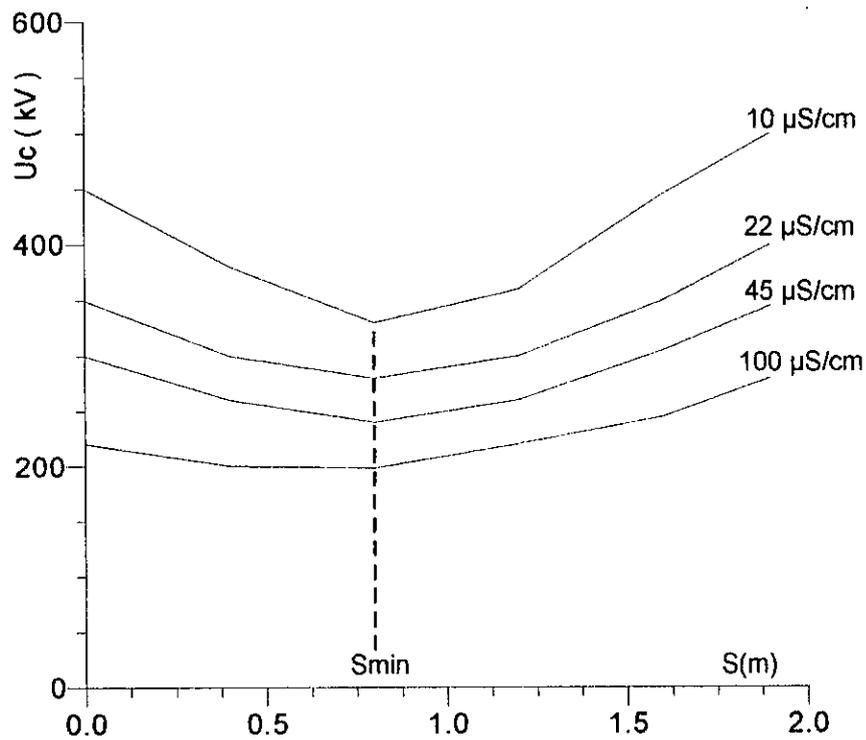


a-Modèle 1, soumis à une tension impulsionnelle

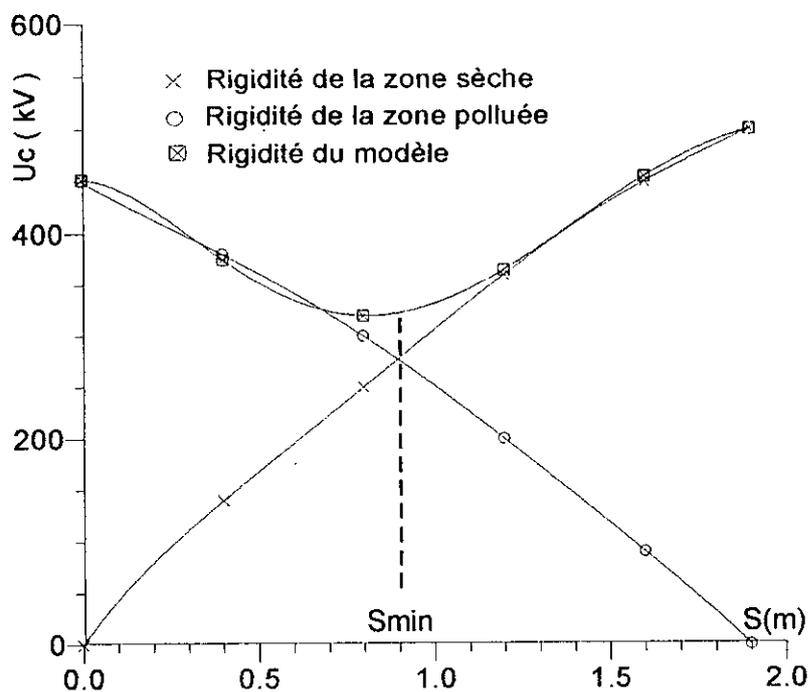


b-Modèle 2, soumis à une tension à fréquence industrielle

FigII-7 : Modèles de Rayes et Zhirh [25]



FigII-8 : Tension de contournement en fonction de la largeur de la zone sèche pour plusieurs conductivités selon Rayes et Zhirh [25] (Modèle 1)



FigII-9 : Tensions de contournement partiels en fonction de la largeur de la zone sèche, comparées la rigidité du modèle (Modèle 1)

Commentaires

Concernant le modèle de **J.Danis** [24], celui-ci étant symétrique par rapport aux électrodes, on peut expliquer que la rupture d'une zone sèche de longueur donnée ne dépend pas de sa position vis à vis des électrodes. Un autre modèle, comme celui de **Claverie et Porcheron** [23], par exemple, où les électrodes sont différentes, devrait conduire à une distinction entre le phénomène d'arcs près de l'électrode HT et celui près de la terre.

Le modèle de **M.N.Rayes et M.Zhirh** [25], comporte un résultat qui nous paraît curieux lorsqu'on observe les courbes en "V" établies par l'auteur (modèle 1, figure II-8).

Ce résultat concerne les valeurs de contournements à $s=L$ à plusieurs conductivités, alors que normalement, en l'absence de pollution la valeur de la tension de contournement ne possède qu'une seule valeur puisqu'elle *ne peut pas* dépendre d'une couche polluée qui n'existe pas.

En d'autres termes, les courbes U_c en fonction de s devraient toutes se rejoindre en *un seul point* à $s=L$, celui correspondant à la colonne non polluée.

Notons également qu'il existe une légère nuance entre les travaux de **M.N.Rayes et M.Zhirh** [25] et ceux de **R.Sundarajan et S.Gorur** [29], concernant l'évolution de la tension de contournement en fonction de la largeur de la zone sèche. Les premiers établissent des courbes en "V", comportant un minimum, et les seconds prévoient une allure strictement croissante.

Néanmoins, nous pensons que l'établissement de zones sèches pourraient conduire à :

- * la diminution de la rigidité pour une plage précise de variation de cette dernière, cette plage pouvant dépendre du modèle utilisé et de la contrainte appliquée (tension continue, alternative ou impulsionnelle, conductivité utilisée etc.). L'existence d'une largeur critique devrait dépendre, à notre avis, de la longueur critique de l'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.

Nous pensons qu'au cas où la largeur critique est très inférieure à la longueur de fuite totale, certains auteurs comme **R.Sundarajan et S.Gorur** [29] peuvent obtenir une rigidité uniquement croissante en fonction de la largeur de la zone sèche.

II-4 - Modèle de Claverie et Porcheron [23]

Ce paragraphe traite de quelques travaux effectués sur le modèle de **Claverie** et **Porcheron**, principalement au laboratoire de haute tension de l'Ecole Nationale Polytechnique. Ces travaux seront brièvement commentés de manière à expliquer certains résultats qui, parfois, n'ont pas été suffisamment interprétés.

L'intérêt est de présenter les différents résultats pratiques ou théoriques, qui nous serviront dans la suite de notre travail.

II-4-1-Résultats pratiques

La plupart des résultats pratiques concernent principalement :

- * **le courant de fuite**
- * **la génération de l'arc électrique**

Les paramètres, très nombreux, qui ont été considérés sont essentiellement :

- **la conductivité de la couche de pollution**
- **le rayon de l'électrode circulaire**
- **la distance inter-électrodes**
- **l'épaisseur de la couche de pollution**
- **la répartition discontinue de la couche de pollution**

concernant le courant de fuite, il a été établi que [46, 47, 48] :

- * Le courant de fuite diminue avec la distance inter-électrodes [46].
- * Le courant de fuite augmente avec le rayon de l'électrode circulaire [46].
- * Le courant de fuite augmente avec la conductivité [46].
- * Le courant de fuite augmente avec l'épaisseur de la couche de pollution [48].
- * Les résultats concernant une distribution discontinue de la pollution [47], sont, malheureusement, assez dispersés, et ne rendent pas compte clairement de l'effet d'une ou plusieurs zones sèches sur le courant de fuite. Nous pensons que cela peut être dû à la difficulté d'obtenir une reproductibilité correcte de la répartition de la pollution.

Commentaires

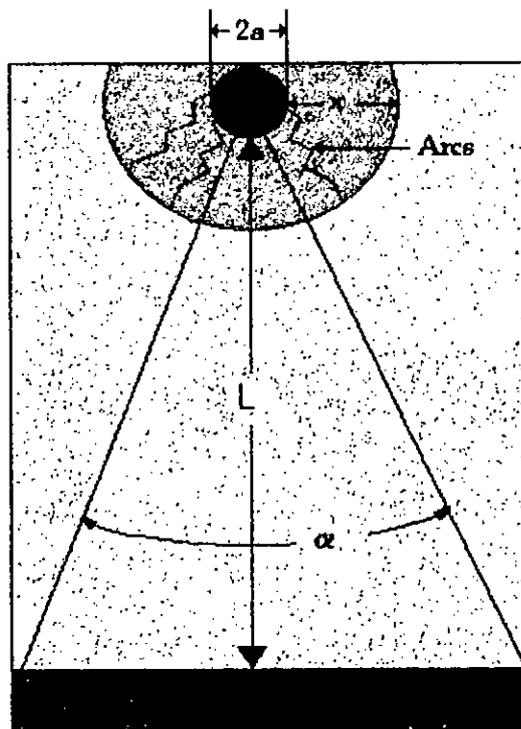
Notons qu'en général, il est observé que l'arc électrique progresse de la même manière que le courant de fuite [46], l'allure des courbes étant pratiquement la même. Ceci est logique quand on sait que toute augmentation du courant de fuite provoque l'allongement de l'arc : ce sont donc des paramètres qui varient dans le même sens.

II-4-2-Equations électriques

Les équations électriques, correspondant au modèle de Claverie et Porcheron [23], ont été proposés par A.Mekhaldi et S.Bouazabia [71].

Ces derniers, utilisant les équation de l'électromagnétisme classique (équation de poisson), ont établi, en assimilant le modèle à un système cylindrique (figure II-10), l'expression du courant de fuite :

$$I = U \cdot \sigma \cdot \alpha \cdot e / \ln [(a+L)/(a+x)]$$



FigII-10 : Modèle de A.Mekhaldi et S.Bouazabia [71]

Avec :

$$\alpha = 2 \cdot \arctg \left(\frac{d}{2(a+L)} \right)$$

σ : conductivité

U : tension d'alimentation

a : rayon de l'électrode circulaire

L : distance inter-électrodes

x : longueur de l'arc

e : épaisseur de la couche polluante

d : longueur de l'électrode rectangulaire

On peut en déduire la résistance de la pollution :

$$R = \ln \left[\frac{(a+L)}{(a+x)} \right] / \sigma \cdot \alpha \cdot e$$

Quelques comparaisons avec des résultats expérimentaux sont alors effectuées, montrant une assez bonne concordance entre les deux approches (théorique et pratique) pour les faibles niveaux de tension et pour les grandes épaisseurs de la couche de pollution.

Pour les tensions plus élevées et les faibles épaisseurs de la pollution, la corrélation est plutôt mauvaise, les auteurs imputant cet état de fait au parcours non plus radial du courant (lorsque la longueur d'arc est importante), mais plutôt linéaire, le courant empruntant le chemin le moins résistant :

le modèle serait alors assimilé à un système pointe-plan.

II-5-Conclusions

Nous avons tenté, dans ce chapitre, d'aborder les différentes manières de traiter le problème de la non-uniformité de la pollution.

S'il est en général admis que la répartition de la pollution dépend principalement du profil de l'isolateur, d'autres paramètres, tels que par exemple le niveau de tension, ou la position de l'isolateur, ont également fait l'objet de travaux dont les résultats semblent assez concordant.

Les résultats de ces travaux semblent montrer, en effet, qu'en cas de pollution désertique ou marine :

- * la pollution est plus élevée sur la surface inférieure de l'isolateur
- * la pollution augmente sensiblement de la zone périphérique vers la zone centrale de l'isolateur.

- * la pollution est plus importante sur les isolateurs *les plus près* de la ligne HT.
- * la pollution est d'autant plus élevée que la tension augmente.

Cependant, si certains auteurs [29] établissent que la rigidité la plus médiocre correspond à une répartition uniforme de la pollution, d'autres [25] prévoient une rigidité encore plus faible dans une plage *précise* de variation de la zone sèche : nous pensons que ce résultat pourrait être expliqué par une plus grande facilité de développement de l'arc en cas de zones sèches préétablies.

Chapitre III

Etude expérimentale

III-1-Introduction

III-2-Essais expérimentaux

III-3-Interprétation des résultats

III-4- Conclusions

Symboles et définitions

U : Tension appliquée (kV)

I : courant de crête (μA)

Y : largeur de la pollution côté Haute tension (cm)

Y' : largeur de la pollution côté Terre (cm)

*X : longueur d'arc côté terre (ou largeur
de la zone sèche côté terre) (cm)*

*X' : longueur d'arc côté haute tension (ou largeur
de la zone sèche côté haute tension) (cm)*

Xc : longueur critique de l'arc (cm)

Ua : tension d'entretien d'arc (kV)

Uc : tension de contournement (kV)

σ = conductivité de la couche de pollution ($\mu S/cm$)

L = longueur de la plaque (cm)

Z_o = impédance de la plaque propre (Ω)

*R₂₆ = résistance de la plaque, entièrement polluée
par une eau de conductivité 26 $\mu S/cm$ (Ω)*

III-1-Introduction

Dans le but de déterminer l'influence de la discontinuité de la couche polluante sur le comportement des isolateurs, nous avons effectué de nombreux essais sur un modèle plan de laboratoire. Ce modèle, qui s'inspire de celui de **P.Claverie** et **Y.Porcheron** [23], est soumis à des contraintes bien définies, la première étant la discontinuité de la pollution en variant de manière régulière la largeur de la pollution. La deuxième contrainte concerne la position de la pollution :

- * pollution côté terre (électrode rectangulaire)
- * pollution côté haute tension (électrode circulaire)

D'autres paramètres sont également pris en considération à savoir :

- * la tension appliquée
- * la conductivité de la couche polluante.

Nous étudierons ainsi l'influence de ces nombreux paramètres sur :

- ◇ le courant de fuite
- ◇ la tension d'entretien de l'arc électrique
- ◇ la tension de contournement

Nous établirons qu'il existe un régime critique à partir duquel nous obtenons une hausse brutale du courant (régime associé au phénomène d'ionisation de l'air). Ce régime dépendra de tous les paramètres cités plus hauts, ceux-ci étant intimement liés les uns aux autres.

Nous avons également effectué quelques essais préliminaires afin de minimiser les erreurs de mesures et de vérifier la nature du courant de fuite dans les deux cas limites qui peuvent se présenter à savoir la pollution maximum (couche continue) et la pollution nulle (surface propre).

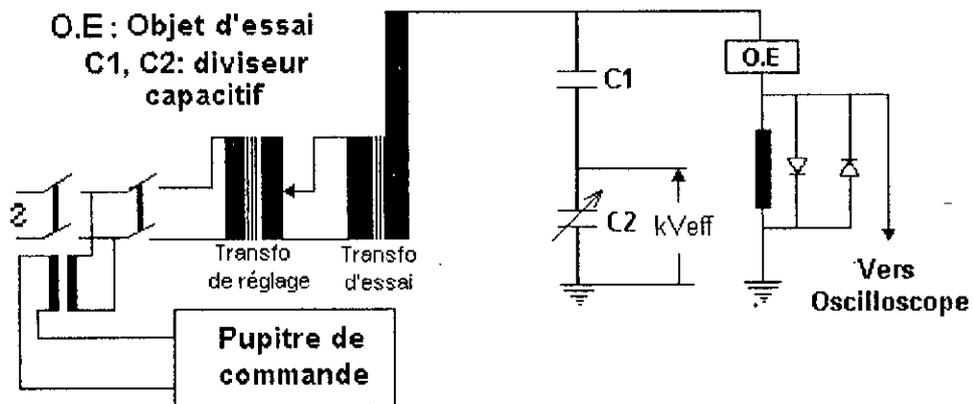
Quelques essais complémentaires nous ont aussi permis de comparer certains de nos résultats par rapport à une pollution extrême en remplaçant la couche de pollution par une couche parfaitement conductrice (aluminium).

Nous en déduisons qu'il existe un "seuil" à partir duquel la valeur de la conductivité influe peu sur le comportement de l'isolateur, d'autres paramètres entrant alors en jeu.

III-2-Essais expérimentaux

III-2-1-Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est constitué d'une alimentation à fréquence industrielle, d'un modèle expérimental (objet d'essai) et d'un circuit de mesure (figure III-1).



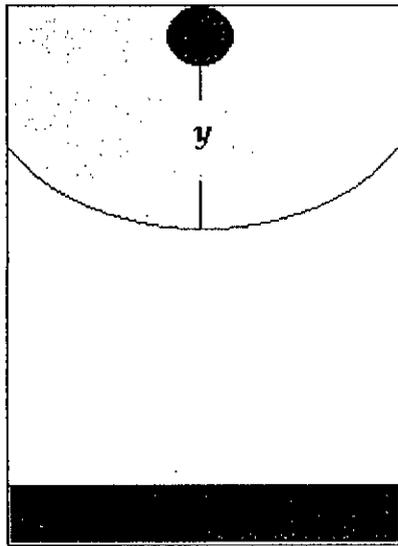
FigIII-1-Dispositif expérimental

a-Circuit d'alimentation

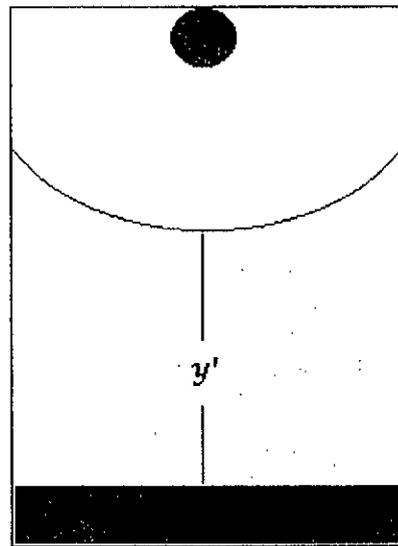
Le circuit d'alimentation est constitué d'un transformateur d'essai 500V/300 kV, 50 kVA, 50 Hz, dont le primaire est relié à un transformateur de réglage permettant d'ajuster la tension à la valeur désirée.

b-Modèle expérimental

Le modèle expérimental (figure III-2), semblable à celui de P.Claverie et Y.Porcheron [23], est constitué d'une plaque en verre ayant la propriété de résister à la chaleur due à l'arc électrique. La dimension de ladite plaque est de : (50x50x0,6) cm. Celle-ci est munie de deux électrodes planes, l'une circulaire de rayon 2,5 cm et l'autre rectangulaire de dimension (50x5) cm. Ces électrodes sont réalisées avec du papier aluminium dont l'épaisseur est de 3 μ m. Les dimensions des électrodes et la distance inter-électrodes L(40cm) sont gardées constantes durant tous les essais.



a-Pollution côté haute tension



b-Pollution côté terre

FigIII-2- Modèle expérimental

c-Circuits de mesures

- Mesure de la tension appliquée

La tension d'essai est mesurée à l'aide d'un diviseur de tension capacitif, relié au secondaire du transformateur d'essai (figure III-1). Ce diviseur est constitué d'une capacité haute tension **C1** de 400 pF, en série avec un ensemble de capacités basses tensions, permettant de réduire la lecture de la tension d'essai. Ainsi, ce dispositif permet de réduire de 1/1000 la lecture de la tension ($U_{lue} = U(C1)/1000$), et donc de relever indirectement sa valeur à partir de :

- un galvanomètre à spot lumineux permettant la lecture de la valeur de crête de la tension
- un voltmètre statique à spot lumineux pour la lecture de la valeur efficace de la tension

Ces deux instruments de mesure possèdent les calibres 75, 150 et 300 kV

- Mesure du courant de fuite.

La mesure du courant de fuite est effectuée à l'aide d'un oscilloscope à mémoire, relié à une résistance de mesure de 100 Ω , connectée entre l'électrode rectangulaire et la terre.

Pour éviter l'influence des parasites dans le signal recueilli, la résistance est introduite dans une boîte métallique mise à la terre, formant ainsi un écran. Ce

dispositif permet également de visualiser simultanément le signal de la tension et celui du courant sur l'oscilloscope, afin de relever le facteur de puissance correspondant. La protection de l'oscilloscope est assurée par un éclateur mis en parallèle avec deux diodes rapides montées parallèlement en tête bêche (figure III-1).

III-2-2-Modes opératoires

a-Préparation du modèle

Avant chaque essai, la plaque isolante est bien nettoyée, puis imbibée de gaz oïl dans les endroits d'emplacement des électrodes en aluminium, de manière à ce qu'aucun espace d'air ne reste entre la plaque et les électrodes. La plaque est ensuite essuyée avec du coton imbibé d'alcool isopropylique pour éliminer toute trace de gaz oïl sur la plaque isolante.

Le modèle est disposé horizontalement sur trois colonnes isolantes, elles mêmes posées sur un support en bois. Le modèle se trouve ainsi placé à environ un mètre du sol, et à une distance suffisamment grande du transformateur d'essai (1,5 m environ), de manière à éviter tout phénomène parasite dû au sol et aux bobinages du transformateur. Ces dispositions sont prises afin de respecter une distance d'au moins 1,5 fois le plus court trajet possible de contournement [40].

b-Préparation de la solution saline

La solution polluante est obtenue à partir d'un mélange d'eau distillée et de chlorure de sodium. La variation du degré de pollution est obtenue en variant la concentration de sel dans l'eau. Nous avons ainsi fixé la conductivité de la solution à la valeur désirée grâce à un conductimètre. Celle-ci est réajustée avant chaque essai afin de garder les mêmes caractéristiques à la solution. Quatre conductivités ont été choisies : 26, 50, 500 et 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

c-Procédé d'application de la couche de pollution

Le dépôt de pollution est obtenu tout d'abord par pulvérisation uniforme de la solution sur tout le modèle. Pour assurer une bonne uniformité, et une bonne reproductibilité de la couche polluante, nous avons gardé, durant tous les essais, la même méthode de pulvérisation (même nombre de pulvérisations de *chaque* côté de la plaque). Ainsi, le premier essai est effectué pour un dépôt de pollution **continu**. Par la suite, la plaque est *partiellement* nettoyée de manière à obtenir une répartition discontinue. Afin de mieux simuler la régularité de la répartition de la pollution, nous avons procédé à une distribution circulaire autour de l'électrode sous haute tension (électrode circulaire). Cette distribution deviendra linéaire au fur et à mesure que l'on s'approche de l'électrode mise à terre (électrode rectangulaire) (figure III-2).

Finalement, la plaque est nettoyée *au fur et à mesure* soit à partir de

l'électrode terre (variations de x , y), soit à partir de l'électrode haute tension (variations de x' , y'). Nous avons alors choisi une plage de variation de la largeur de la zone polluée (ou propre) allant de $0,1L$ à L , avec un pas de $0,1L$ (figure III-2-a et b).

d-Courant de fuite

Après application du dépôt polluant sur la plaque, nous soumettons celle-ci à un niveau de tension déterminé. Nous relevons ainsi le courant de fuite correspondant à chaque largeur de pollution, à chaque conductivité et à chaque position du dépôt polluant.

e-Tension d'entretien de l'arc

Afin de déterminer la tension minimum d'entretien de l'arc électrique, nous imposons au modèle une largeur sèche donnée, soit autour de l'électrode terre (variation de x), ou bien autour de l'électrode haute tension (variation de x'). Pour chaque configuration, nous augmentons progressivement la tension d'essai jusqu'au contournement de la zone sèche, dont nous relevons la tension correspondante. Ce procédé a été utilisé pour les conductivités 50 , 500 et $2000\mu\text{S}/\text{cm}$, et pour les deux positions de la couche polluante. Etant donné le caractère aléatoire de la tension d'entretien de l'arc, les mêmes dispositions ont été prises que pour la tension de contournement, à savoir la répétition des essais (cinq fois) selon les normes [40]. Une valeur moyenne est alors calculée à partir de ces essais.

f-Tension de contournement

La mesure de la tension de contournement du système a été effectuée pour deux conductivités extrêmes (50 et $2000\mu\text{S}/\text{cm}$) et pour les deux configurations de la couche polluante. Pour chaque largeur de la couche polluante, cinq mesures ont été effectuées conformément aux normes utilisées [40].

III-2-3-Essais préliminaires

a-Couche pleine $y=y'=L$

Dans le but d'opérer avec le minimum d'erreurs dans les mesures, nous avons procédé à plusieurs essais préliminaires. En effet, étant donné la difficulté de pouvoir reproduire exactement la même répartition de la pollution (donc la même section efficace équivalente du parcours du courant), nous avons choisi de garder, pour un même niveau de tension, la même plaque (pulvérisation unique). Nous essayons ensuite progressivement la plaque jusqu'à élimination complète de la pollution de manière à obtenir les variations de pollution de 0 à L .

Ainsi, nous gardons le même paramètre "répartition des gouttelettes" pour chaque niveau de tension. Cependant, nous nous sommes demandés si cette

méthode n'engendrait pas une autre erreur de répartition qui est celle de l'assèchement de l'eau pour les niveaux de tension élevés. C'est pourquoi nous avons, pour la plaque entièrement polluée et pour les conductivités peu élevées ($26 \mu\text{S}/\text{cm}$) procédé à des essais de "stabilité" du courant : nous soumettons la plaque à un niveau de tension donné pendant une durée déterminée puis nous relevons le courant de fuite le long de cette période.

Les résultats obtenus nous ont permis d'observer une très faible diminution du courant de fuite après 3 mn d'application et pour les grandes valeurs de la tension (figure III-3-a). Ceci s'explique par un assèchement plus important lorsque la tension est élevée. C'est pourquoi nous avons minimisé les temps de mesure autant que possible : en général une mesure se fait en 5 à 15 secondes suivant la valeur de la tension.

Pour les conductivités élevées (500 et 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), nous nous sommes confrontés à deux phénomènes perturbateurs lorsque la plaque est entièrement polluée :

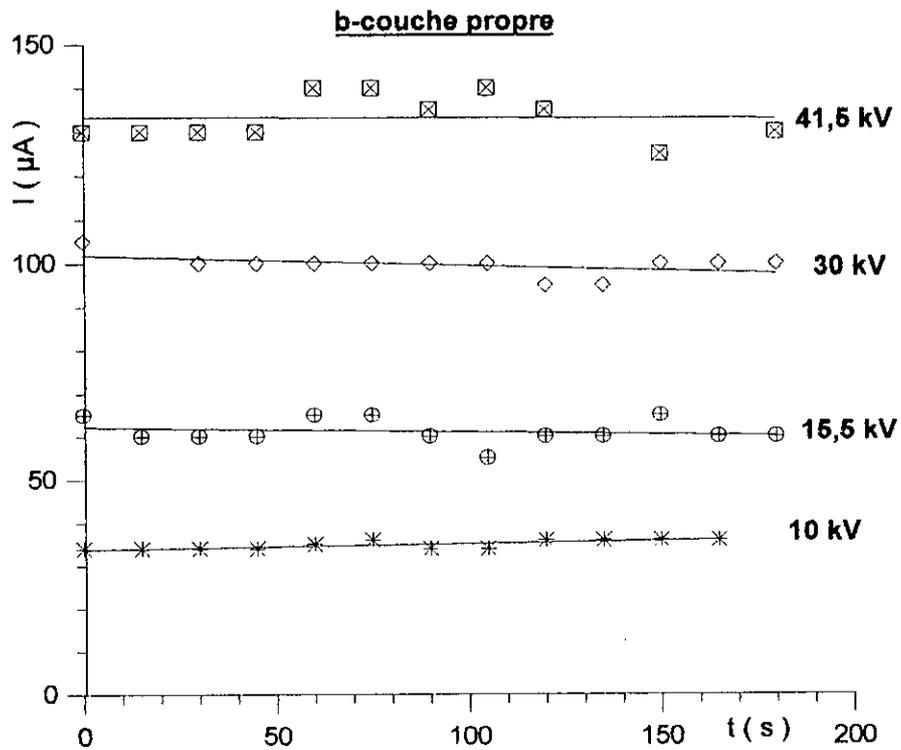
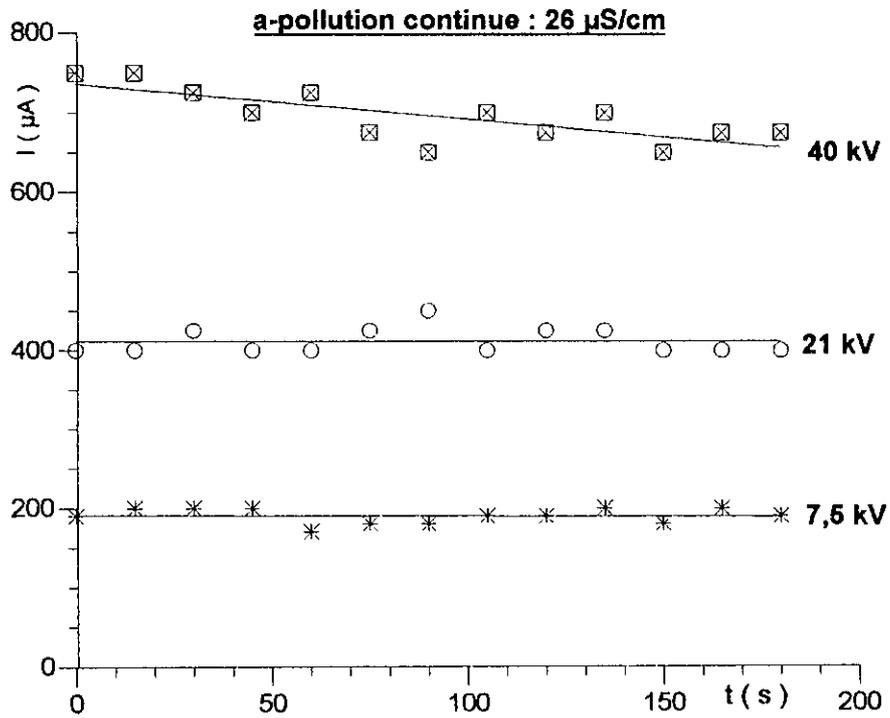
1. Le transformateur, peu puissant par rapport à l'énergie imposée à son secondaire n'a pas pu supporter le régime d'arcs provoqué lorsque la pollution est importante (bruit anormal du transformateur, chute importante de la tension secondaire en charge etc.)
2. L'assèchement, lorsque la pollution est maximum ($Y=L$) devient très important et donc fausse considérablement les mesures suivantes.

C'est pourquoi nous avons choisi, pour les conductivités élevées, d'effectuer les mesures dans une gamme de variation un peu plus étroite de largeur de pollution, à savoir de 0 à 0.9L.

b-Plaque propre $y=y'=0$

Concernant la plaque propre, nous avons également effectué les mêmes essais de stabilité du courant (figure III-3). Les résultats, prévisibles, étant donné qu'aucune perturbation n'est appliquée à la plaque, montrent que le courant pour un même niveau de tension est très stable .

On peut donc considérer que l'impédance équivalente vue des électrodes est indépendante du temps d'application de la tension dans l'intervalle de temps qui nous intéresse.



FigIII-3 : Courant de fuite - temps d'application de la tension

III-2-4-Essais complémentaires

Quelques essais complémentaires nous sont apparus nécessaires afin de mieux comprendre le comportement de la plaque lorsqu'elle est soumise à un régime compris entre l'absence de pollution et la pollution totale.

C'est pourquoi plusieurs essais ont été effectués sur :

- la plaque propre.
- la plaque entièrement polluée avec une conductivité connue.
- la plaque partiellement polluée avec une couche parfaitement conductrice.

a-Essais sur la plaque propre

Dans le cas de la plaque propre, nous avons relevé la caractéristique courant-tension afin d'étudier son comportement en l'absence de pollution.

Nous avons également visualisé simultanément le courant et la tension afin de déterminer la nature du courant de fuite.

Ces essais ont été effectués pour plusieurs niveaux de tension et nous ont permis de noter que :

- le courant, comportant trop d'harmoniques, ne permet pas d'évaluer aisément le déphasage entre la tension appliquée et le courant de fuite. Nous observons toutefois un déphasage largement inférieur à 90^0 , ce qui montre que l'impédance équivalente à la surface propre possède un caractère actif important (photo1).
- l'amplitude du courant croît d'une manière parfaitement linéaire en fonction de la tension (figure III-4-a), ce qui nous a même permis de déterminer l'impédance équivalente Z_0 de la plaque propre dans les limites des tensions utilisées. Ces essais ont été effectués *avant* et *après* chaque série d'essais afin de confirmer la valeur de l'impédance.

Nous obtenons alors :

$$Z_0 = 4,24 \cdot 10^8 \Omega.$$

Ainsi, nous constatons que contrairement à ce qui est parfois admis [53], la surface du verre ne présente pas forcément un caractère capacitif. Certains auteurs [73], d'ailleurs, considérant la surface du verre comme une résistance situent sa valeur entre 10^6 et $10^{13} \Omega / \text{cm}$. Nos électrodes étant distantes de 40 cm, nous sommes bien dans l'intervalle déterminé par ces auteurs. Notons que la valeur trouvée (Z_0), et le déphasage noté dépend probablement de la nature et de la qualité du verre que nous avons utilisé.

En réalité, nous pensons que la contribution capacitive de l'isolateur, étroitement liée à la fréquence du réseau, est beaucoup plus importante dans les cas suivants :

- cas de régimes transitoires lorsqu'on applique une tension continue ou alternative. Ce cas de figure a été souligné par certains chercheurs [40] : cette contribution sera négligeable une fois le régime permanent atteint.
- cas d'essais aux ondes de chocs, où le mouvement, très rapide, des électrons est associé à une fréquence beaucoup plus élevée que la fréquence industrielle (environ 1000 fois plus élevée).

Etant donné que les essais ont été effectués à fréquence industrielle (50Hz), on peut alors expliquer que la contribution capacitive de l'isolateur utilisé soit relativement faible.

b-Essais avec une plaque entièrement polluée

Nous avons effectué ces essais pour la conductivité 26 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ceux-ci ont pour but d'évaluer également l'impédance équivalente vue des électrodes dans le cas de pollution totale (couche continue).

Nous remarquons que le courant comporte également des harmoniques (photos 2) et présente un caractère résistif, le déphasage observé étant apparemment nul. Ce résultat a d'ailleurs été établi par nombre d'auteurs [67].

Cependant, si nous avons une reproductibilité quasi parfaite des résultats dans le cas de la plaque propre, il n'en a pas été de même pour la plaque polluée par une couche continue. Nous avons essayé de reproduire autant que possible la répartition des gouttelettes mais il est bien évident que la reproductibilité est plus délicate dans le cas de la couche pleine, la pulvérisation étant manuelle.

C'est pourquoi deux courbes *extrêmes* sont présentées sur la caractéristique courant-tension (figure III-4-b). Nous avons ainsi obtenu pour la conductivité 26 $\mu\text{S}/\text{cm}$ une impédance (qui est en fait une résistance) R_{26} comprise entre 0,5 et $1,3 \cdot 10^8 \Omega$.

c-Essais avec une couche parfaitement conductrice (aluminium)

Afin d'observer le comportement du modèle face à une pollution de conductivité extrême, nous avons procédé au remplacement de la couche de pollution par du papier aluminium, dont la conductivité peut être considérée comme infinie par rapport à l'eau salée utilisée. Nous avons ainsi procédé à des essais de courant de fuite pour trois niveaux de tension différents, pour chaque largeur et pour les deux positions de la couche polluée. Les résultats, comparés ensuite aux essais effectués avec une couche polluante de conductivité 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ seront largement commentés dans le paragraphe III-3-4.

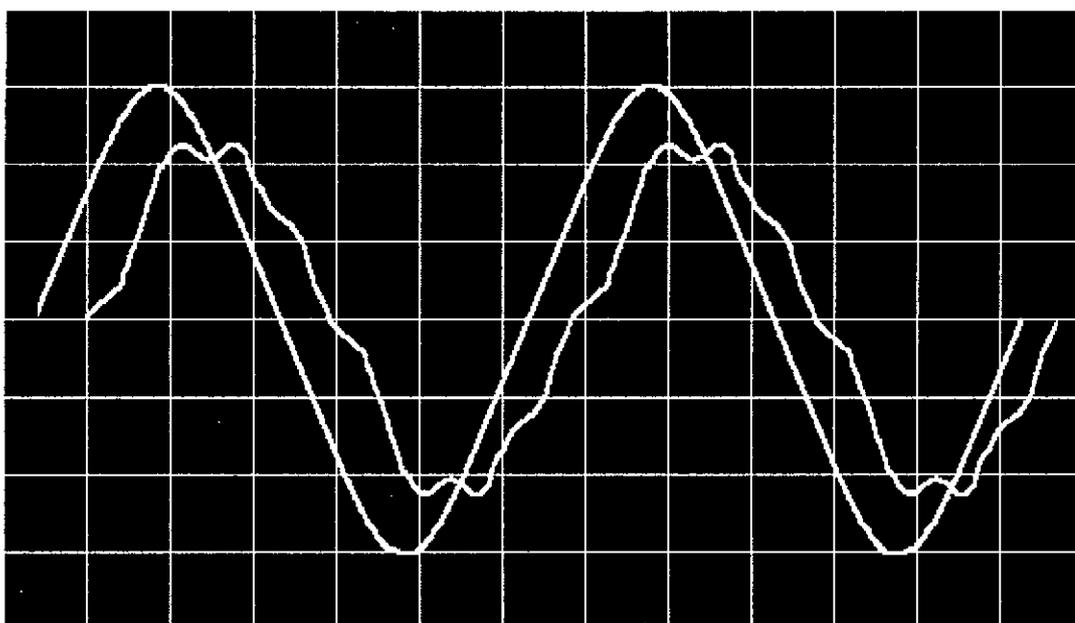


Photo 1 : caractéristiques courant-tension en fonction du temps dans le cas où la surface de la plaque est propre

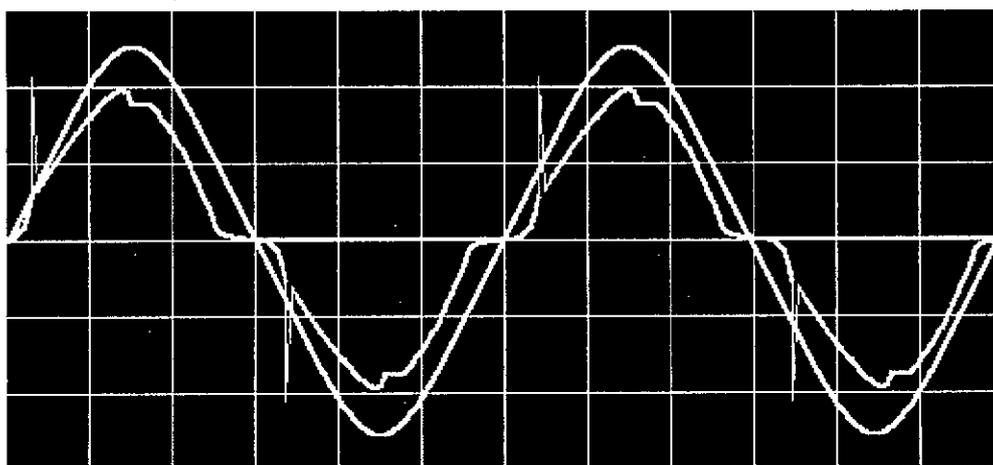
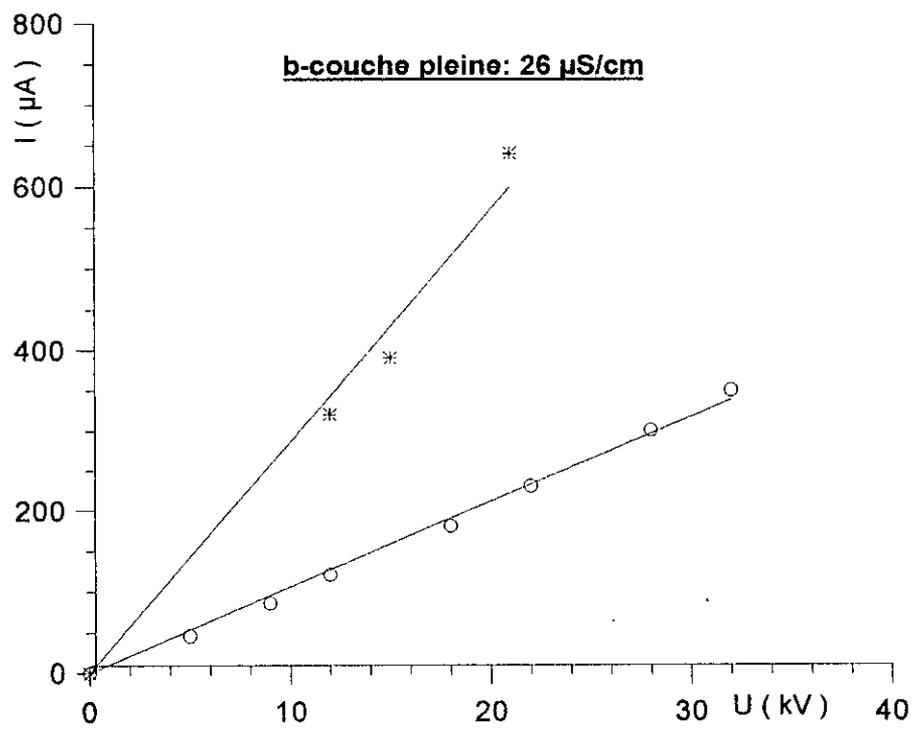
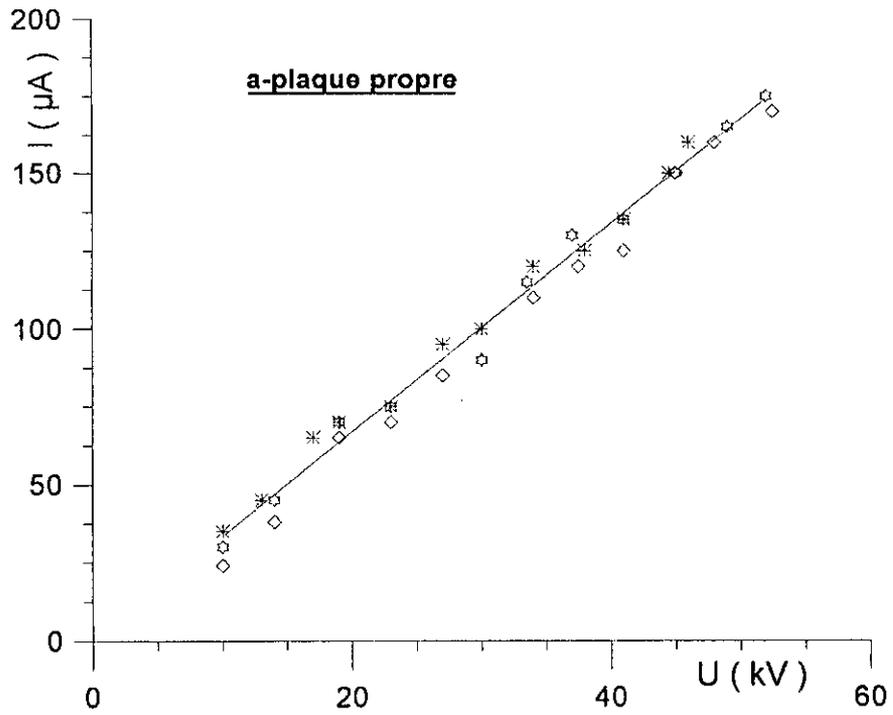


Photo 2 : caractéristiques courant-tension en fonction du temps dans le cas de la plaque entièrement polluée.



FigIII-4 : Courant de fuite - Tension appliquée

III-3-Interprétation des résultats

III-3-1-Courant de fuite

a-Influence de la largeur de la pollution

Les caractéristiques courant de fuite-largeur de la pollution à plusieurs niveaux de tension et pour les quatre conductivités utilisées montrent que toutes les courbes ont une allure croissante (figures III-5 à III-8). Cette augmentation paraît régulière tant que la largeur de la couche polluante reste inférieure à une limite qui dépend d'une part de la tension imposée et d'autre part de la position de la couche de pollution (côté terre ou côté haute tension).

Nous notons également qu'il se produit le même phénomène pour les quatre conductivités mais à des niveaux différents.

Ainsi, même pour les faibles tensions, à partir d'une certaine largeur de pollution, le courant augmente assez brutalement, les courbes présentant un "coude" (figures III-5 et III-6). Ce coude exprime en effet le passage de la couche partiellement polluée (donc comportant une zone sèche à impédance élevée) à la couche entièrement polluée où la résistance devient très faible et provoque donc un courant nettement plus élevé.

Cette croissance brutale du courant, due au passage couche pleine-couche partiellement polluée a pu être mesurée pour les conductivités 26 et 50 μ S/cm. Cependant nous constatons, pour les tensions élevées (30 et 36 kV), une augmentation brutale du courant, *même dans le cas de couches partiellement polluées.*

C'est le cas par exemple des points caractérisés par :

- U =36 kV, y=28 cm, 26 μ S/cm (figure III-5-a),
- U =30 et 36 kV, y'=32 cm, 26 μ S/cm (figure III-5-b),
- U =36 kV, y=32 cm, 50 μ S/cm (figure III-6-a).
- U =36 kV, y'=32 cm, 50 μ S/cm (figure III-6-b).

Concernant les conductivités élevées nous avons préféré éviter les régimes critiques (arcs) où la zone sèche est court-circuitée ce qui explique l'allure plus régulière des courbes à 500 et 2000 μ S/cm avec tout de même une augmentation plus accentuée aux grandes valeurs de largeurs de pollution et/ou pour les tensions les plus élevées.

En observant l'allure des courbes nous constatons que :

- il existe une largeur limite de la couche polluante à partir de laquelle le courant croît brutalement *même* lorsque la plaque est partiellement polluée.
- cette limite dépend de la tension appliquée, de la conductivité ainsi que de la

position de la couche de pollution.

Ceci peut s'expliquer de la manière qui suit :

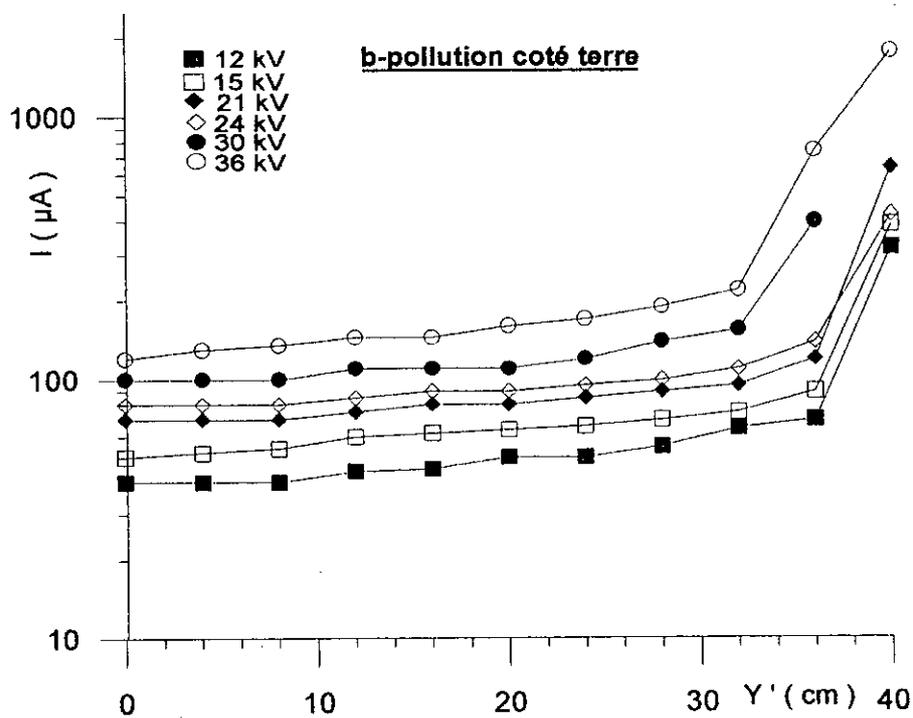
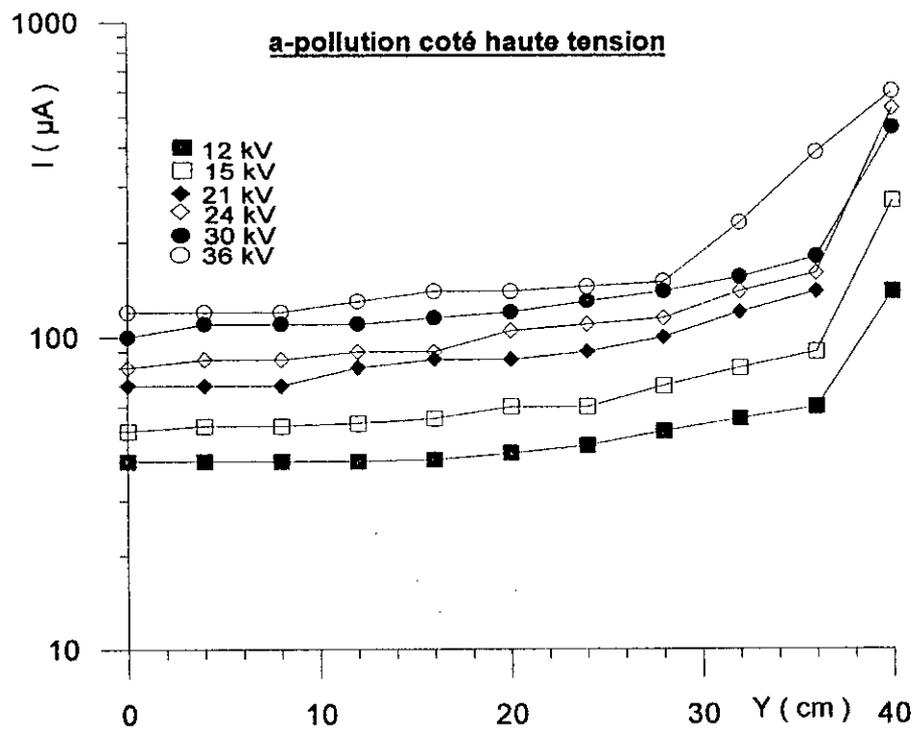
- ◇ Aux tensions peu élevées, lorsqu'une zone sèche est établie autour d'une des électrodes, le courant est nettement plus faible par rapport au courant de la couche pleine. Ceci est tout à fait plausible à partir du moment où la zone sèche possède une impédance linéique beaucoup plus élevée que celle de la zone polluée : cette dernière aura donc moins d'influence sur le courant de fuite.
- ◇ Aux tensions plus élevées, l'établissement d'une zone propre de 0.1L ou plus provoque soit :
 1. Un effet couronne intense, donc un affaiblissement de l'impédance de la zone sèche et une élévation du courant.
 2. Un arc électrique court-circuitant la zone sèche, et un courant encore plus élevé (du même ordre de grandeur que le courant relevé lorsque la pollution est continue).

Ces deux phénomènes (couronne et arcs) seront prépondérants lorsque la tension "reportée" sur la zone sèche est élevée et devient proche de la tension disruptive de l'espace compris entre l'électrode et la zone polluée, cet espace étant constitué de l'ensemble air-verre (interface).

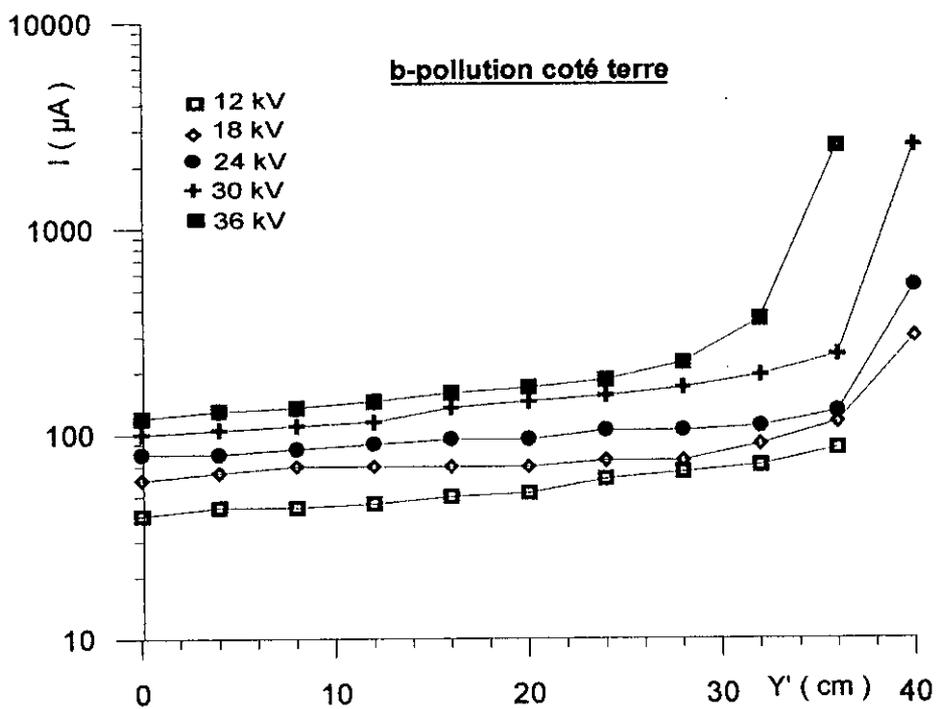
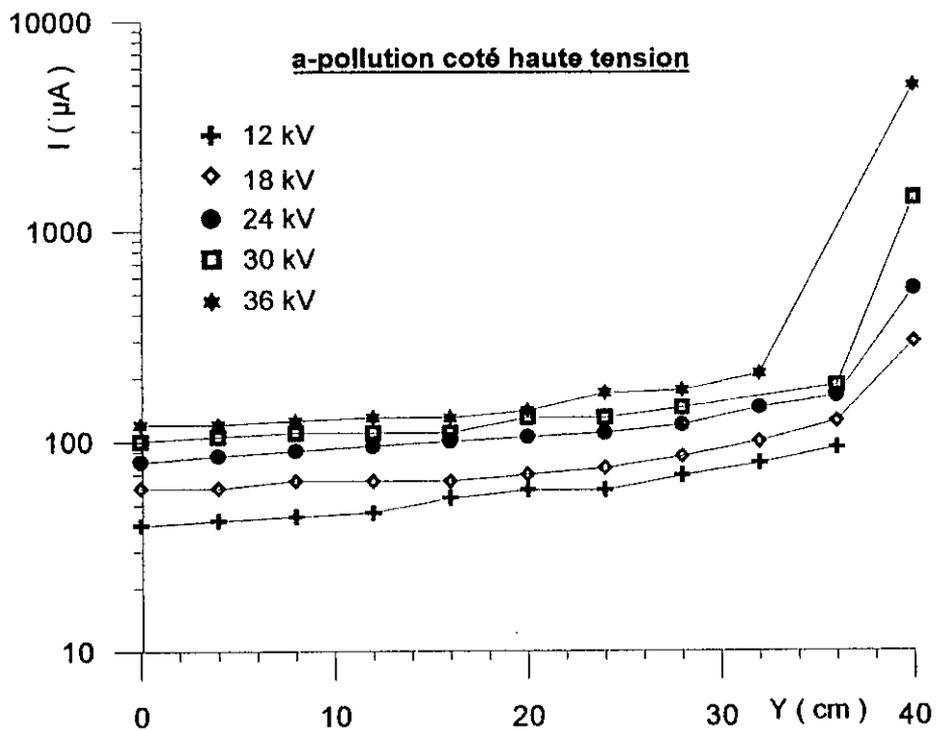
Cette tension reportée dépendra :

- * **de la position de la couche polluante**
- * **de la conductivité de la couche polluante**
- * **de la tension appliquée à la plaque**

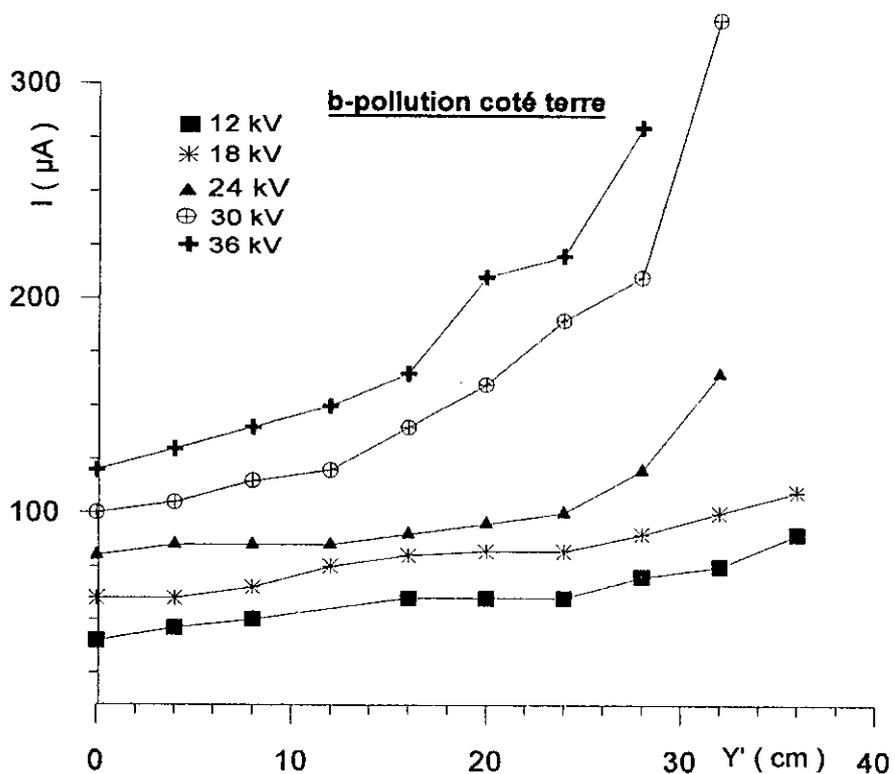
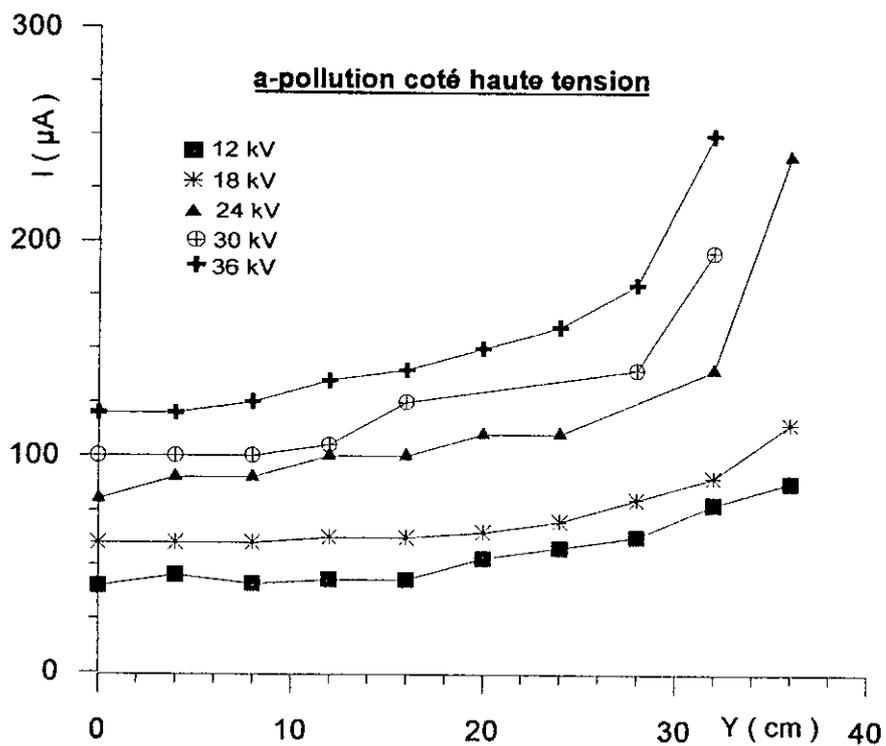
C'est pourquoi, le courant de fuite, assez stable pour les faibles largeurs de pollution, augmente brutalement pour les niveaux de tension élevés et pour les grandes largeurs de pollution.



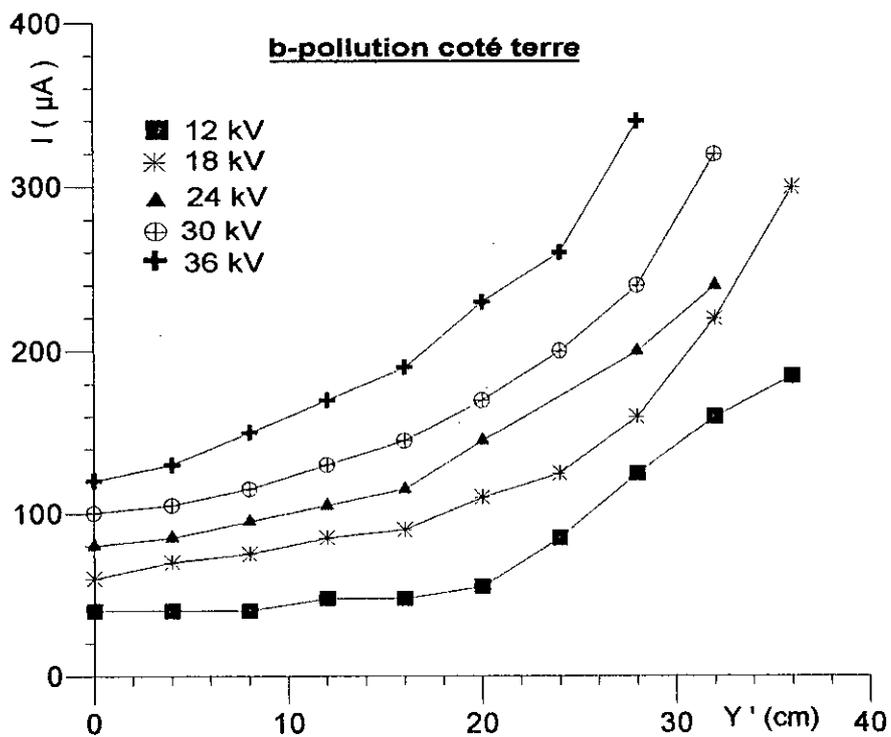
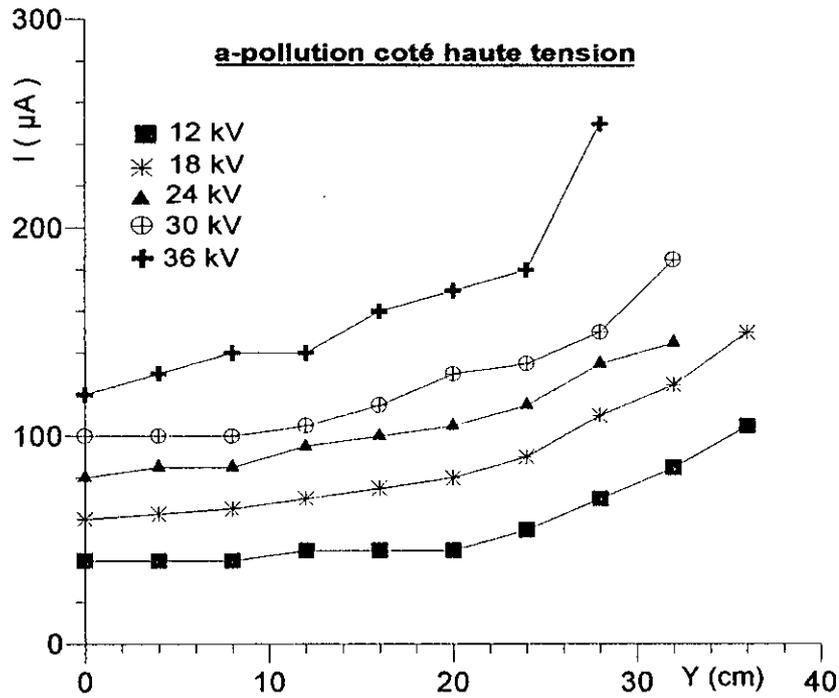
FigIII-5 : Courant de fuite - Largeur de la pollution
 $\sigma = 26 \mu\text{S/cm}$



FigIII-6 : Courant de fuite - Largeur de la pollution
 $\sigma = 50 \mu\text{S/cm}$



FigIII-7 : Courant de fuite- Largeur de la pollution
 $\sigma = 500 \mu\text{S/cm}$



FigIII-8 : Courant de fuite - Largeur de la pollution
 $\sigma = 2000 \mu S/cm$

b-Influence de la position de la couche de pollution

Afin de mieux évaluer l'influence de la position de la couche polluante sur le courant de fuite, quatre familles de courbes sont présentées sur les figures III-9 et III-10. Celles-ci montrent que pour les faibles niveaux de tension (12 et 24kV) et les conductivités 26, 50 et 500 μ S/cm, la position de la couche influe peu sur le courant de fuite (figures III-9-a, III-9-b et figure III-10-a).

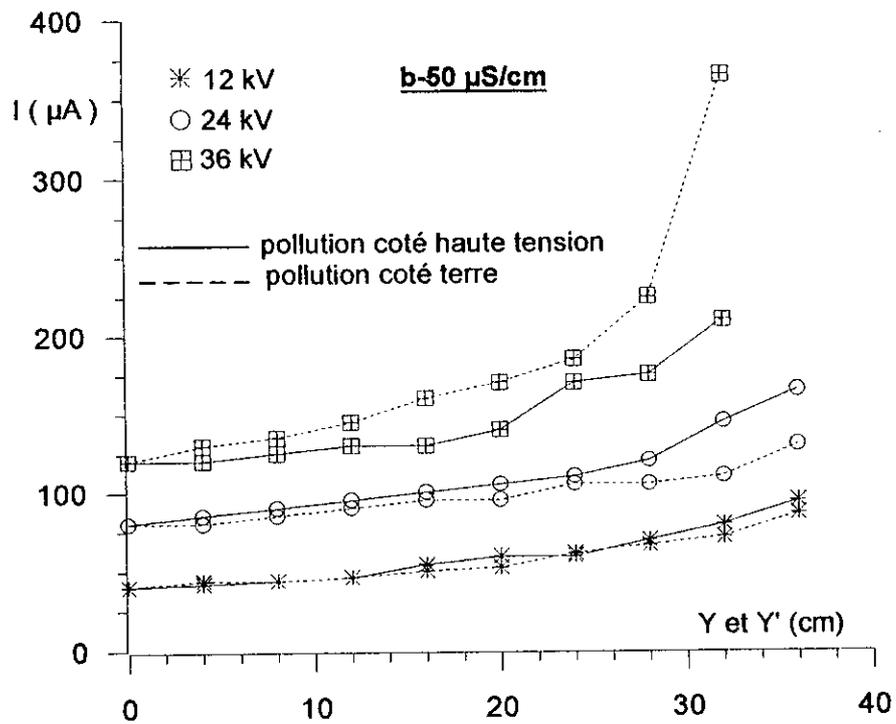
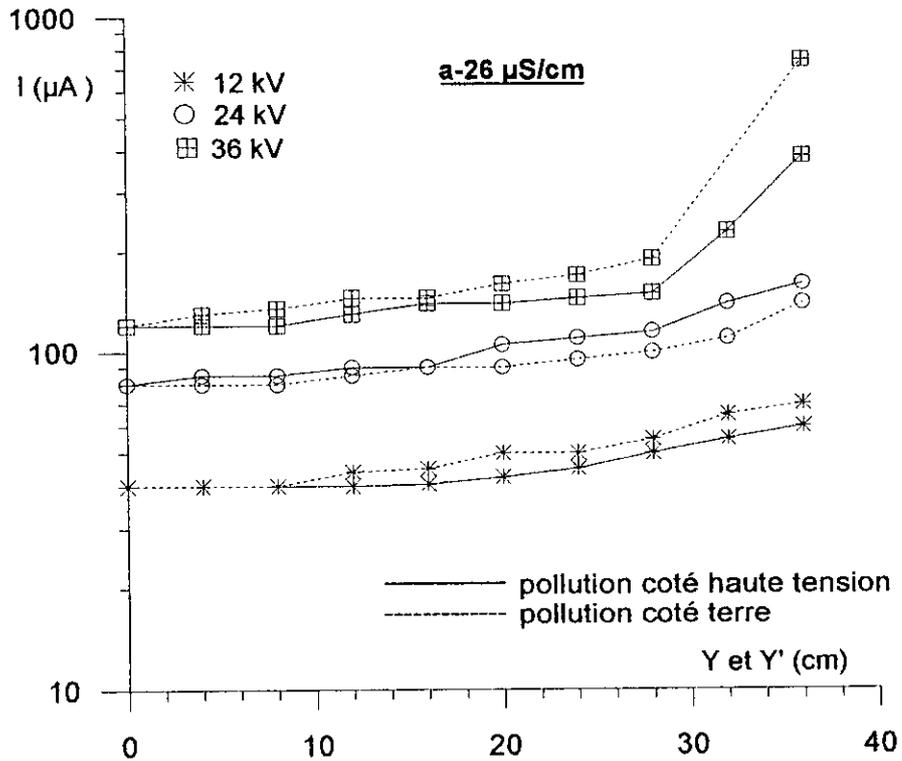
Ce résultat concerne *même* les grandes largeurs de pollution (36 cm), et les conductivités élevées (500 μ S/cm) où les courbes sont confondues pour le niveau 12 kV (figure III-10-a).

Ce résultat, assez inattendu, montre que l'impédance équivalente vue des électrodes ne dépend pas de la position de la couche de pollution lorsqu'il n'y a pas de phénomène d'ionisation. En d'autres termes, la position de la couche de pollution n'a pas d'influence sur le courant de fuite tant que la tension n'a pas atteint une limite correspondant probablement à la tension disruptive de l'interface air-verre pour la largeur sèche considérée.

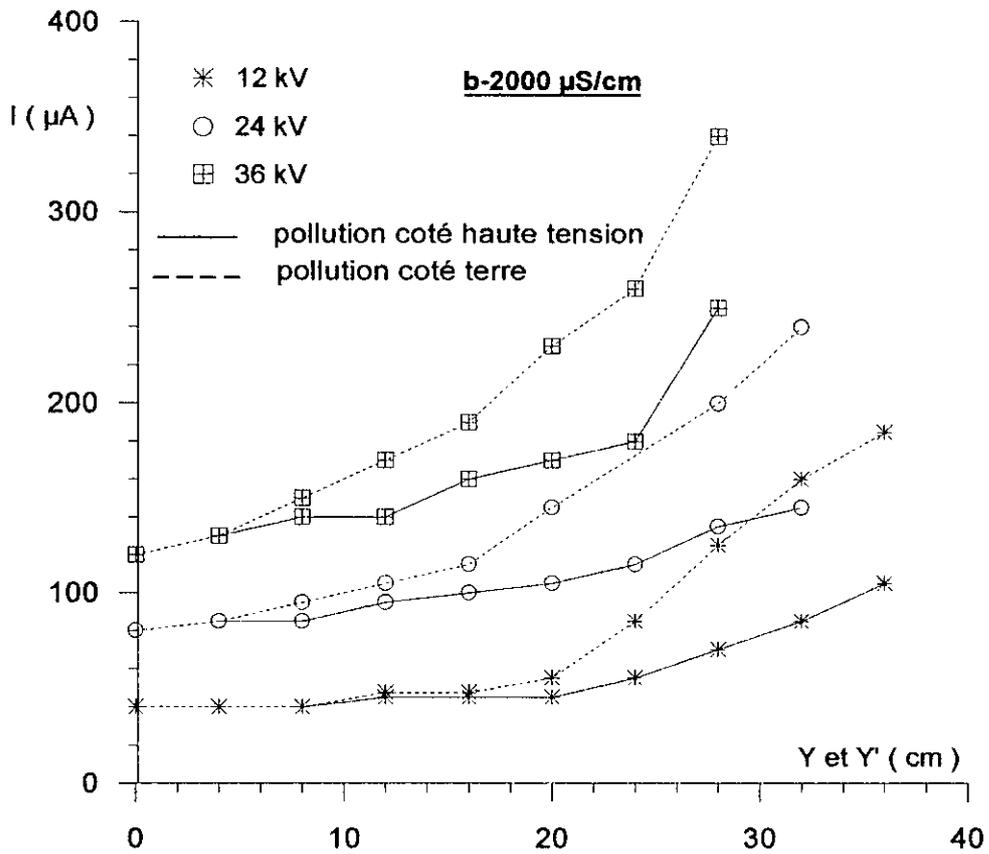
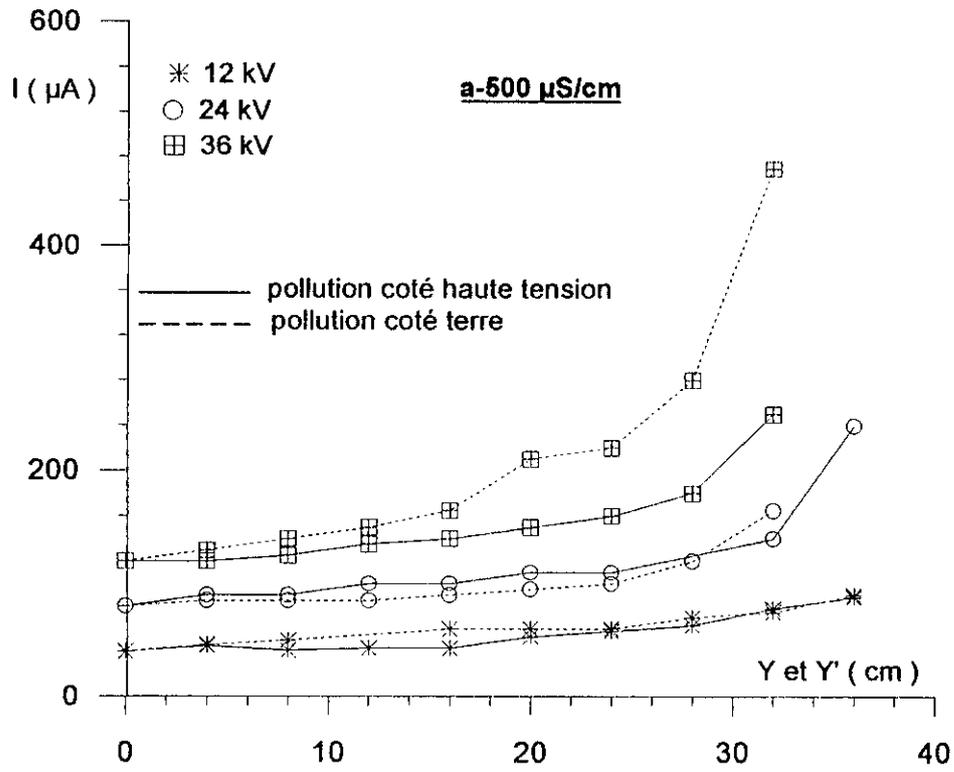
Pendant cette limite est apparemment atteinte lorsque la conductivité devient élevée puisque pour les même niveaux de tension (12 et 24 kV) et pour la conductivité 2000 μ S/cm, nous observons un net décalage entre les courbes $I(y)$ et $I(y')$ lorsque la largeur de pollution augmente. Nous observons alors un courant beaucoup plus élevé lorsque la pollution est établie côté terre.

Pour les tensions élevées (36 kV) et pour toutes les conductivités, l'analyse des courbes montre que l'élévation du courant de fuite est plus intense lorsque la pollution est établie côté terre, et ce, à partir d'une largeur donnée de pollution. Ceci pourrait s'expliquer par une plus grande probabilité de phénomènes de conduction de la zone sèche, par effet couronne et arcs, lorsque celle-ci est du côté haute tension. En effet le rayon de courbure de l'électrode circulaire provoque un champ électrique, vraisemblablement plus élevé que celui de l'électrode rectangulaire. L'établissement de zones propres favoriserait donc davantage d'une part une forte ionisation de l'air et d'autre part le régime d'arcs pour les tensions critiques.

Quoi qu'il en soit, nous noterons une influence considérable de la position de la couche polluante à partir de 30 kV pour les conductivités 26, 50 et 500 μ S/cm et de 12 kV pour la conductivité 2000 μ S/cm.



FigIII-9 : Courant de fuite - Largeur de la pollution



FigIII-10 : Courant de fuite - Largeur de la pollution

c-Influence de la conductivité

Pour mieux mettre en évidence l'influence de la conductivité sur le courant de fuite, nous présentons sur le même graphe les variations du courant de fuite en fonction de la largeur de la pollution pour les quatre conductivités (figures III-11 à III-15) et pour plusieurs niveaux de tensions. Nous constatons que la conductivité influe sur le courant de fuite, surtout lorsque la couche polluante est établie côté terre (figures III-11-b à III-15-b).

En effet, lorsque la pollution est établie côté haute tension la conductivité a apparemment peu d'influence sur le courant de fuite, même pour des tensions relativement élevées (30 et 36 kV) (figures III-14-a et III-15-a). Par contre pour la pollution côté terre, le courant de fuite se démarque brutalement pour la conductivité la plus élevée (2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), même lorsque la tension est faible (figures III-11 à III-13), et ce à partir d'une largeur déterminée de pollution. Cette largeur exprime la limite à partir de laquelle l'impédance équivalente vue des électrodes diminue avec la conductivité (phénomène très peu visible quand la pollution est établie côté haute tension).

Cette diminution pourrait s'expliquer par la superposition de deux phénomènes :

- le rayon de courbure faible de l'électrode haute tension (influence de la position où une zone sèche établie autour de l'électrode circulaire provoque un champ très élevé, voir paragraphe précédent).
- la faible impédance de la couche polluante lorsque la conductivité est élevée. Celle-ci contribue non seulement à réduire l'impédance totale vue des électrodes mais également (et surtout) à augmenter la tension reportée aux bornes de la zone sèche et provoquer un affaiblissement de son impédance par effet couronne.

En d'autres termes, le phénomène d'ionisation, associé au champ élevé produit par l'électrode circulaire, est d'autant plus renforcé que l'impédance de la couche polluante est faible.

Ainsi, la tension "reportée" sur la zone sèche est plus élevée lorsque la résistance de la couche polluante diminue (c'est à dire lorsque sa conductivité augmente), et ce pour un même niveau de tension et une même largeur de pollution. Cette augmentation de la tension reportée ne fera qu'accentuer davantage le phénomène de conduction de la zone sèche.

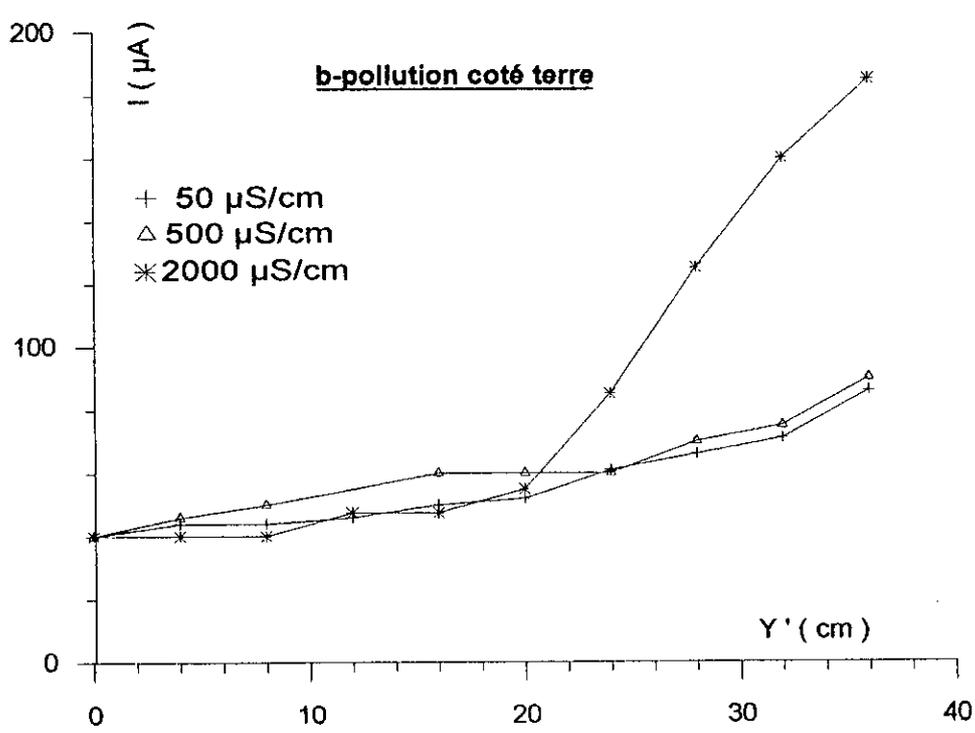
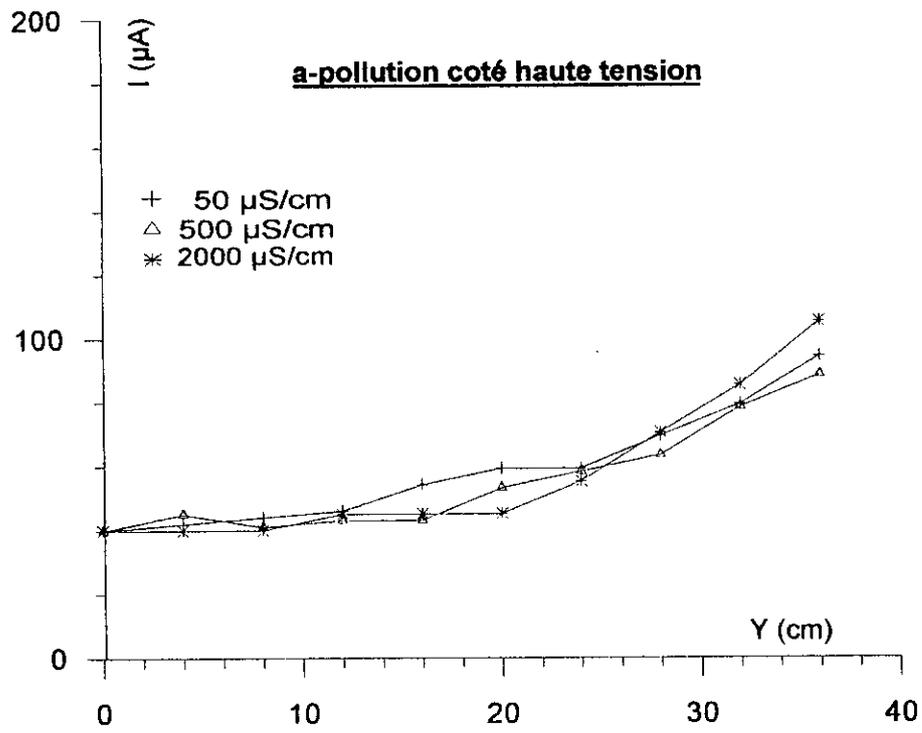
Ceci explique l'allure des courbes montrant le "saut" brutal du courant lorsque la conductivité est élevée même lorsque la tension est faible (résultat très remarquable pour la conductivité 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 12 kV, 20 cm, figure III-11).

Pour illustrer ce phénomène, quatre familles de courbes sont présentées (figures III-16 et III-17). Celles-ci expriment l'influence de la conductivité à des largeurs précises de la couche de pollution (8, 12, 28 et 36 cm). Dans le cas des faibles largeurs (8 et 12 cm), on constate le peu d'influence que peut exercer la conductivité sur le courant de fuite, ce qui est tout à fait logique, étant donné

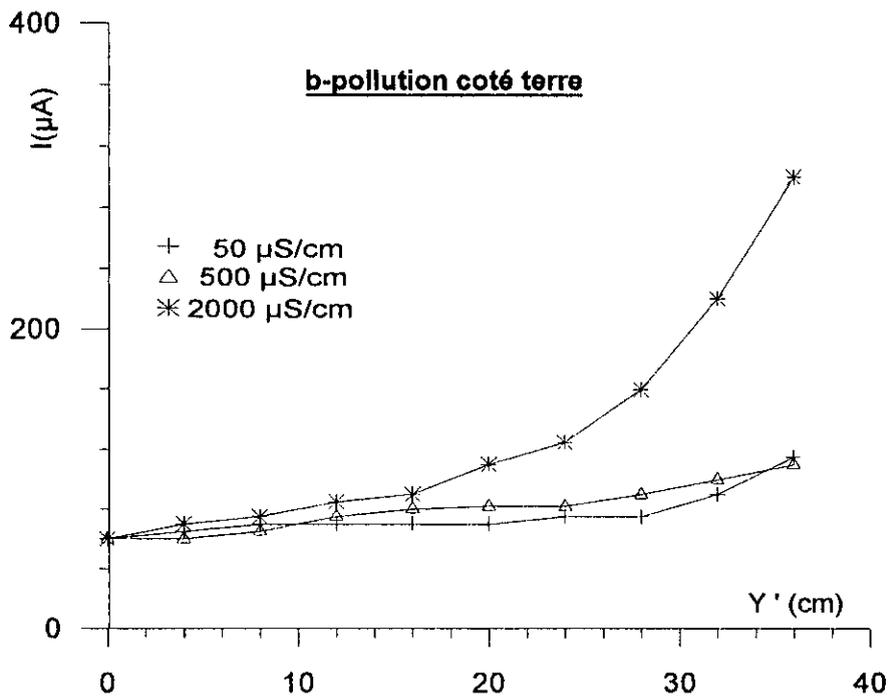
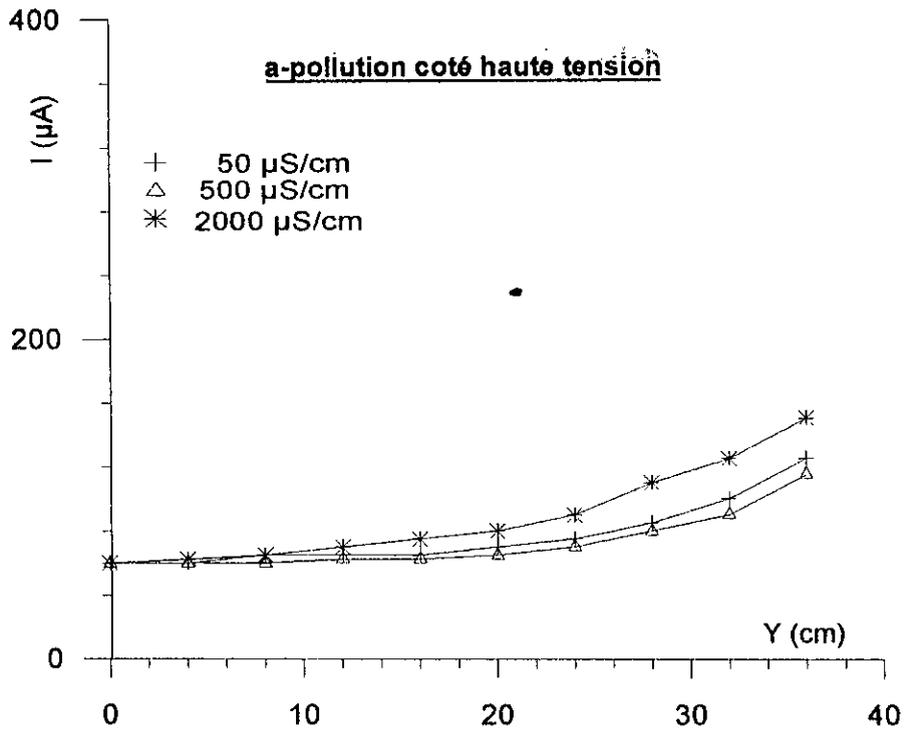
l'impédance certainement très élevée de la zone propre par rapport à celle de la couche polluante.

Par contre pour les grandes largeurs (28 et 36 cm), on voit bien qu'il existe une conductivité à partir de laquelle le courant augmente pour la couche polluante du côté terre. Cependant, aucune variation n'est enregistrée lorsque la couche polluante est du côté haute tension, sauf pour la tension la plus élevée à savoir 36 kV.

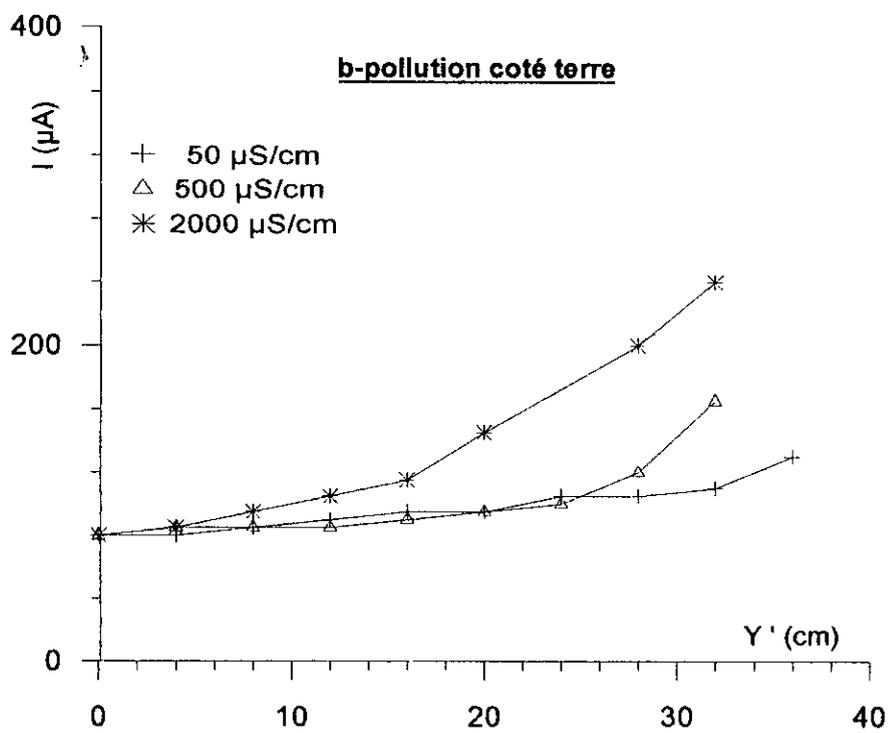
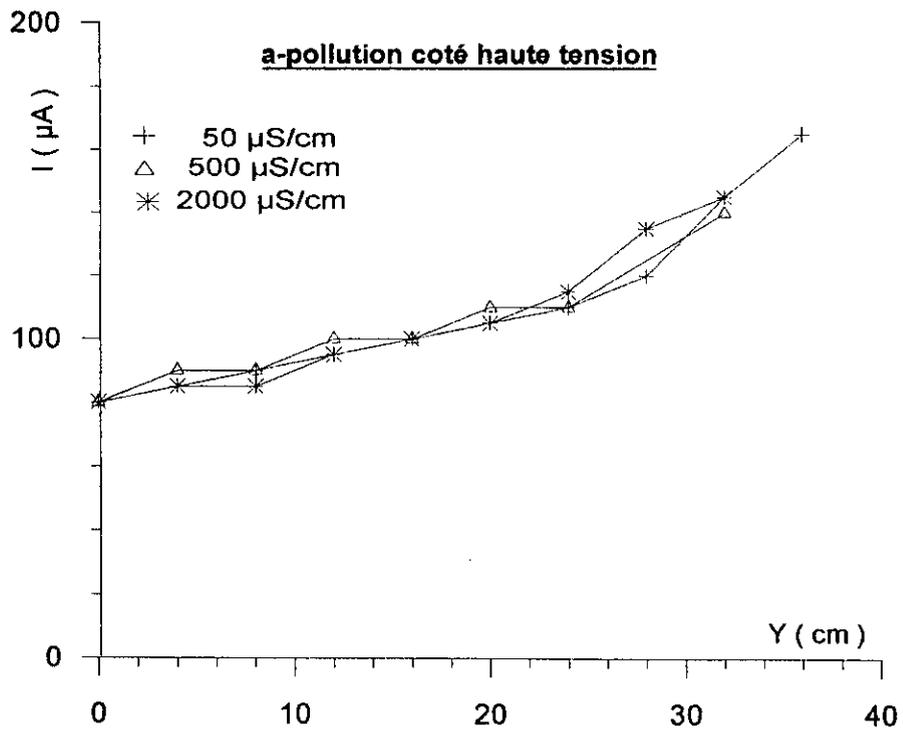
Ce résultat montre ce sont les phénomènes d'ionisation sur la surface propre qui sont les plus décisifs. En effet, nous avons déjà montré que ces phénomènes sont plus importants, lorsque la couche polluante est du côté terre. L'établissement de la couche polluante aura donc principalement pour rôle de "reporter" une partie de la tension appliquée sur la zone sèche. Celle-ci provoque un courant toujours plus élevé lorsque la couche polluante est du côté terre, pour une même largeur et une même conductivité, par rapport au cas où la même couche polluante est du côté haute tension, ce qui explique l'allure des courbes.



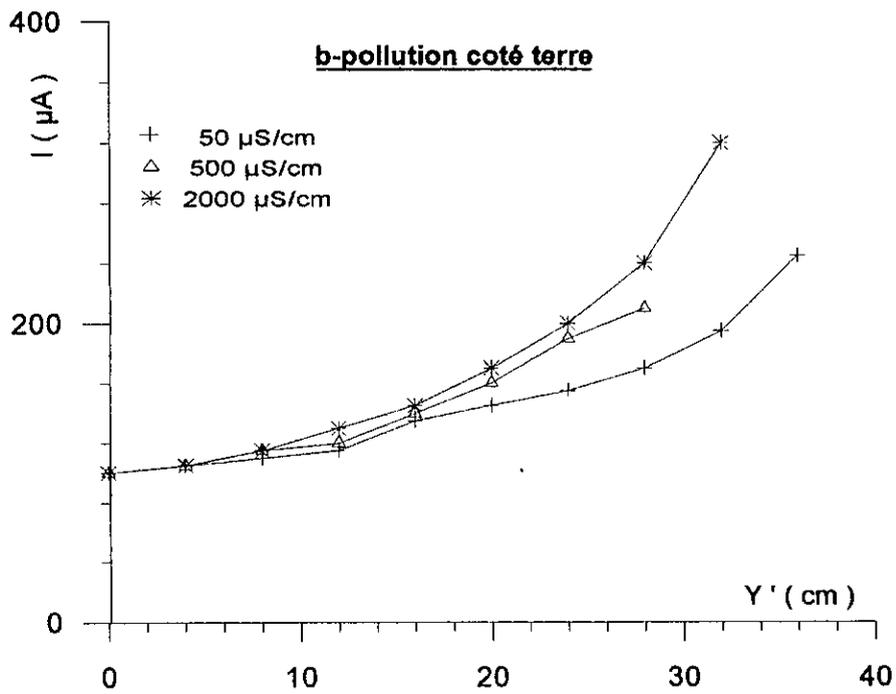
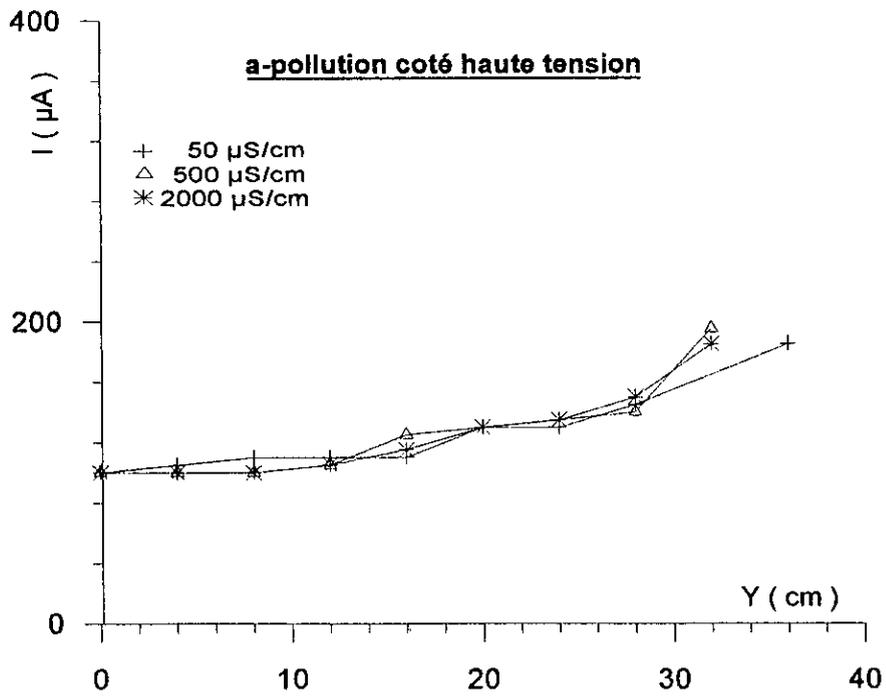
FigIII-11 : Courant de fuite - Largeur de la pollution
 $U=12 \text{ kV}$



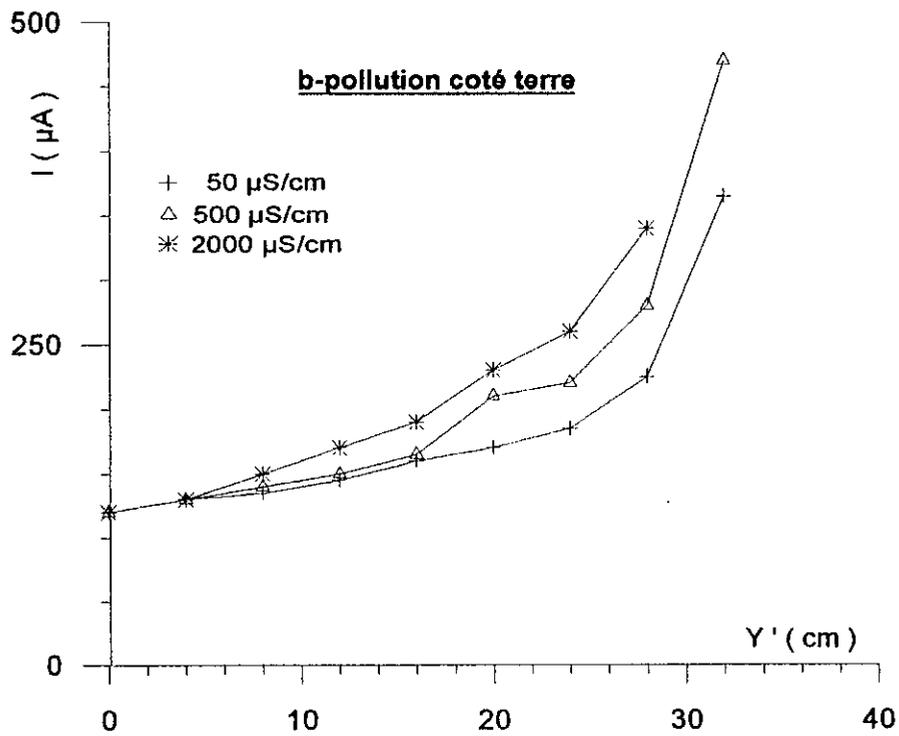
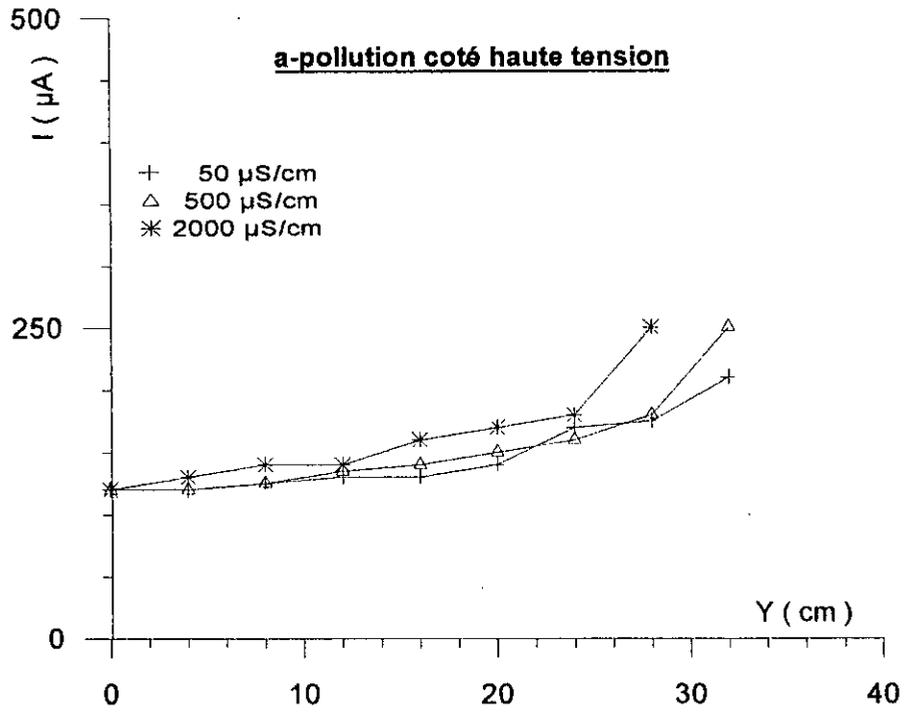
FigIII-12 : Courant de fuite - Largeur de la pollution
 $U=18 \text{ kV}$



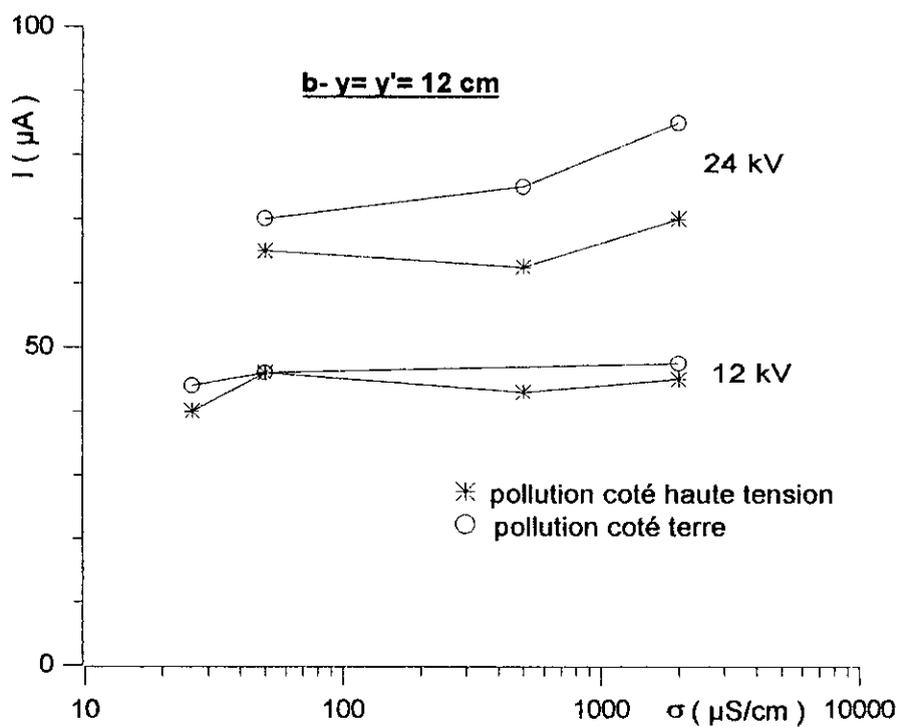
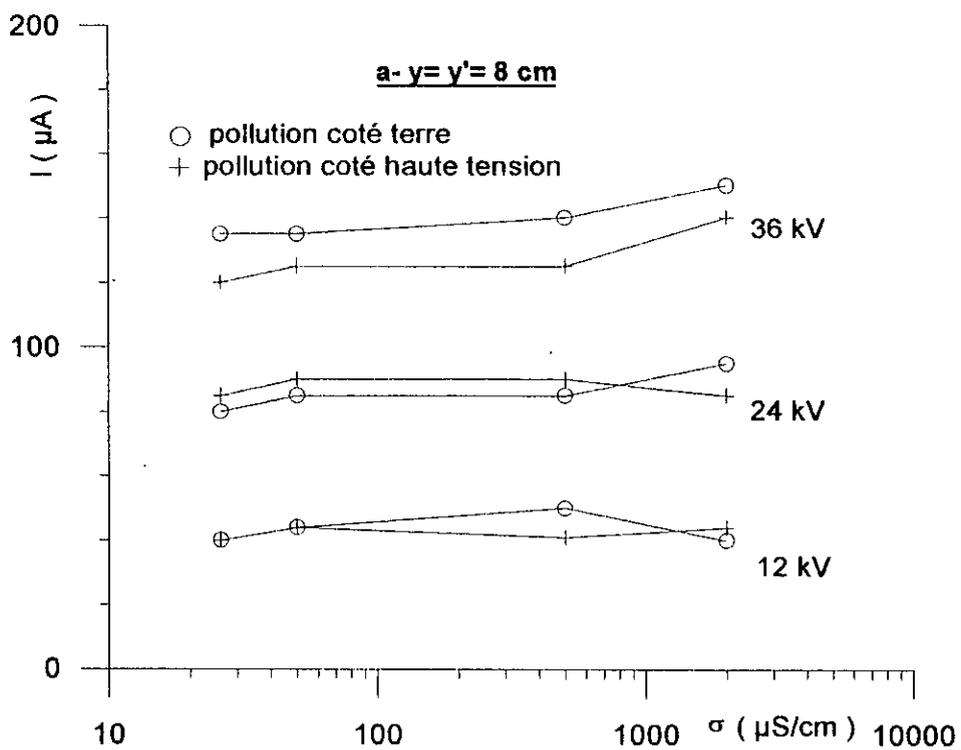
FigIII-13 : Courant de fuite - Largeur de la pollution
 $U=24 \text{ kV}$



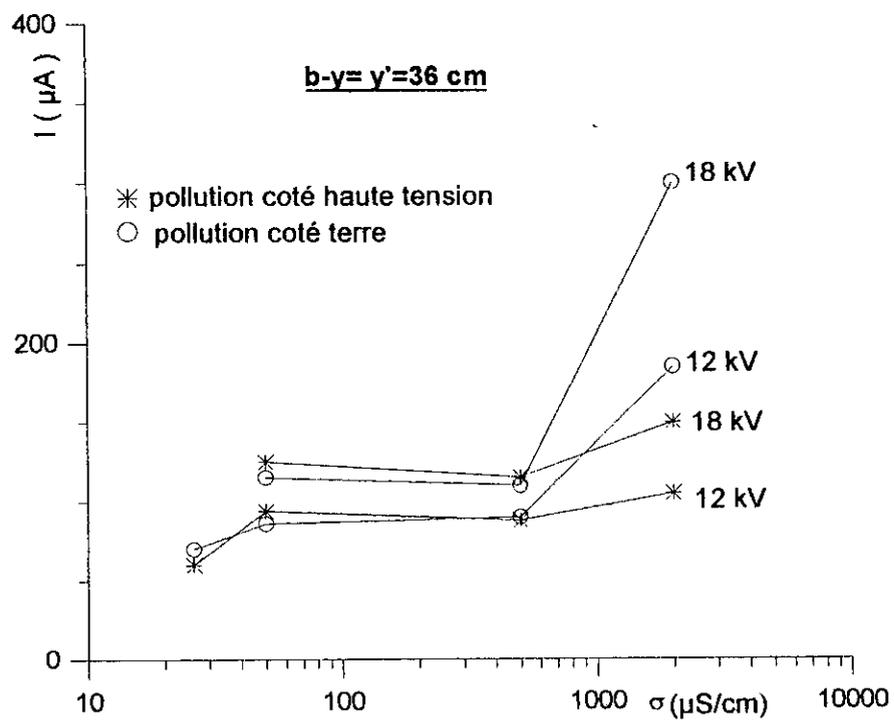
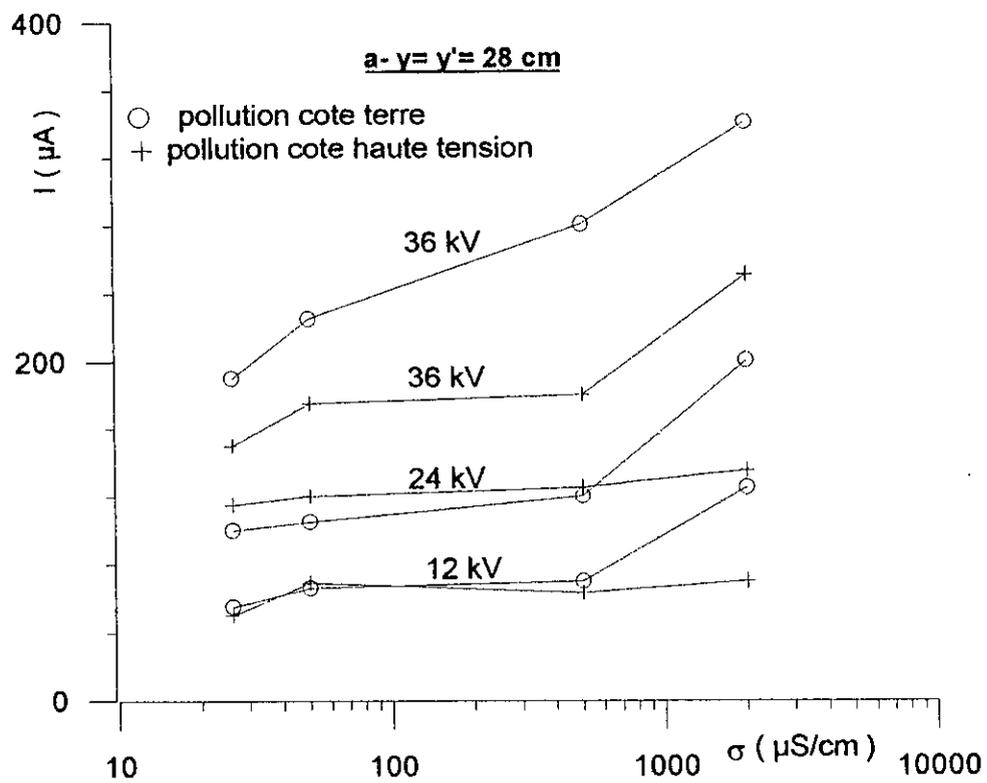
FigIII-14 : Courant de fuite - Largeur de la pollution
 $U=30\text{ kV}$



FigIII-15 : Courant de fuite - Largeur de la pollution
 $U=36 \text{ kV}$



FigIII-16 : Courant de fuite - Conductivité



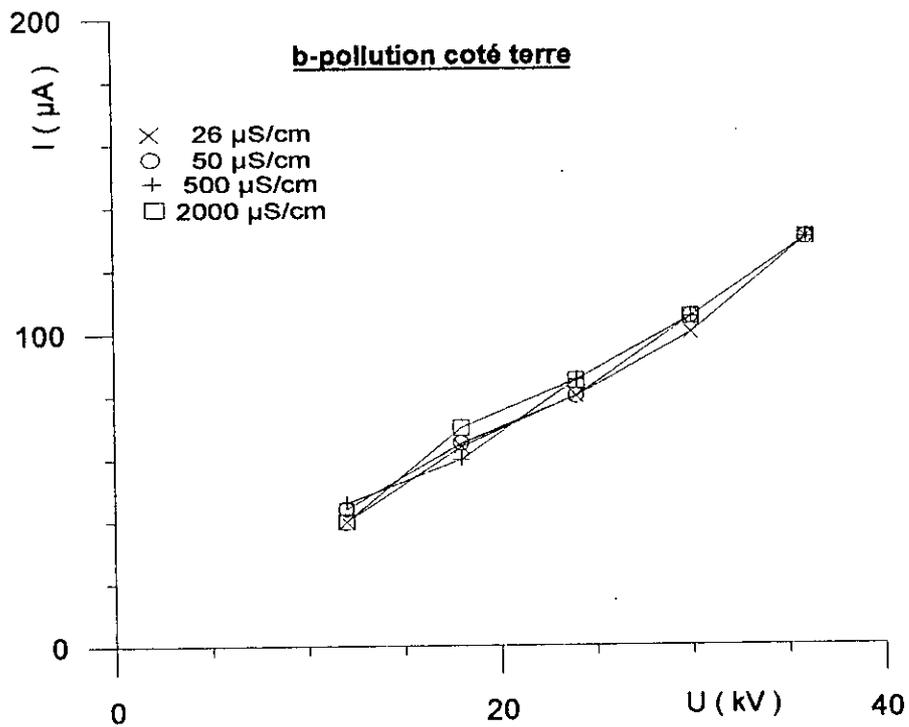
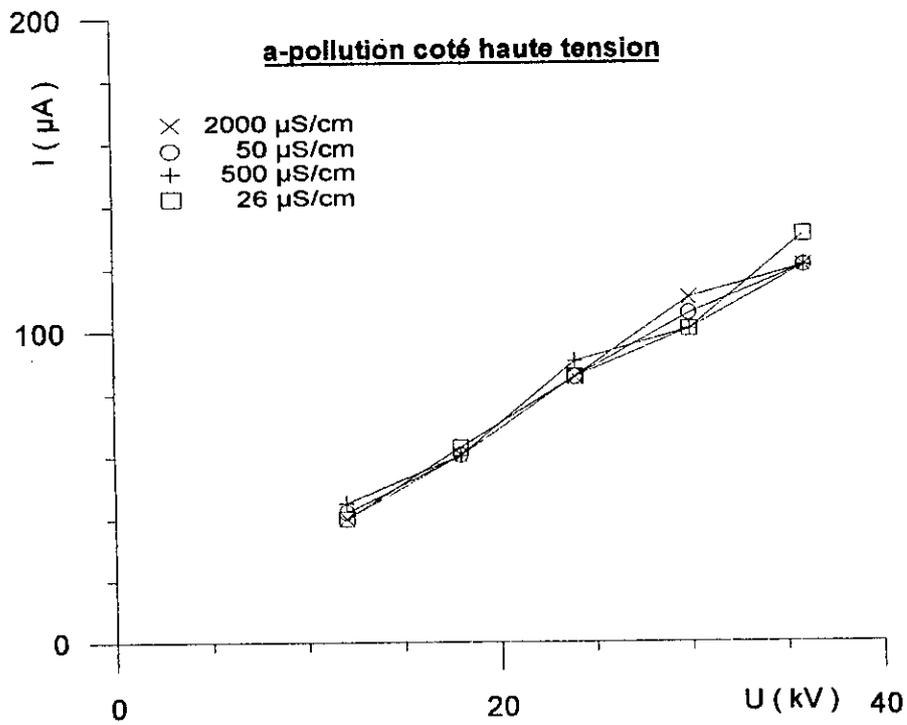
FigIII-17 : Courant de fuite-Conductivité

d-Influence de la tension d'alimentation

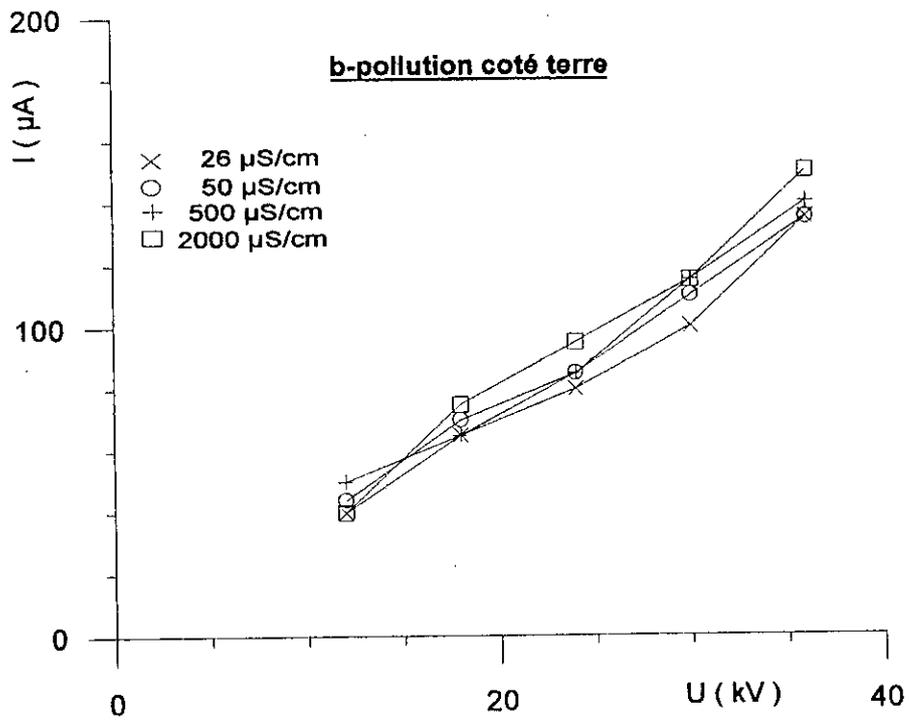
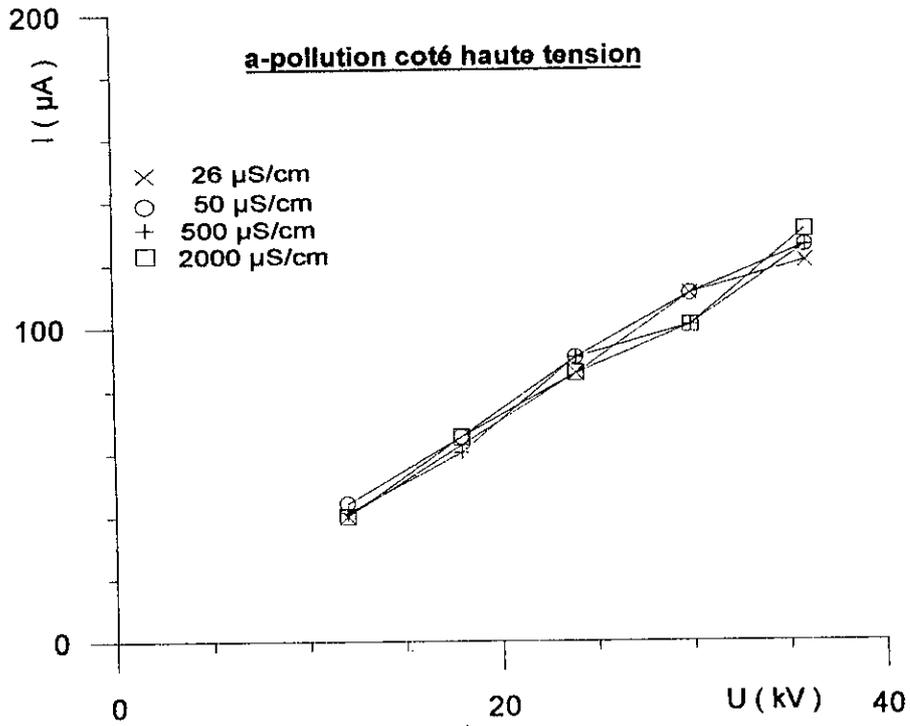
Nous avons représenté sur les figures III-18 à III-23 les variations du courant de fuite en fonction de la tension pour plusieurs largeurs de la couche de pollution et pour les deux positions de la couche polluante ainsi que pour les quatre conductivités. Ces courbes expriment l'influence de la tension d'alimentation sur l'impédance équivalente de l'ensemble couche propre-couche polluée, aux grandes valeurs de la largeur de pollution.

Nous constatons en effet que l'impédance équivalente illustrée par la pente de la courbe courant - tension reste assez stable pour les faibles valeurs de la couche de pollution ($y=4$ à 20 cm) et pour toutes les conductivités. Le système semble suivre donc une loi ohmique où l'impédance totale pour une largeur donnée et une conductivité donnée ne dépend pas de la tension appliquée, ce qui est logique si on néglige les phénomènes de conduction de la zone sèche.

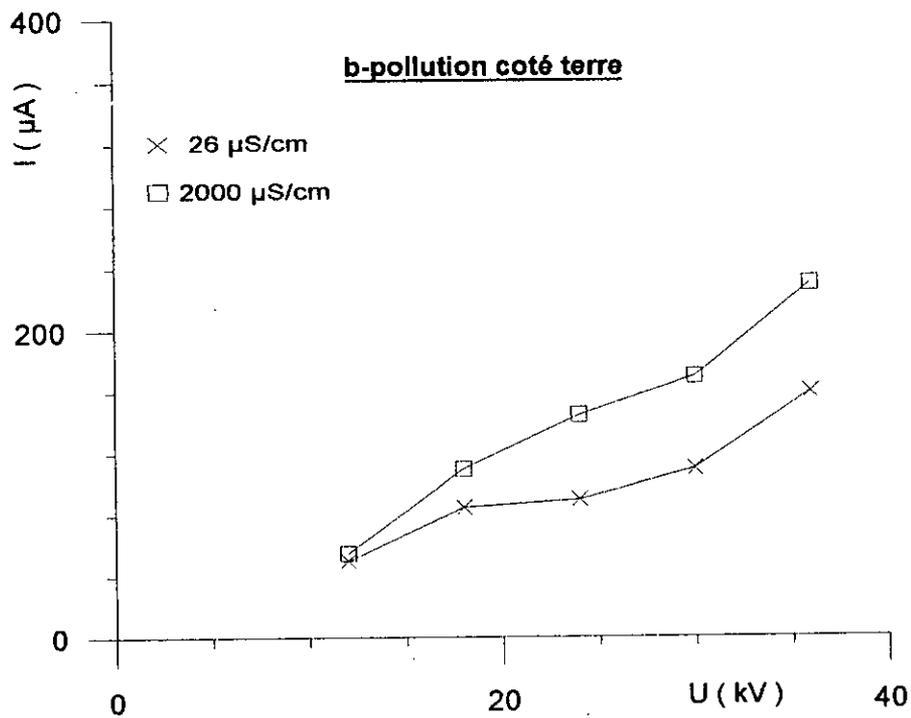
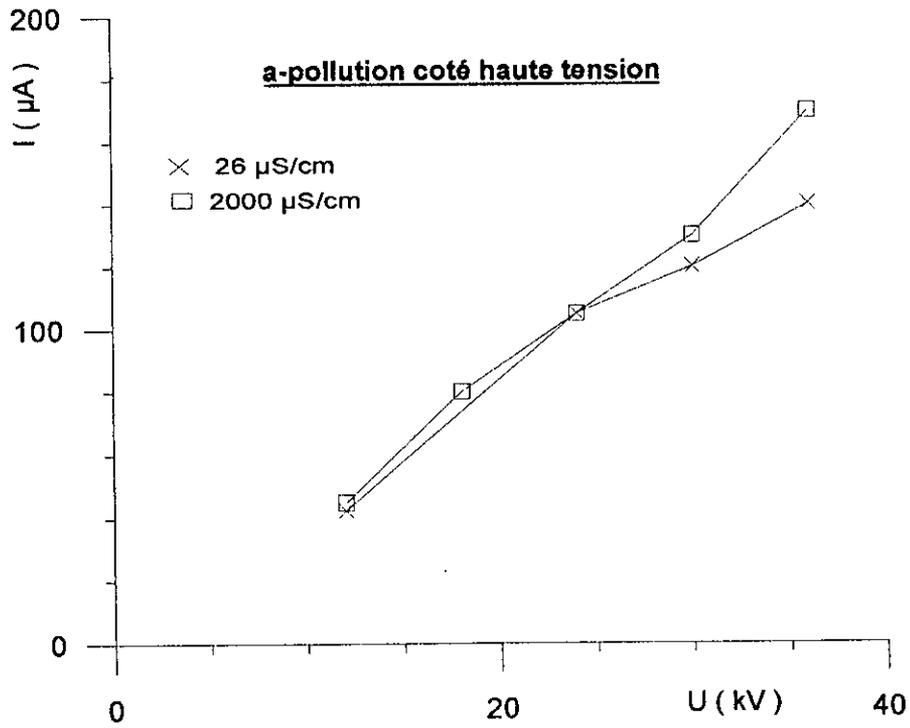
Cependant, à partir d'une largeur "critique" associée à un niveau de tension élevé, les courbes prennent une allure exponentielle: le système perd donc largement son caractère ohmique. Cette configuration critique est bien illustrée sur les figures III-24 à III-27. Ainsi, à titre d'exemple, pour $\sigma = 50 \mu\text{S/cm}$, la largeur critique se situe entre 32 et 36 cm, pollution côté haute tension et entre 28 et 32 cm côté terre (figure III-25-a et b). Cette largeur critique est observée pour une tension supérieure à 24 kV (figure III-25-a et b). Ceci montre bien que l'impédance équivalente vue des deux électrode à une largeur donnée de pollution reste constante tant que l'air compris entre l'électrode et la couche ne perd pas son caractère isolant. Par la suite, lorsque le régime critique (associé à un niveau de tension élevé), est atteint, l'impédance de la zone sèche diminue et le système perd son caractère linéaire.



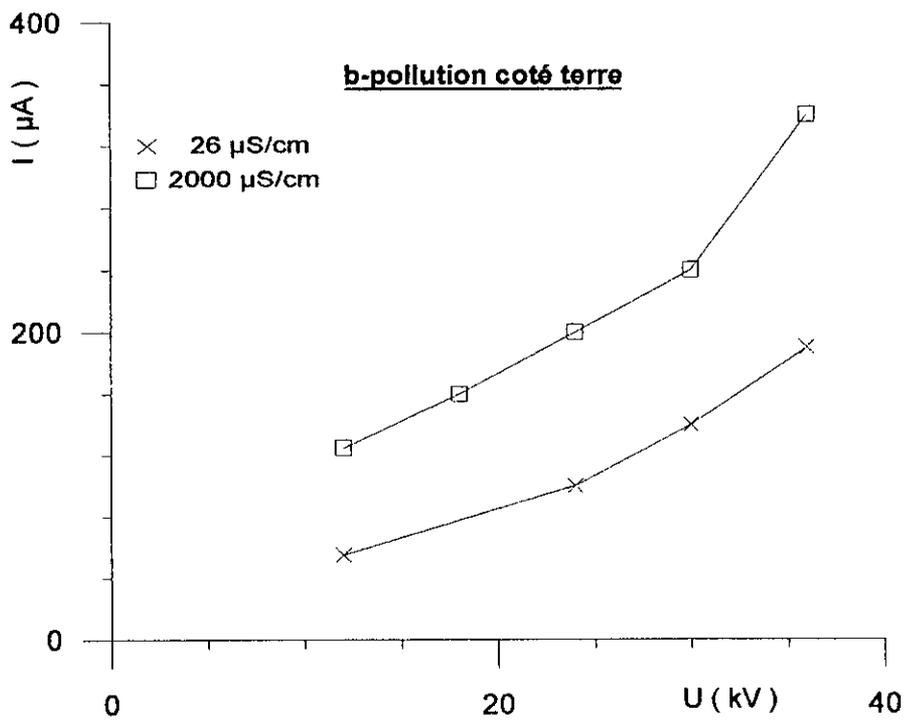
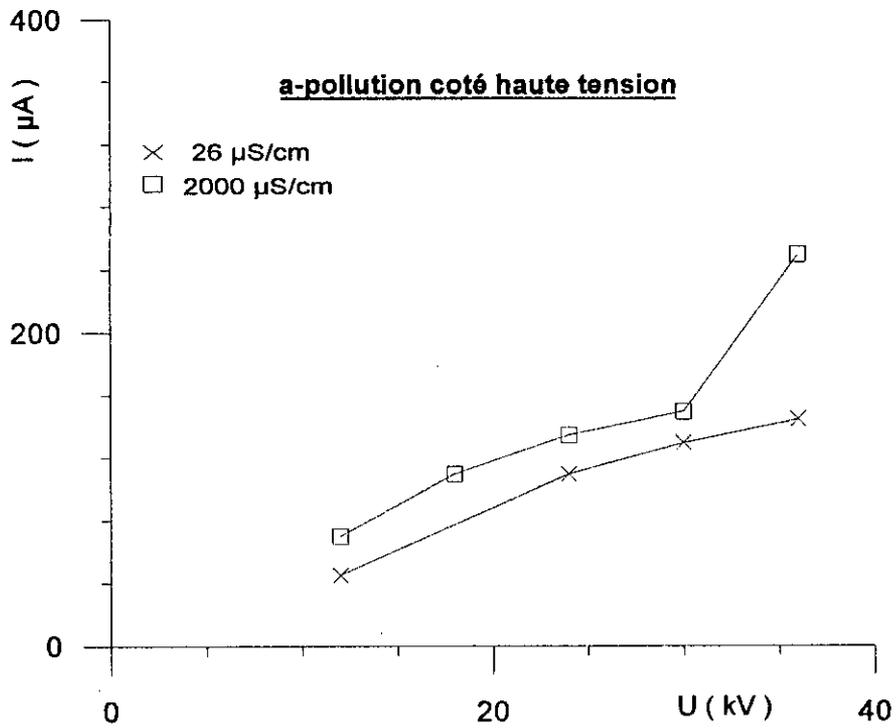
FigIII-18 : Courant de fuite - Tension appliquée
 $Y=Y'=4 \text{ cm}$



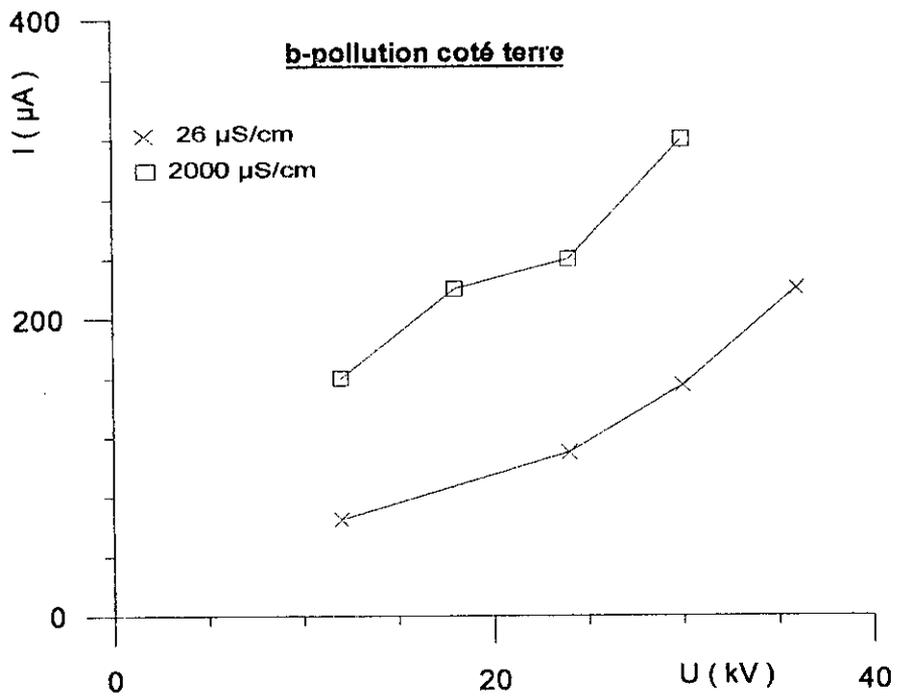
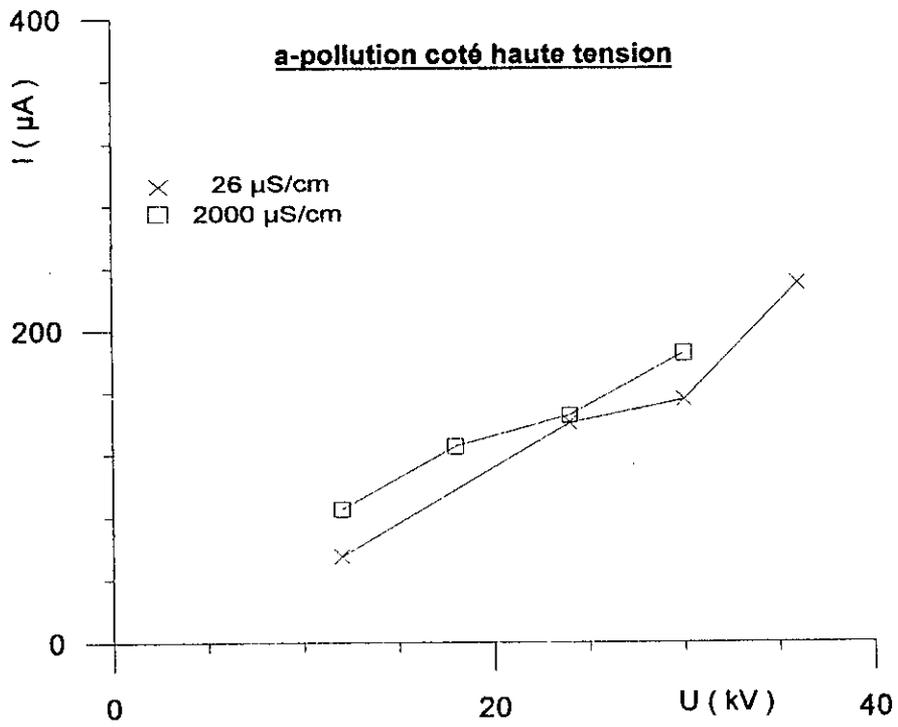
FigIII-19 : Courant de fuite - Tension appliquée
 $Y=Y'=8\text{ cm}$



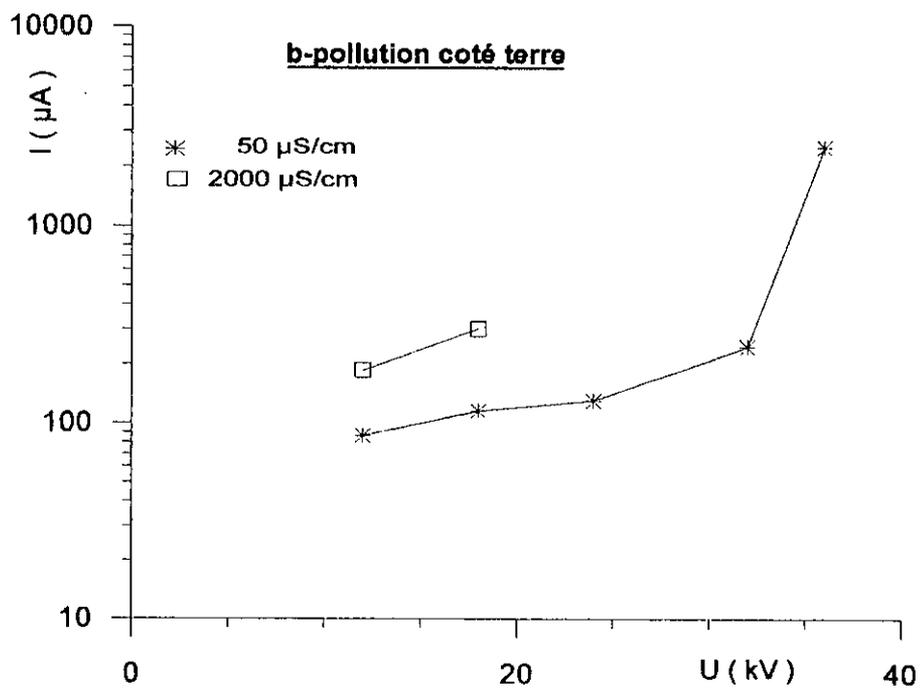
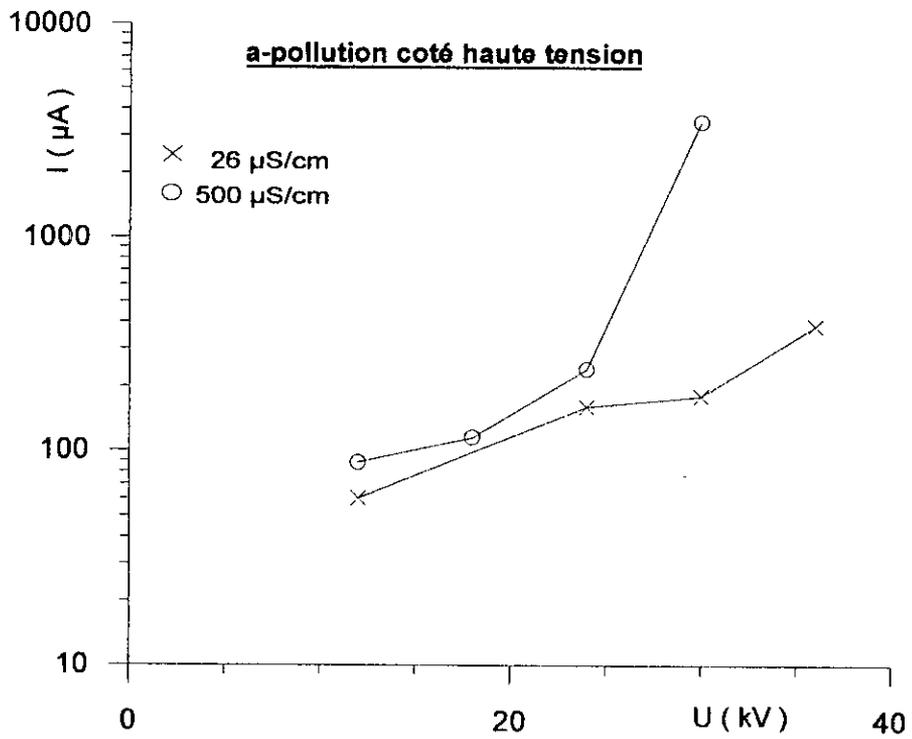
FigIII-20 : Courant de fuite - Tension appliquée
 $y=y'=20\text{ cm}$



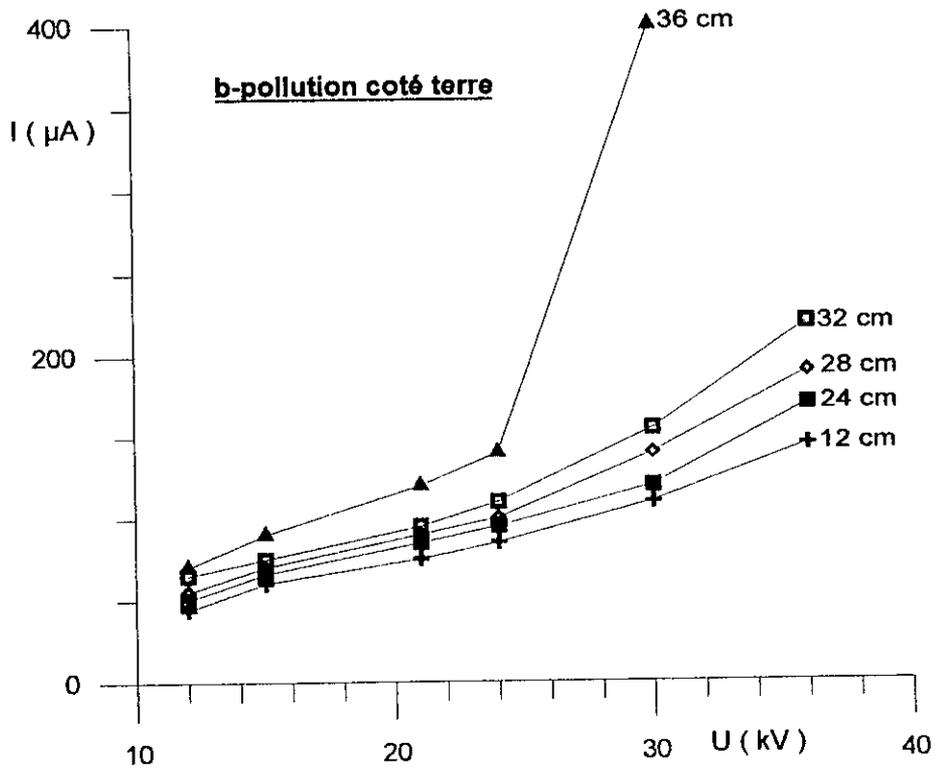
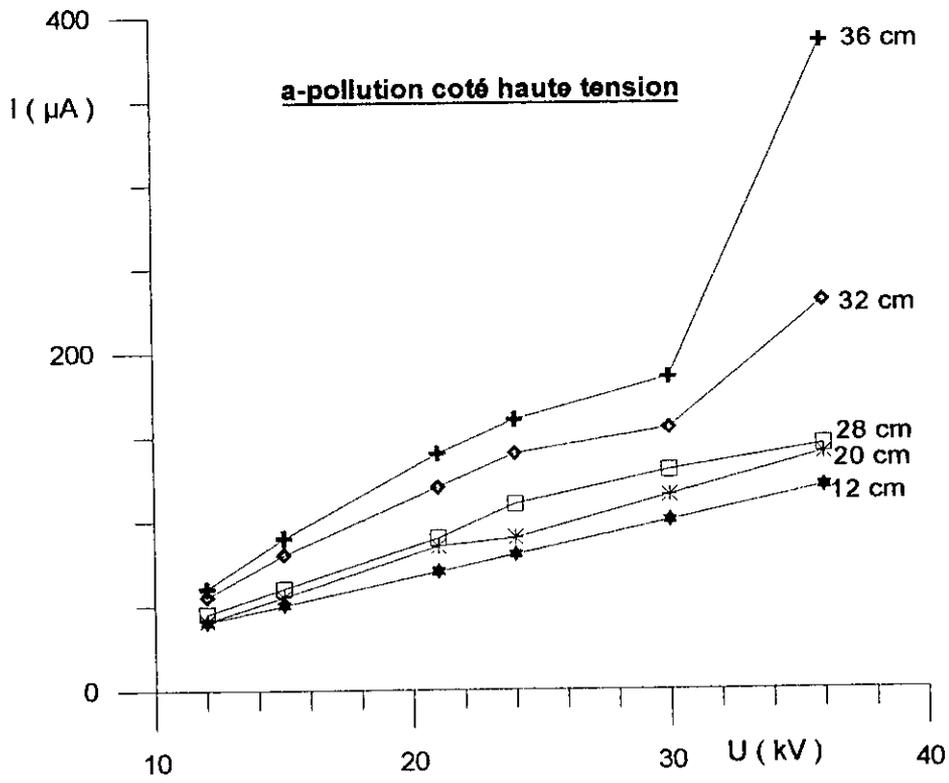
FigIII-21 : Courant de fuite - Tension appliquée
 $y=y'=28\text{ cm}$



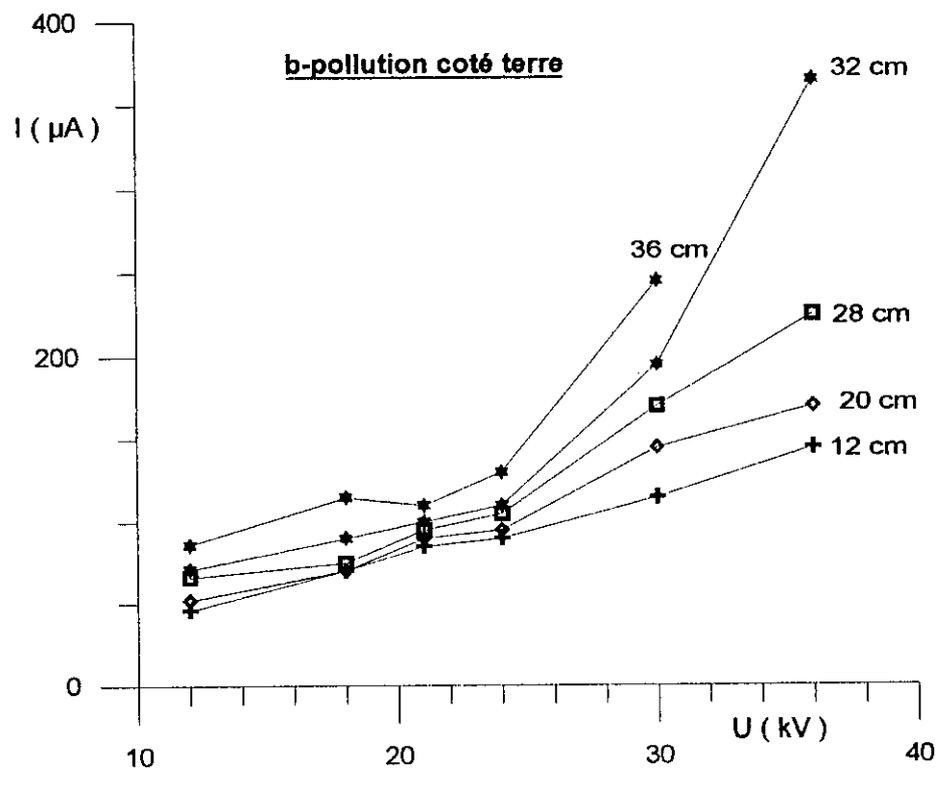
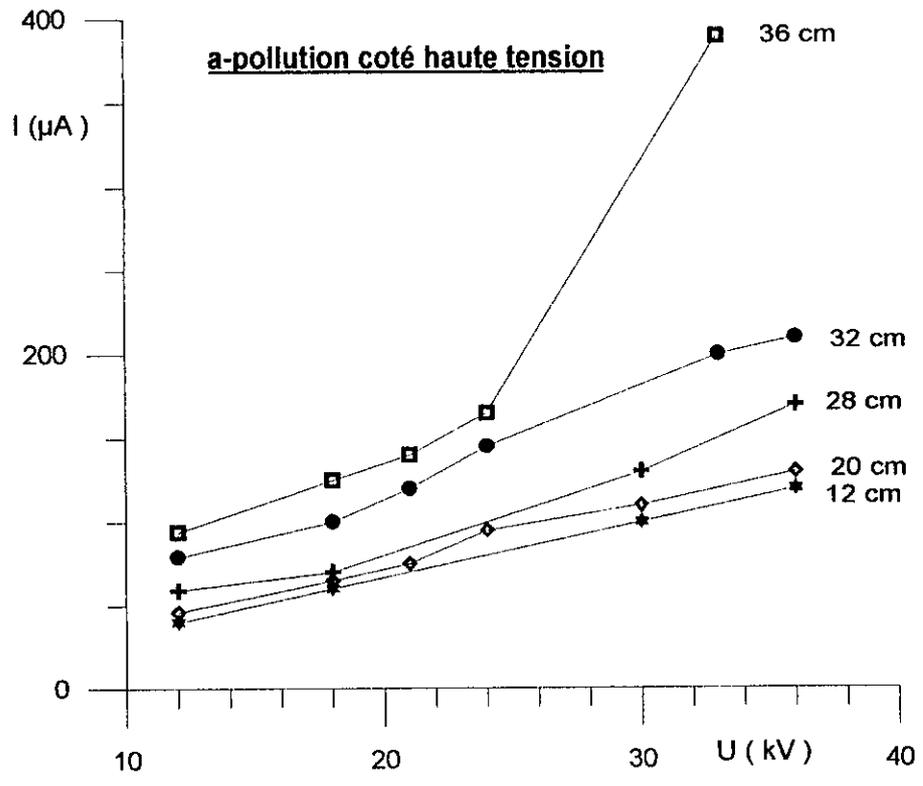
FigIII-22 : Courant de fuite - Tension appliquée
 $y=y'=32\text{ cm}$



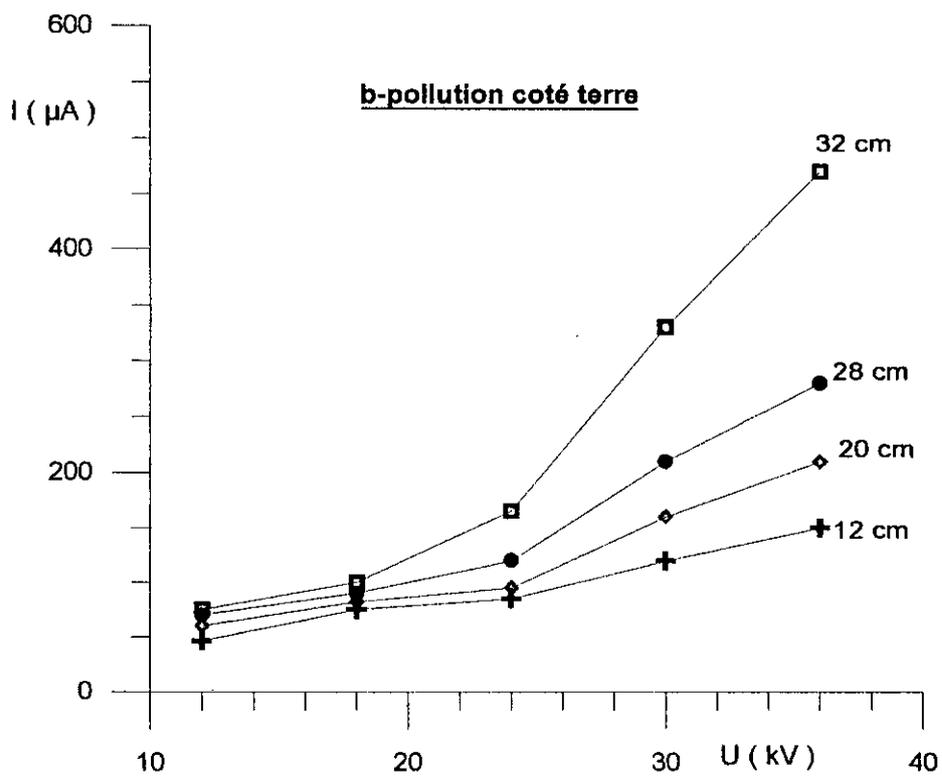
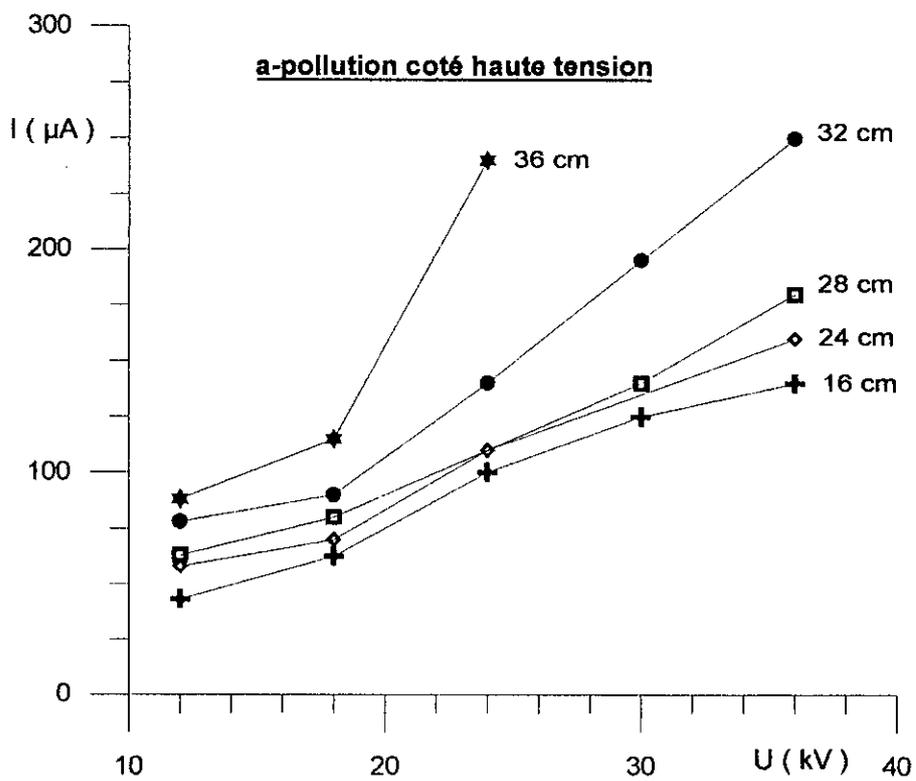
FigIII-23 : Courant de fuite - Tension appliquée
 $y=y'=36$ cm



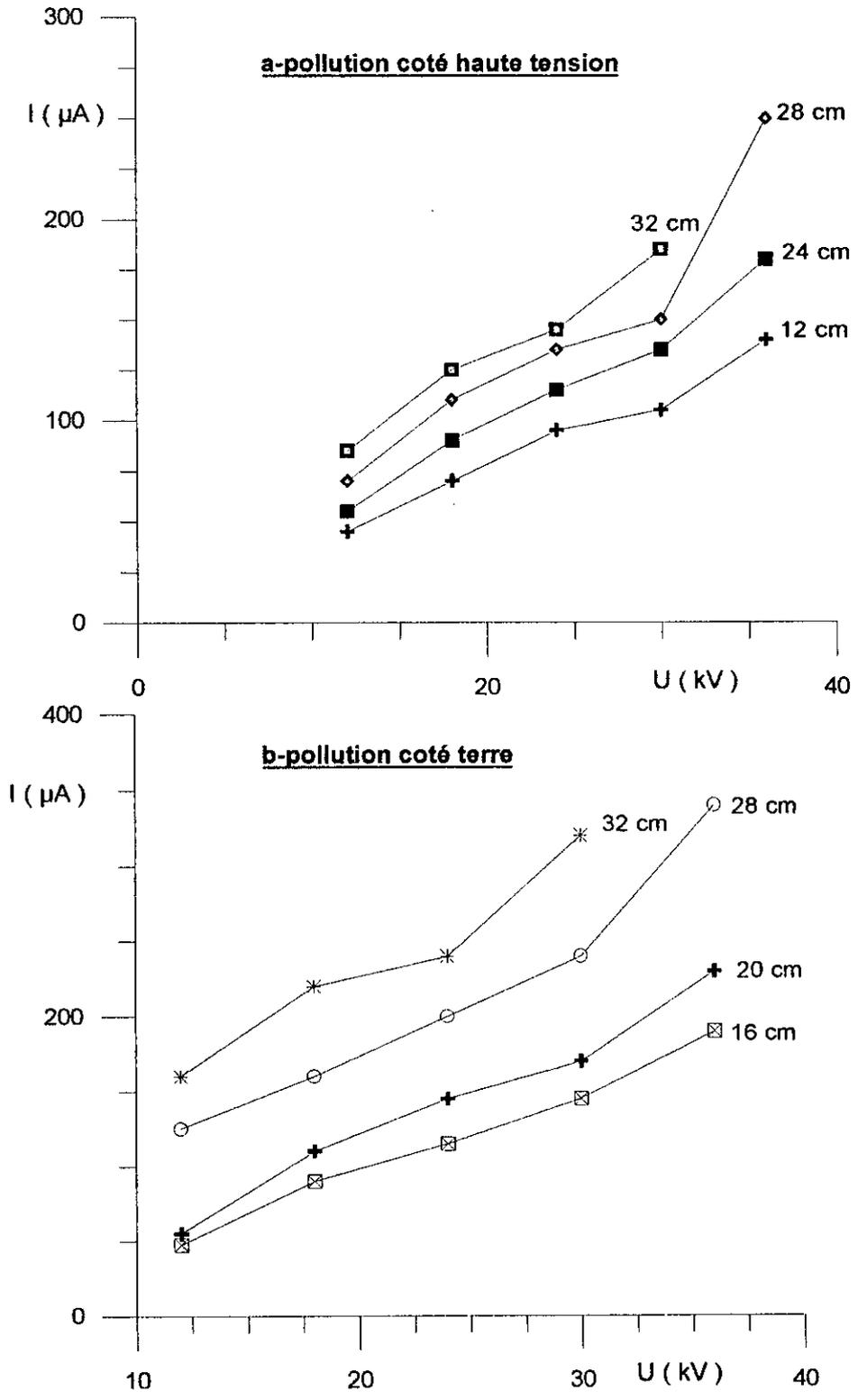
FigIII-24 : Courant de fuite - Tension appliquée
 $\sigma = 26 \mu\text{S/cm}$



FigIII-25 : Courant de fuite - Tension appliquée
 $\sigma = 50 \mu\text{S/cm}$



FigIII-26 : Courant de fuite - Tension appliquée
 $\sigma = 500 \mu S/cm$



FigIII-27 : Courant de fuite - Tension appliquée
 $\sigma = 2000 \mu S/cm$

III-3-2-Tension d'entretien de l'arc électrique

a-Influence de la tension et de la position sur la longueur d'arc

Les figures III-28 et III-29 illustrent la variation de la longueur d'arc en fonction de la tension pour les conductivités 50, 500, et 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Nous observons une augmentation régulière de la longueur d'arc en fonction de la tension appliquée. Ce résultat était prévisible puisque lorsque l'assèchement est important, la tension reportée sur la zone sèche doit être suffisamment élevée pour provoquer le court-circuit de cette dernière. Nous constatons la même allure pour les deux configurations (côté terre et côté haute tension).

Par contre, ce qui nous a surpris, c'est de constater que *la position de la pollution n'a pratiquement pas d'influence sur la longueur d'arcs* (figure III-29), pour les conductivités 50 et 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

En effet, on observe les mêmes niveaux de tension disruptive pour les deux positions de la zone sèche. En fait, nous nous attendions à une tension plus élevée pour l'arc côté terre, le champ étant logiquement moins élevé que lorsque l'arc est du côté haute tension. Ces résultats nous ont d'ailleurs poussés à répéter plusieurs fois les mêmes essais (les mêmes dispositions ont donc été prises que pour la tension de contournement [40], une moyenne a été calculée et présentée sur les courbes.

En fait, lorsque les essais ont été effectués, nous avons constaté qu'une zone sèche établie autour de l'électrode haute tension n'occasionnait aucune perturbation au niveau de l'électrode terre : l'élévation de la tension provoquait d'abord un effet couronne intense, puis, brusquement, la zone sèche était court-circuitée par l'arc.

Par contre lorsque la zone sèche était établie autour de l'électrode terre, l'augmentation de la tension provoquait non seulement un arc côté terre mais également une multitudes d'arcs côté haute tension. La présence d'arcs, des deux côtés, influe sûrement de façon notable sur la répartition des potentiels puisque les arcs situés du côté haute tension diminuent l'impédance de la couche polluée, cette dernière étant partiellement court-circuitée. Partant de ce constat, on peut imaginer que la tension reportée sur la zone sèche est *effectivement* plus élevée côté terre par rapport à celle côté haute tension avec cependant une tension appliquée (donc totale) apparemment identique.

Toutefois, pour la conductivité 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (figure III-29), nous notons tout de même un écart entre les tensions d'arcs côté terre et côté haute tension. La tension est nettement plus faible lorsque une largeur sèche est imposée à l'électrode haute tension. Ceci traduit bien le fait que le régime d'arcs est plus intense lorsque la pollution est du côté terre (c'est à dire que l'arc se développe haute tension), configuration (x', y') qui correspond bien au cas le plus critique observé pour les courants de fuite.

b-Influence de la conductivité sur la génération de l'arc

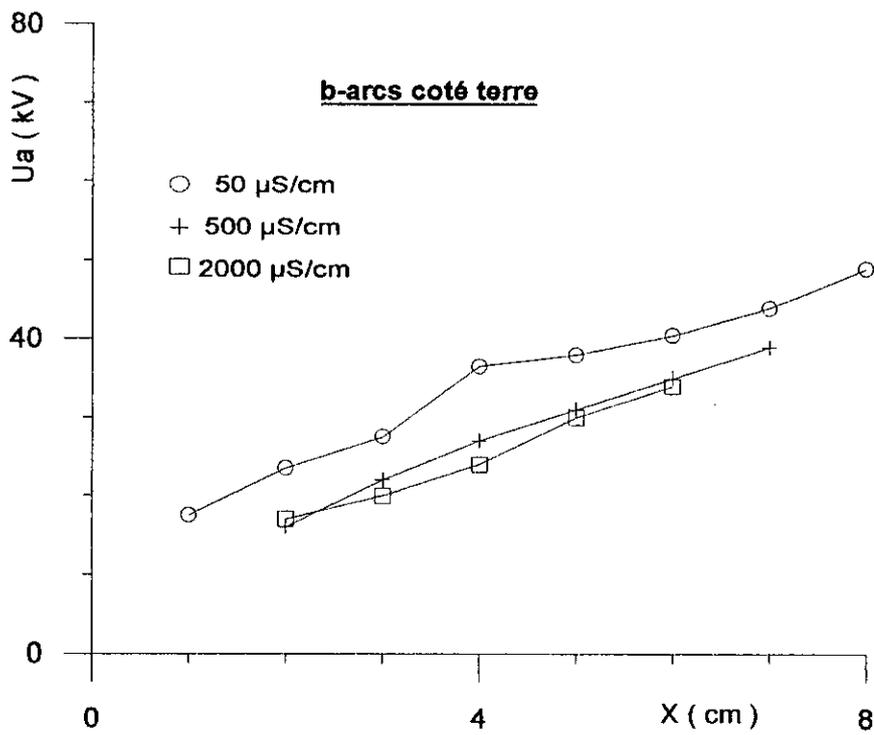
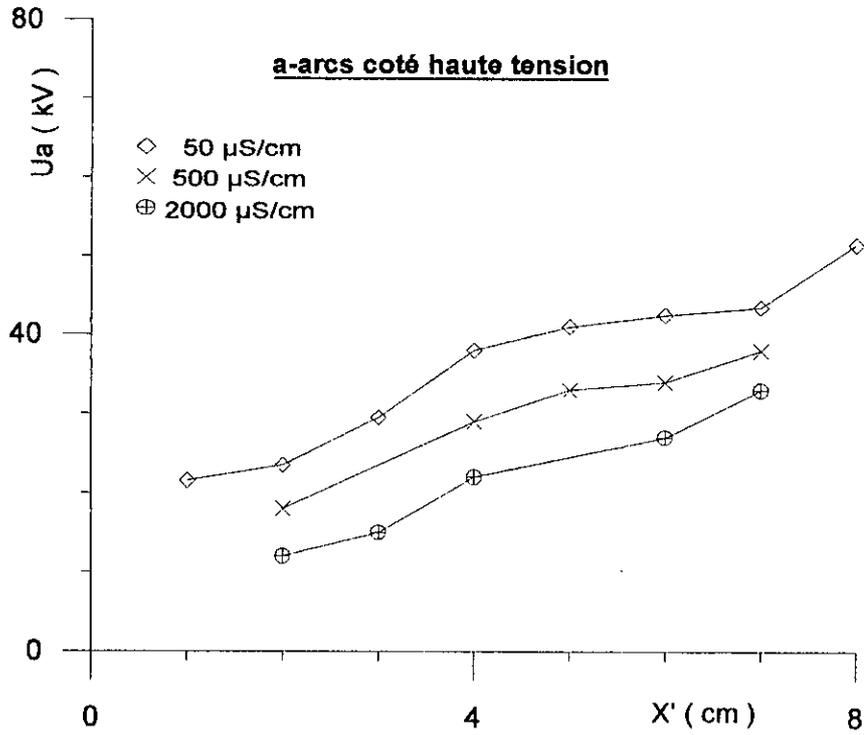
Les figures déjà présentées dans le paragraphe précédant (figures III-28 et III-29) montrent que pour la position de l'arc situé du côté haute tension, on observe une nette diminution de la tension d'entretien de l'arc en fonction de la longueur d'arc lorsque la conductivité augmente.

Ce résultat confirme que la tension reportée sur la zone sèche est d'autant plus élevée que la conductivité augmente (c'est à dire que la résistivité de la couche polluée diminue). En d'autres termes, plus la conductivité augmente et plus la tension totale nécessaire pour l'apparition de l'arc à une longueur donnée diminue.

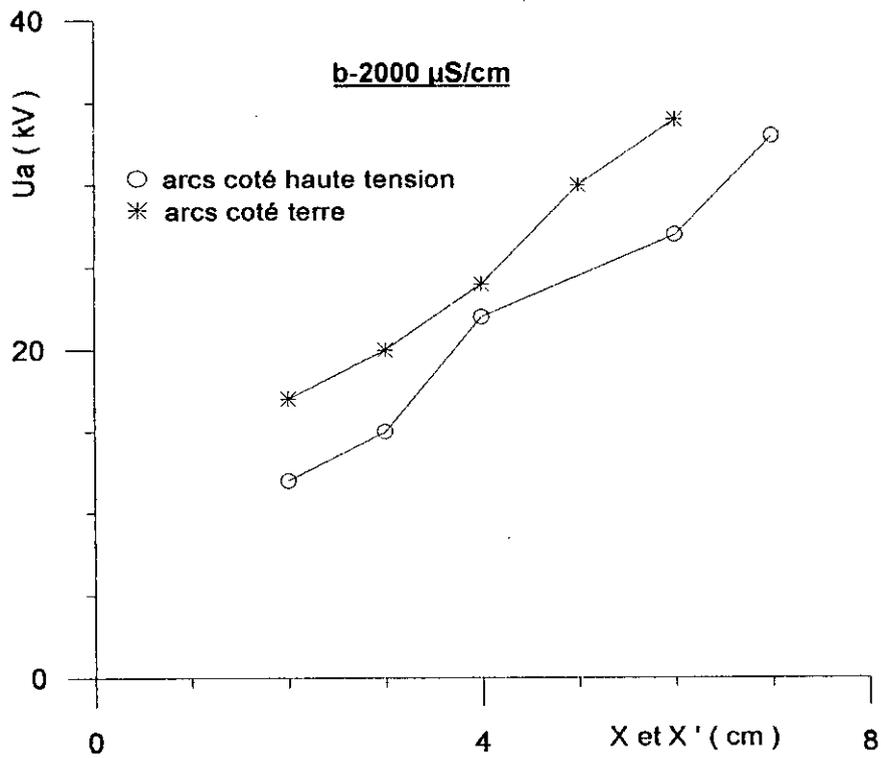
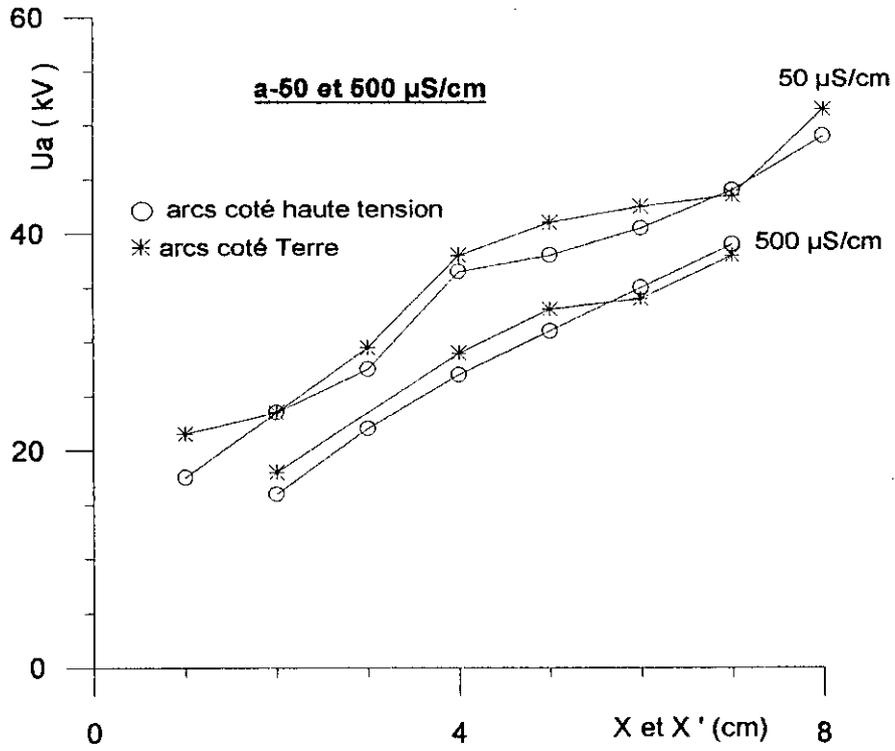
Néanmoins, nous n'observons pas la même évolution régulière de la tension lorsque l'arc se développe du côté terre, les courbes à 500 et 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ étant pratiquement confondues. Ceci pourrait s'expliquer par le caractère très aléatoire de l'arc créé côté terre ainsi que nous l'avons mentionné dans le paragraphe précédent.

Une autre série de trois courbes est présentée sur la figure III-30. Celles-ci montrent l'évolution de la tension d'arcs en fonction de la conductivité pour trois longueurs fixes de l'arc (2, 4 et 6 cm). On observe que l'arc côté terre se développe pour une tension plus élevée à partir de conductivités élevées (entre 500 et 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

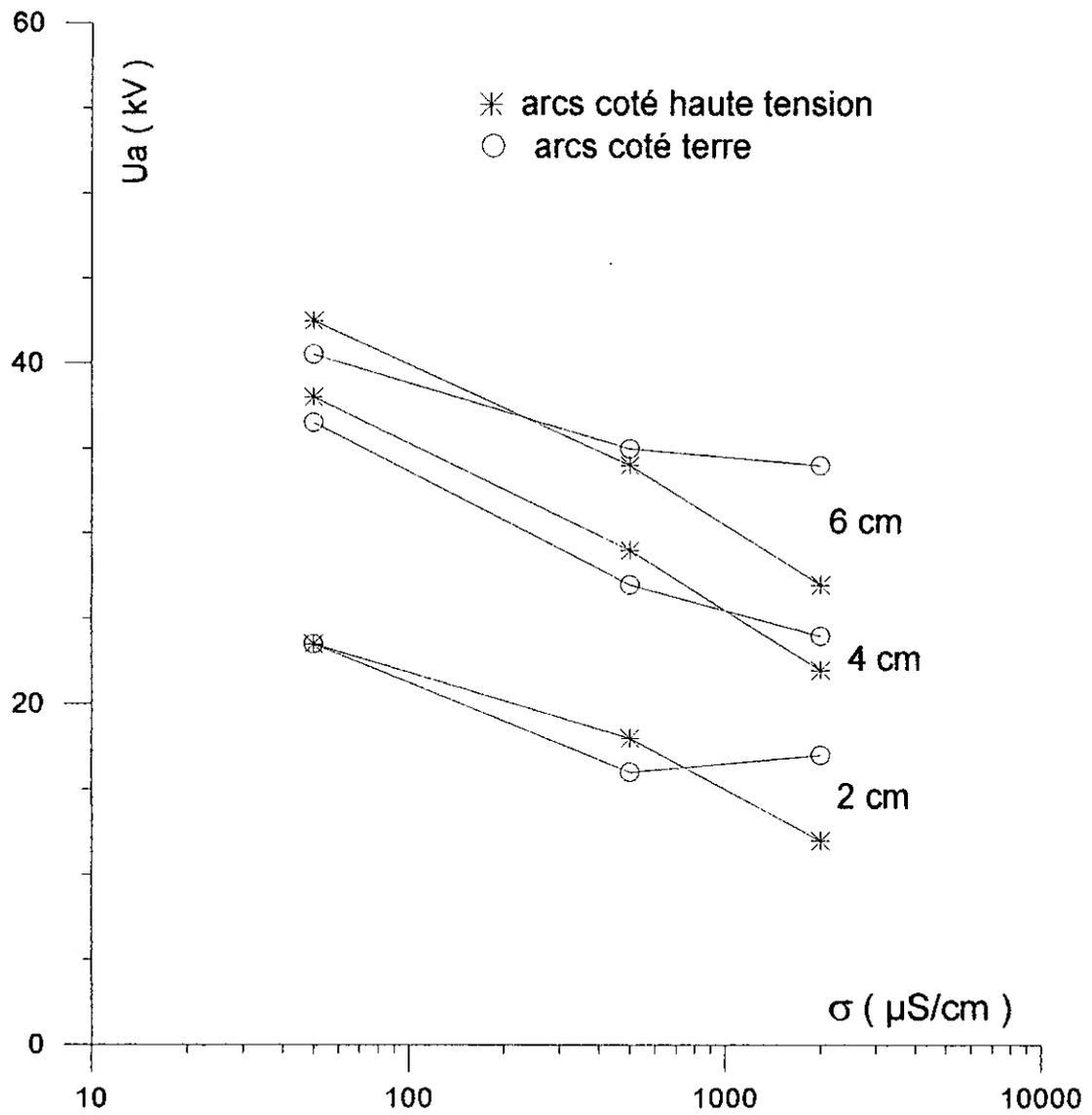
Ceci montre que les arcs indésirables créés côté haute tension lorsqu'une zone sèche est établie côté terre ne contribuent plus à diminuer l'impédance de la pollution, celle-ci étant *déjà* très faible lorsque la conductivité est élevée. Nous pensons que c'est pour cette raison que nous n'observons pas les mêmes phénomènes que pour les conductivités plus faibles.



FigIII-28 : Tension d'entretien de l'arc - Longueur d'arc



FigIII-29 : Tension d'entretien de l'arc - Longueur d'arc



FigIII-30 : Tension d'entretien d'arc - conductivité

III-3-3-Tension de contournement

a-Influence de la largeur de pollution

Deux conductivités extrêmes ont été utilisées pour les essais de contournement. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure III-31.

L'analyse de ces courbes montrent une nette diminution de la tension de contournement avec la largeur de la pollution, résultat évidemment prévisible puisque la pollution, augmentant fortement la conductivité superficielle des isolateurs, diminue alors leur tenue diélectrique. Nous observons toutefois une légère augmentation à partir de la largeur de pollution la plus élevée pour la conductivité 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à savoir $y=y'=36$ cm, soit 90% de la longueur totale.

Ce phénomène (courbes présentant un minimum), a été observé par de nombreux auteurs [25, 74] à des largeurs données de la couche polluée lesquelles dépendant généralement des dispositifs expérimentaux utilisés et des contraintes appliquées. Nous pensons que ce minimum correspond à la position la plus favorable à la formation rapide de l'arc (en effet, il ne faut pas perdre de vue que l'établissement de zones sèches favorise la formation de l'arc [62]) et donc conduit au contournement le plus probable.

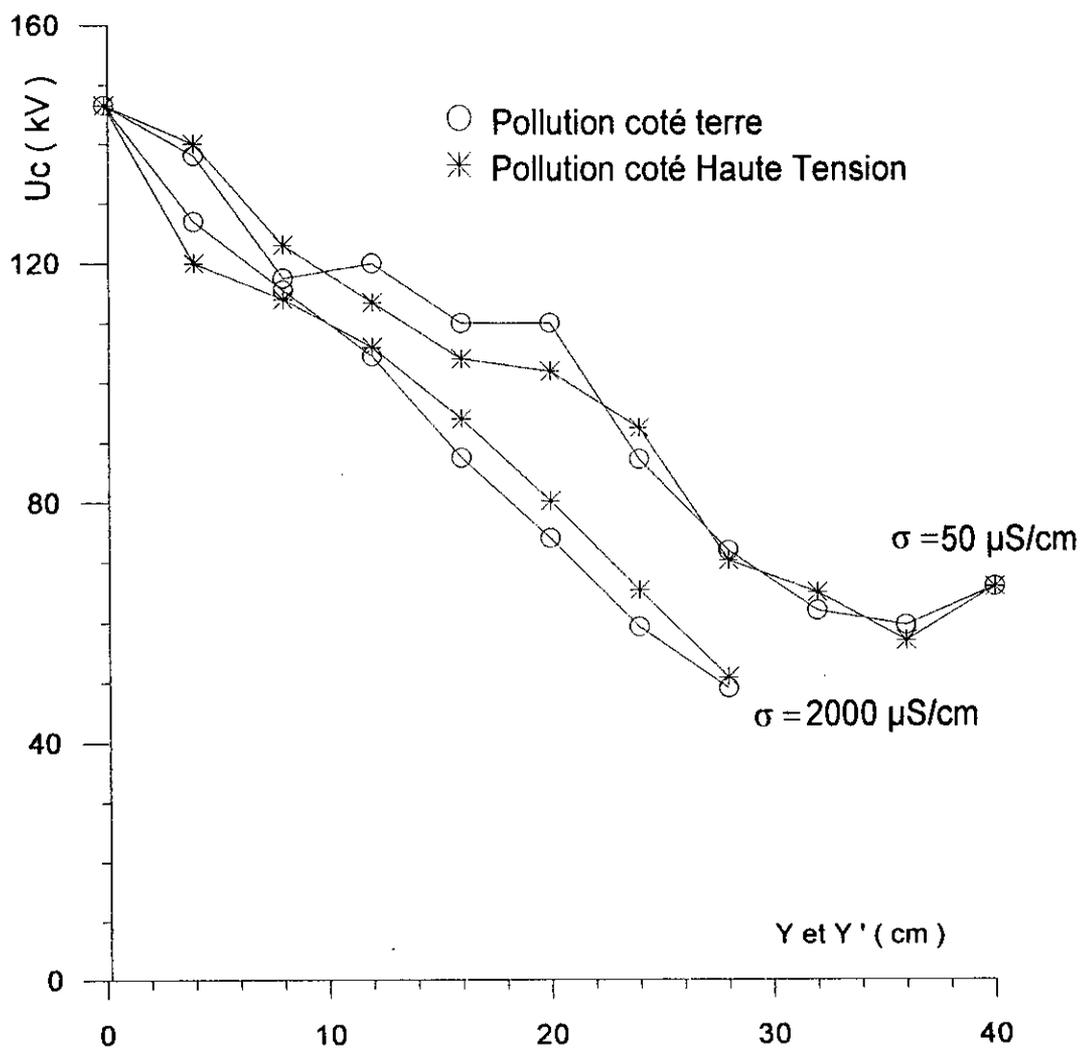
Ce phénomène a été observé pour les deux positions de la couche polluée et ce même sur le plan quantitatif. D'ailleurs, même pour les autres largeurs de pollution, nous n'observons pratiquement pas d'influence de la position, résultat auquel on ne s'attendait pas d'autant plus que nous avons observé un comportement différent de la plaque au fur et à mesure que nous élevions la tension pour les deux positions.

En effet pour la pollution côté terre (donc zone sèche côté haute tension) et pour la conductivité 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$, nous avons tout d'abord observé le court-circuit de la zone sèche, puis le contournement *sans création importante d'arc côté terre*. Par contre pour la pollution côté haute tension (donc zone sèche côté terre), il a été observé le court-circuit de la zone sèche *avec* création d'arcs côté haute tension puis ensuite le contournement.

Ce phénomène, analogue à celui observé lors des essais d'arcs, s'est également reproduit pour la conductivité 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec tout de même une création beaucoup plus importante d'arcs côté terre lorsque la zone sèche est du côté haute tension.

Cependant, il faut noter que pour les faibles largeurs de pollution, il n'y a pas de création d'arcs au niveau de l'électrode autour de laquelle une largeur sèche a été établie, le contournement se produit "directement" sans étape intermédiaire (court-circuit de la zone sèche etc.).

Ceci s'explique par l'existence de longueurs critiques d'arcs, à partir desquelles le contournement devient inévitable (voir synthèse bibliographique (chapitre I) et paragraphe III-3-c), et le système tendrait plutôt vers un système cercle-plan dans l'air.



FigIII-31 :Tension de contournement - Largeur de la pollution

b-Influence de la conductivité

Au regard des courbes déjà présentées dans le paragraphe III-3-a (figure III-31), on peut confirmer l'influence certaine de la conductivité sur la tension de contournement, résultat semblable à celui de la tension d'entretien d'arc.

Le phénomène d'arcs est d'ailleurs analogue à celui du contournement puisqu'il concerne un "contournement" partiel de la plaque : il n'est donc pas étonnant que l'on obtienne le même comportement de la plaque que pour les essais d'arcs, l'augmentation de la conductivité se traduisant nécessairement par une diminution de la rigidité diélectrique.

c-Détermination de la longueur critique d'arc

Plusieurs auteurs [23] ont observé qu'il existait une longueur critique d'arc, à partir de laquelle le contournement devient inévitable. En d'autres termes, il a été établi qu'il existe une longueur d'arc X_c limite à partir de laquelle il n'est pas possible d'observer un arc stable.

Dans le cadre de notre travail nous avons désiré connaître la longueur critique correspondant à notre modèle. C'est pourquoi nous avons, lors des essais d'arcs et de contournements, noté à chaque fois la longueur d'arc à partir de laquelle le contournement est "direct" c'est à dire qu'il n'y a pas d'arcs précédant le contournement.

Cette longueur a été évaluée à 12 cm, soit environ le tiers de la longueur totale de la plaque. Ce résultat, *indépendant de la position et de la conductivité* a été confirmé à plusieurs reprises.

En comparant ce résultat à celui d'autres chercheurs, nous constatons que :

- la valeur que nous avons trouvée est très différente de celle établie par les divers auteurs [23, 33].

Ceci peut s'expliquer par le choix du modèle et du mode d'application de la pollution sur ce dernier. En effet, il est courant qu'on suppose la répartition de la pollution linéaire ce qui donne une longueur critique théorique de $2L/3$ [33] (voir chapitre I), résultat assez éloigné du nôtre.

Dans le cas de notre modèle on voit bien que la répartition de la pollution est loin d'être linéaire étant donné la distribution circulaire de la pollution. De plus l'établissement de zones sèches, exprimant la non-uniformité de la pollution favorise probablement davantage la génération de l'arc électrique et change donc le mécanisme de contournement.

- La valeur critique de la longueur d'arc ne dépend pas de la conductivité, résultat en conformité avec les travaux d'autres chercheurs [33].
- Quand à l'influence apparemment nulle de la position de la couche (la même largeur critique a pu être observée), on ne peut que supposer

que cela est dû au choix du modèle, c'est à dire qu'un autre modèle, ou simplement l'isolateur réel peut tout à fait se comporter différemment selon la position de la couche polluante.

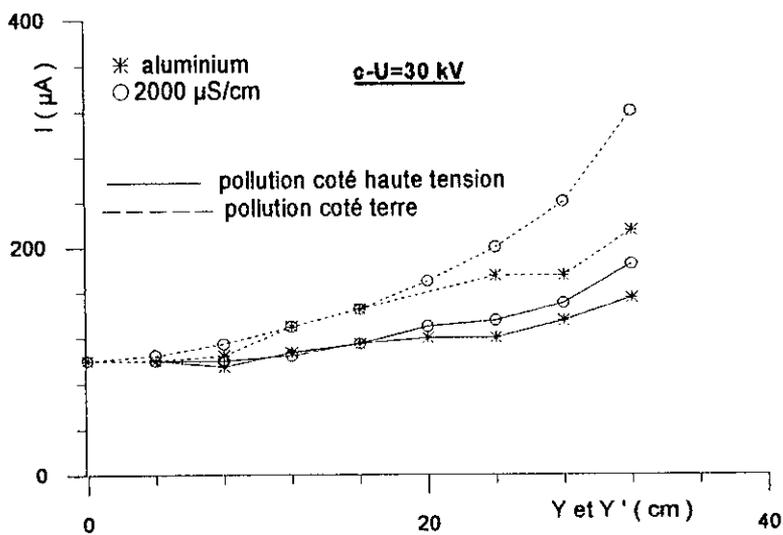
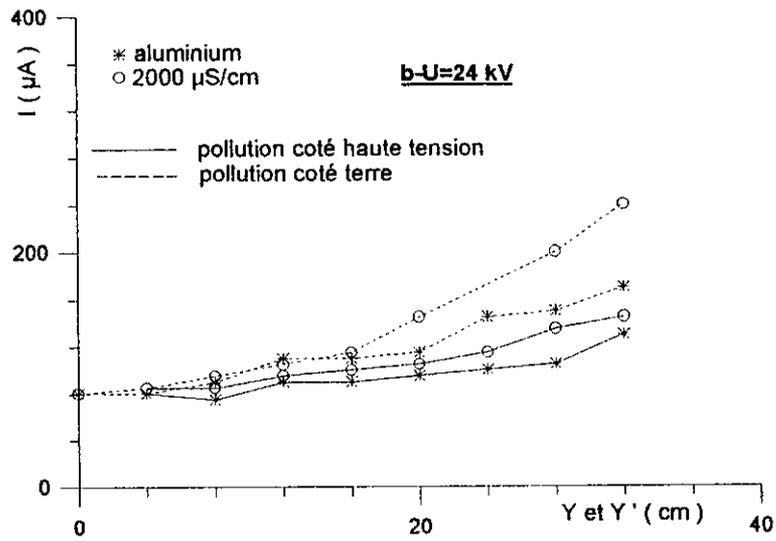
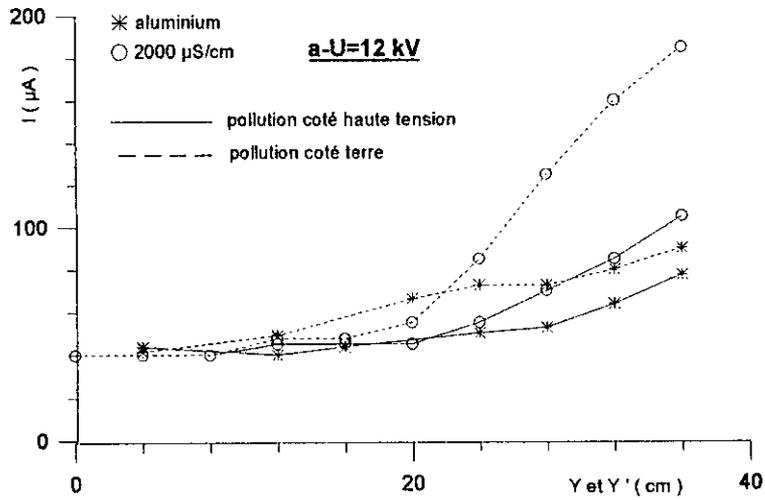
III-3-4-Essais avec une couche conductrice (aluminium)

Dans le but d'observer le comportement du modèle face à une pollution de conductivité extrême, nous avons procédé au remplacement de la couche de pollution par du papier aluminium, dont la conductivité peut être considérée comme infinie par rapport à l'eau salée utilisée.

Nous avons alors procédé à des essais de courant de fuite pour trois niveaux de tension différents (12, 24 et 30 kV), pour chaque largeur et pour les deux positions de la couche conductrice. Nous les avons ensuite comparés à ceux obtenus pour la conductivité 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (figure III-32).

Les résultats, surprenants au premier abord, montrent que le régime à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ est *plus critique* que celui où on utilise l'aluminium. Ceci montre que :

- à partir d'une certaine valeur de la conductivité, l'impédance de la pollution devient tellement faible par rapport à celle de la couche propre que sa "valeur" n'a plus d'importance, la zone sèche s'imposant largement.
- les phénomènes de conduction de la zone sèche (phénomènes liés à la valeur de la tension reportée) sont donc théoriquement les mêmes pour 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et l'infini (c'est à dire qu'on peut considérer la conductivité 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ comme infinie au même titre que celle de l'aluminium).
- pratiquement, nous pensons que l'utilisation d'eau comme agent polluant provoque un phénomène qu'on ne retrouve pas lorsqu'on utilise de l'aluminium. Celui-ci concerne l'évaporation ou la diffusion du liquide, créant une humidité supplémentaire à proximité de la zone sèche et donc *renforçant* la conductivité de cette dernière, ce qui expliquerait l'allure des courbes.



FigIII-32 : Essais sur l'aluminium : Courant-Largeur de la pollution

III-4-Conclusions

a-Courant de fuite

Nous observons des phénomènes analogues pour toutes les conductivités à savoir :

1. augmentation du courant de fuite en fonction de la largeur de la couche de pollution
2. cette augmentation dépend de la position de la couche polluée (côté terre ou côté haute tension), du niveau de tension appliqué ainsi que de la conductivité de la couche de pollution.
3. l'augmentation devient très importante en régime d'ionisation de l'air (effet couronne) c'est à dire lorsque la tension reportée sur la zone sèche est élevée.
4. le courant devient critique (augmentation très brutale) lorsque la couche est entièrement polluée ou lorsque le régime d'arc est atteint.

b-Tension d'entretien de l'arc

Nous noterons que :

1. la longueur d'arc augmente avec la tension appliquée.
2. il est difficile d'évaluer valablement le développement de l'arc lorsque celui-ci a lieu côté terre (électrode rectangulaire) à cause d'arcs multiples se développant également côté haute tension (électrode circulaire). Le phénomène devient alors beaucoup plus aléatoire, les arcs "parasites" bouleversant la répartition des potentiels, ainsi que nous l'avons expliqué dans les paragraphes précédents.
3. Pour une même largeur de la zone sèche, la tension d'entretien d'arc diminue sensiblement lorsque la conductivité augmente.
4. pour la conductivité la plus élevée (2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), nous observons une tension d'arc plus réduite lorsque la pollution est établie côté terre. On peut alors penser que dans le cas de conductivités très élevées, les arcs "parasites" créés côté haute tension ne contribuent plus à réduire l'impédance de la pollution, celle-ci étant déjà très négligeable devant celle de la couche propre.

c-Tension de contournement

Les résultats, obtenus pour deux conductivités extrêmes (50 et 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) nous ont permis d'observer que :

1. la position de la pollution n'a apparemment pas d'influence sur la tension de contournement pour les conductivités utilisées, bien que l'on observe un très léger écart entre les caractéristiques à partir d'une largeur de couche polluante de 20 cm (figure III-31). Peut être que si nous avions pu aller au delà de 28 cm, aurions nous pu déceler une différence, mais l'alimentation n'aurait pas été capable de supporter une telle puissance.
2. les mécanismes qui conduisent au contournement ne sont probablement pas les mêmes selon la position de la pollution, à la lumière des observations faites lors des essais.
3. l'augmentation de la conductivité réduit la rigidité du modèle, surtout pour les grandes largeurs de pollution.
4. il existe une longueur d'arc critique à partir de laquelle on ne peut plus maintenir un arc stable. Cette longueur critique est indépendante de la conductivité, résultat déjà établi par nombre d'auteurs [23,33].

d-Essais avec une couche conductrice (aluminium)

Ces essais ont permis d'établir que la conductivité n'est pas la seule responsable du phénomène de conduction de la zone sèche. La nature même de la pollution, (solide ou liquide), jouerait également un rôle non négligeable puisque la nature liquide de la pollution entraîne une perturbation sur les propriétés de l'interface air-verre en accentuant sa teneur en eau, et donc sa conductivité.

Chapitre IV

Modèle empirique et discussion

IV-1- Introduction

***IV-2-Détermination de l'impédance apparente
vue des électrodes***

***IV-3- Détermination de la tension reportée
sur la zone sèche à partir du modèle théorique***

***IV-4-Détermination du courant de fuite
théorique à partir de l'impédance totale***

***IV-5-Tension d'arc et contournement :
Discussion***

IV-7- Conclusion

IV-1 - Introduction

Ce chapitre a pour but de mieux comprendre et situer l'importance du rapport des impédances mises en jeu dans le processus de conduction du modèle d'isolateur partiellement ou entièrement pollué.

On peut en effet se demander quel est le rapport des impédances couche polluée - couche propre en fonction de leur largeur, et à partir de quelle valeur de la conductivité on peut négliger ce rapport et, surtout, quels comportements cela implique pour le modèle.

Afin de répondre à cette question, il nous a paru intéressant d'évaluer, d'une manière tout à fait empirique, les impédances apparentes vues des électrodes en introduisant d'une part les valeurs expérimentales et en adoptant d'autre part des hypothèses simplificatrices.

L'introduction de ces hypothèses, inspirées des résultats expérimentaux, ont permis l'élaboration d'un modèle empirique simple. Ce modèle nous a permis une approche quantitative de la tension "reportée" sur la zone sèche en l'évaluant par rapport à la tension totale appliquée.

Les résultats obtenus nous ont permis de constater que le modèle empirique donne de très bons résultats en régime linéaire. Au delà, le modèle ne convient plus du fait de la diminution probable de l'impédance apparente de la zone sèche lorsque le régime devient critique.

Une dernière partie traitera des similitudes existant entre nos résultats expérimentaux et certaines formules empiriques établies par d'autres auteurs. Ces comparaisons concerneront la tension d'entretien de l'arc et celle du contournement.

Nous établirons qu'en ce qui concerne le contournement, le modèle utilisé reflète correctement le comportement de l'isolateur réel.

IV-2-Détermination de l'impédance apparente vue des électrodes

IV-2-1-Hypothèses de travail

Plusieurs hypothèses ont été adoptées pour la détermination des impédances couche propre et couche polluée. Certaines découlent des résultats obtenus et d'autres permettent uniquement de simplifier le modèle empirique.

Nous supposerons donc que :

- * l'impédance équivalente du modèle, lorsque celui-ci est propre, est considérée comme une résistance pure. Nous justifions ce choix par les

observations faites lors des essais, montrant un caractère résistif important de la plaque à $y=y'=0$ (chapitre III). Il faut d'ailleurs souligner que nombre d'auteurs, estiment la résistance d'isolement de surface relativement faible [72] par rapport à la résistance d'isolement transversale. De plus, la résistance d'isolement de surface dépendant étroitement des conditions physiques de l'air ambiant, c'est à dire de la température et de l'humidité.

N.B. Nous parlerons d'impédance *apparente* car celle-ci est obtenue par simple rapport entre la tension appliquée et le courant de fuite correspondant. Ce rapport exprime donc l'impédance équivalente de tous le dispositif (y compris les capacités parasites etc.), lorsque la plaque est propre.

- * la valeur de l'impédance de la surface propre ne dépend pas de la position de la couche de pollution. Cette hypothèse découle directement des résultats montrant que la position n'a pas d'influence sur le courant de fuite lorsque la tension est faible (12 kV). Cette constatation a été faite même pour une conductivité suffisamment élevée (500 $\mu\text{S}/\text{cm}$), pour considérer que l'impédance de la zone sèche prédomine. Cette hypothèse reste cependant discutable pour les régimes critiques de fonctionnement (régimes constatés surtout pour la conductivité 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pollution côté terre) et le modèle devrait montrer ses limites lorsque la plaque perd son caractère ohmique.
- * nous considérerons la distribution de la pollution parfaitement circulaire même à proximité de l'électrode rectangulaire, ceci afin de faciliter les calculs.

IV-2-2-Détermination de l'impédance de la surface propre

Celle-ci est déterminée à partir des essais effectués à 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 12 kV, pollution côté haute tension et pollution côté terre.

Nous avons choisi une conductivité assez élevée (500 $\mu\text{S}/\text{cm}$), pour considérer que l'impédance de la couche polluante est négligeable devant celle de la zone sèche : l'impédance totale apparente du modèle ne peut donc être que celle de la surface propre (nous avons préféré éviter la conductivité 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ parce que celle-ci comporte un trop grand écart entre les deux configurations (côté terre et côté haute tension), même pour la tension la plus faible).

D'autre part, nous avons choisi le niveau le plus faible de tension (12 kV), afin d'éviter le régime non linéaire provoqué par les tensions élevées.

Finalement, le choix de la tension 12 kV, 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a été adopté de manière à :

- éviter le régime non linéaire lorsque la tension est élevée (choix $U=12$ kV).
- négliger le rapport entre impédances couche polluée et propre (choix $\sigma = 500$ μ S/cm).

L'impédance expérimentale $Z_0(y)$ moyenne est alors déterminée à partir de la tension et du courant de fuite correspondant pour les deux configurations (côté terre et côté haute tension). La fonction choisie, la plus proche des résultats expérimentaux est donnée par :

$$Z_{oe}(y) = Z_{oe}(y') = [Z_o(y=0)] \cdot [(L-y)/L]^{0.42} \quad (1)$$

Avec :

Z_{oe} = impédance empirique de la zone sèche en fonction de la largeur de la couche polluée.

$Z_o(y=0)$ =impédance totale mesurée de la plaque propre lorsqu'il n'y a pas de pollution. Celle-ci a été évaluée à : $4,24 \cdot 10^8 \Omega$ (voir partie expérimentale).

L = distance inter-électrodes=40 cm

y (ou y') = largeur de la pollution en cm (côté terre ou côté haute tension).

Nous avons adopté cette fonction empirique de manière à retrouver les deux valeurs extrêmes de pollution à savoir :

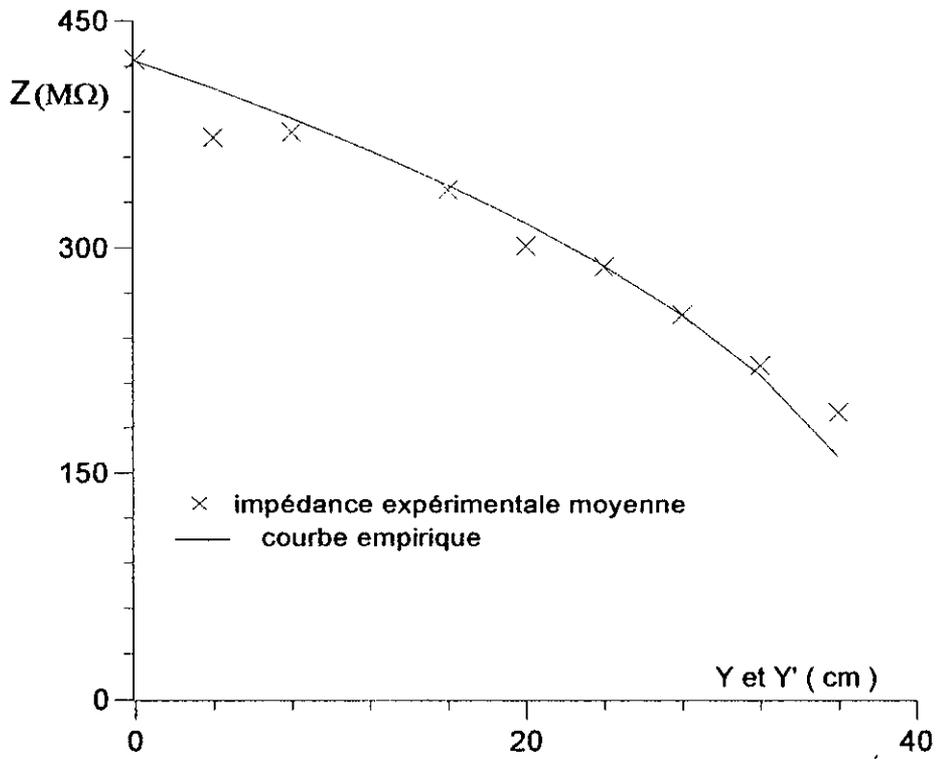
$$y=y'=0 \Rightarrow Z_{oe}(0) = 4,24 \cdot 10^8 \Omega \quad \text{et} \quad y=y'=L \Rightarrow Z_{oe}(L) = 0.$$

A la figure IV-1, nous présentons les variations de Z_o (expérimentale) et Z_{oe} (empirique), en fonction de y et y' . Celles-ci sont présentées avec la courbe d'erreur correspondante ε (%) en fonction de y et y' également (figure IV-2), celle-ci étant donnée par :

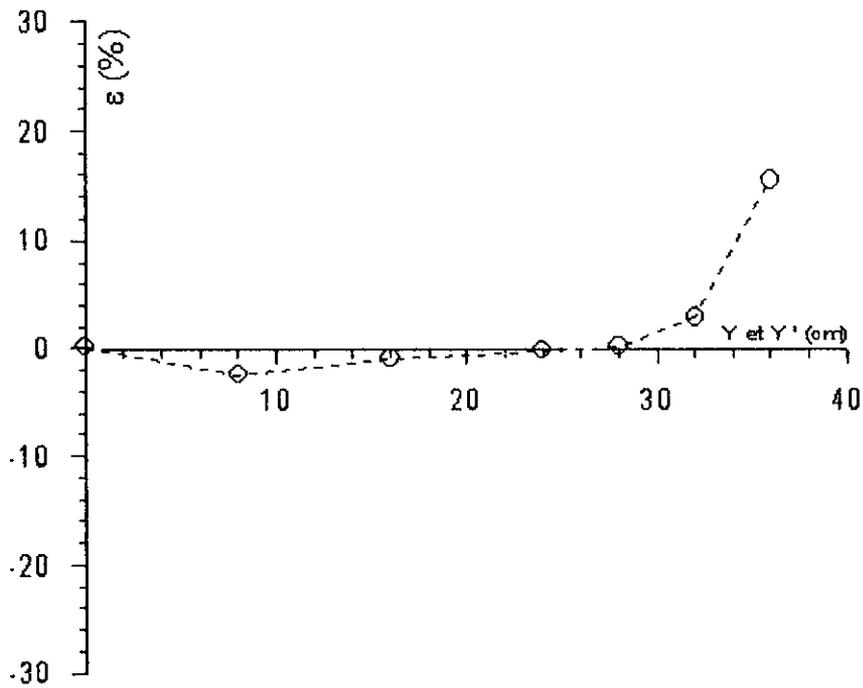
$$\varepsilon(\%) = 100 \cdot (Z_{oe} - Z_o) / Z_o$$

La courbe ε (y et y') montre que l'erreur sur l'impédance est très faible (inférieur à 4%) pour une largeur de pollution ne dépassant pas 80% de la longueur totale. A partir de largeurs plus élevées, l'erreur atteint son maximum pour $0,9L$ à savoir 16 %, ce qui reste encore acceptable.

Pour toutes les conductivités on adoptera la même répartition de l'impédance de la zone sèche, celle-ci étant illustrée par la formule(1).



FigIV-1 : Impédance empirique et expérimentale de la zone sèche en fonction de la largeur de la couche polluante



FigIV-2 : Erreur relative sur la zone sèche en fonction de la largeur de la couche polluante

IV-2-3-détermination de l'impédance de la couche polluée

La détermination de l'impédance de la pollution s'inspire d'un modèle déjà utilisé par d'autres auteurs [71]. En effet, considérant une distribution circulaire de la couche polluante, la variation élémentaire dR de la résistance en fonction de la largeur dy (ou dy') de pollution est donnée par l'expression :

$$dR = [1/(e y \sigma \alpha)] \cdot dy \quad (2)$$

avec : dy (ou dy')= variation élémentaire de la largeur de la couche polluante (figure IV-2)

e = épaisseur moyenne de parcours du courant

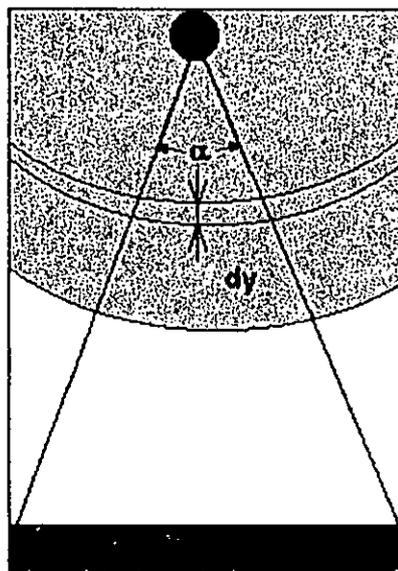
σ = conductivité de la couche de pollution

α = angle utile de parcours du courant (voir figure IV-3 et 4)

Nous avons donc appliqué cette équation dans les deux cas de figures, à savoir, pollution côté haute tension et pollution côté terre.

• pollution côté haute tension

Dans ce cas, l'intégration de l'équation (2) se fait entre $a+y$ et a (voir figure IV-3), a étant le rayon de l'électrode circulaire (2.5 cm).



FigIV-3 : Pollution côté haute tension

On obtient alors :

$$R(y) = (1/e \sigma \alpha) \cdot \log((y+a)/a) \\ = (K/\sigma) \cdot \log((y+a)/a) \quad (3)$$

$K=1/e\alpha$ étant une constante déterminée par les essais expérimentaux (cette dernière est délicate à déterminer théoriquement étant donné le parcours compliqué du courant).

On prendra alors une valeur moyenne des deux impédances extrêmes déterminées lors des essais à $26 \mu\text{S/cm}$ (voir partie expérimentale) à savoir :

$$\sigma = 26 \mu\text{S/cm} \Rightarrow R_{26\text{moy}}(y=L) = 9 \cdot 10^7 \Omega$$

Pour une conductivité quelconque σ on aura alors :

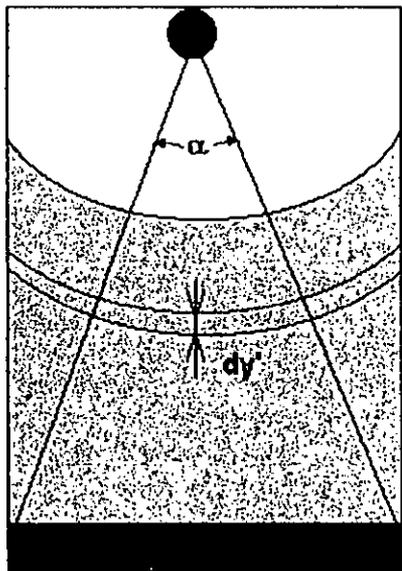
$$R_{\sigma \text{ moy}}(y=L) = R_{26 \text{ moy}}(y=L) \cdot (26/\sigma) = 2,34 \cdot 10^9 / \sigma \quad [\Omega] \\ \sigma \quad [\mu\text{S/cm}]$$

A partir de ces résultats, on obtient :

$$K = 2,34 \cdot 10^9 / [\log[(a+L)/a]] = 8,26 \cdot 10^8 \quad [\Omega \cdot (\mu\text{S/cm})]$$

• pollution côté terre

Pour la pollution côté terre, on intègre l'expression (2) dans l'intervalle complémentaire, à savoir entre $a+L$ et $a+L-y'$ (voir figure IV-4).



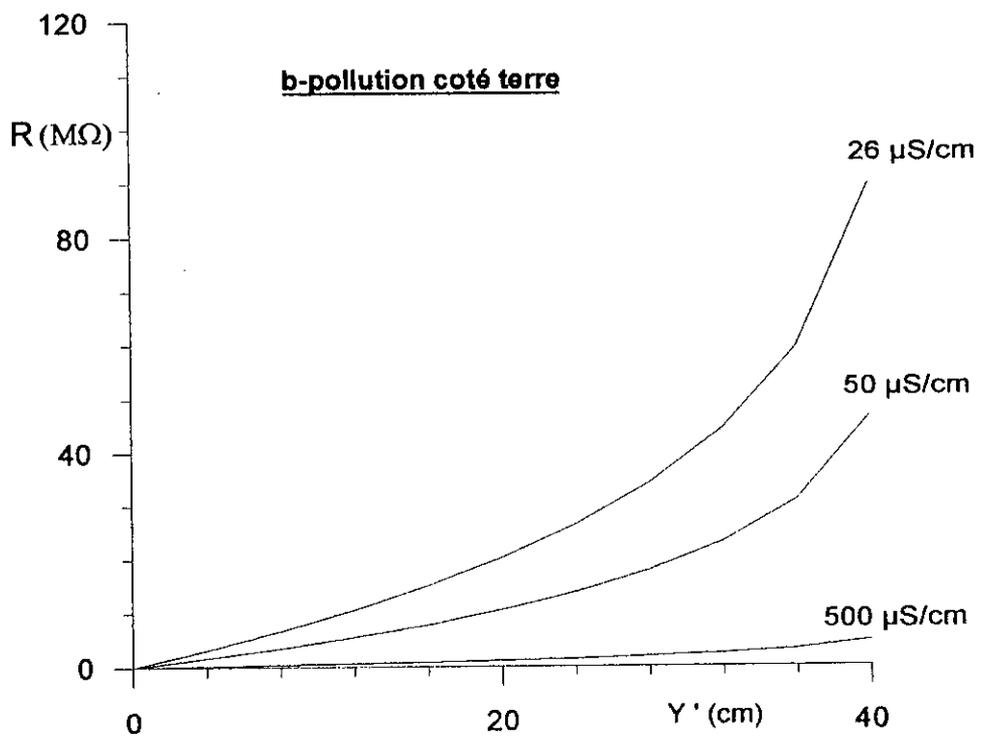
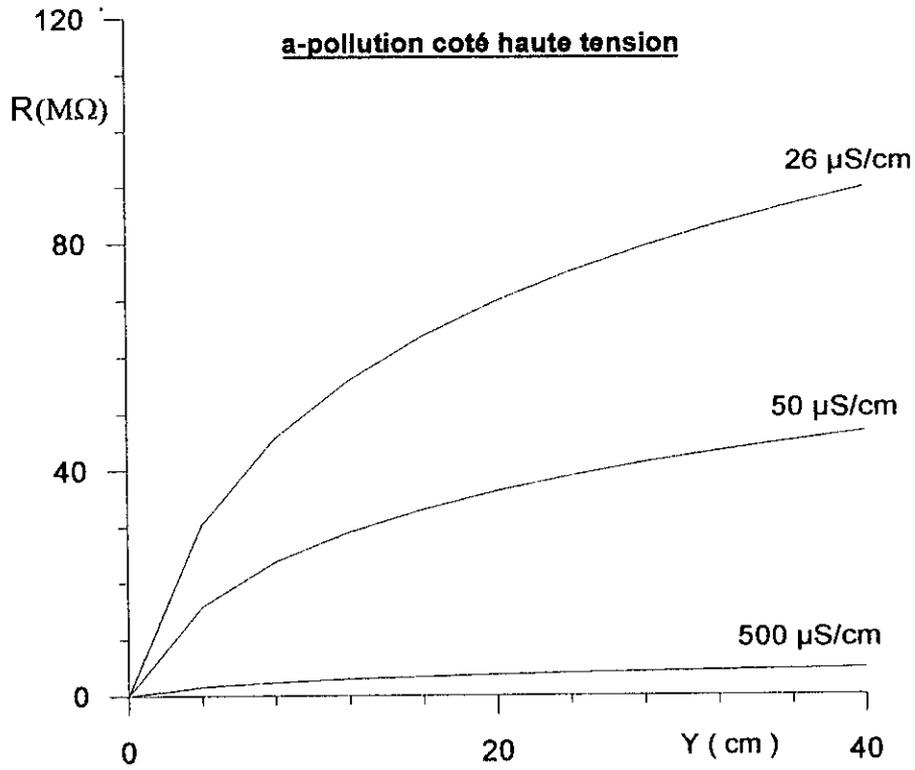
FigIV-4 : Pollution côté terre

On obtient alors :

$$R(y') = (K/\sigma) \cdot \log [(a+L)/(a+L-y')] \quad (4)$$

Nous avons représenté les deux familles de courbes (pollution côté haute tension et pollution côté terre, voir figure IV-5-a et b) pour les trois conductivités 26, 50 et 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (la résistance à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ est pratiquement confondue avec celle de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Celles-ci montrent que, théoriquement, il existe une différence entre les deux configurations, l'impédance de la pollution côté terre présentant une augmentation moins "rapide" que celle côté haute tension. Cela signifierait que nous devrions obtenir un courant légèrement plus élevé côté terre. Cependant, nous verrons que pour les conductivités élevées, cette impédance devient si faible devant celle de la zone sèche que sa valeur n'influe plus sur l'impédance totale de la plaque.



FigIV-5 : Résistance de la pollution en fonction de sa largeur (formule empirique)

IV-2-4-impédance totale vue des électrodes

Il s'agit de prendre en considération la somme des deux impédances, couche propre et couche polluée en supposant que celles-ci sont en phase ainsi que stipulé dans la première hypothèse. On obtient alors :

• pollution côté haute tension :

$Z_t(y) = Z_{oe}(y) + R(y)$ c'est à dire :

$$Z_t(y) = (Z_o(0)) \cdot \left[\frac{(L-y)}{L} \right]^{0.42} + (K/\sigma) \cdot \log \left[\frac{(a+y)}{a} \right] \quad (4)$$

• pollution côté terre

$Z_t(y') = Z_{oe}(y') + R(y')$ c'est à dire :

$$Z_t(y') = (Z_o(0)) \cdot \left[\frac{(L-y')}{L} \right]^{0.42} + (K/\sigma) \cdot \log \left[\frac{(a+L)}{(a+L-y')} \right] \quad (5)$$

IV-3-Détermination de la tension reportée sur la zone sèche à partir du modèle théorique

IV-3-1-Rapport des impédances

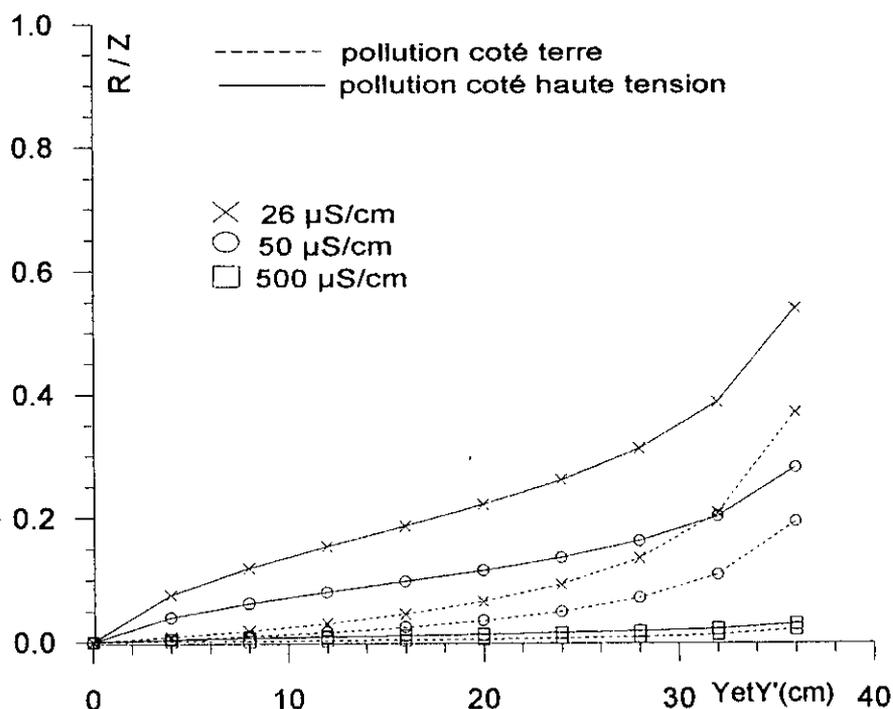
Pour mieux illustrer les résultats obtenus ci-dessus nous avons représenté deux familles de courbes à la figure IV-6 qui expriment les rapports g :

$$g(y) = R(y)/Z_{oe}(y) \quad \text{et} \quad g(y') = R(y')/Z_{oe}(y').$$

Ces courbes nous permettent de mieux "imaginer" l'importance relative de la couche de pollution par rapport à la zone sèche lorsque la conductivité augmente.

Ainsi, le rapport des impédances devient (théoriquement) quasiment nul pour la conductivité 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et ce quelque soit la position de la pollution. Cependant, ce rapport devient élevé pour la conductivité la plus faible surtout lorsque la pollution est du côté haute tension (voir courbe à 26 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pollution côté haute tension).

On en déduit que le régime le plus critique est celui de la pollution côté terre et lorsque la conductivité est la plus élevée, résultat observé lors des essais.



FigIV-6 : Rapport des impédances couche polluée-couche propre en fonction de la largeur de la couche polluante

IV-3-2-tension reportée U_r

On déduit à partir des facteurs $g(y)$ et $g(y')$, le rapport de la tension "reportée" U_r sur la zone sèche sur la tension totale appliquée U en fonction de la largeur de la pollution (figure IV-7) :

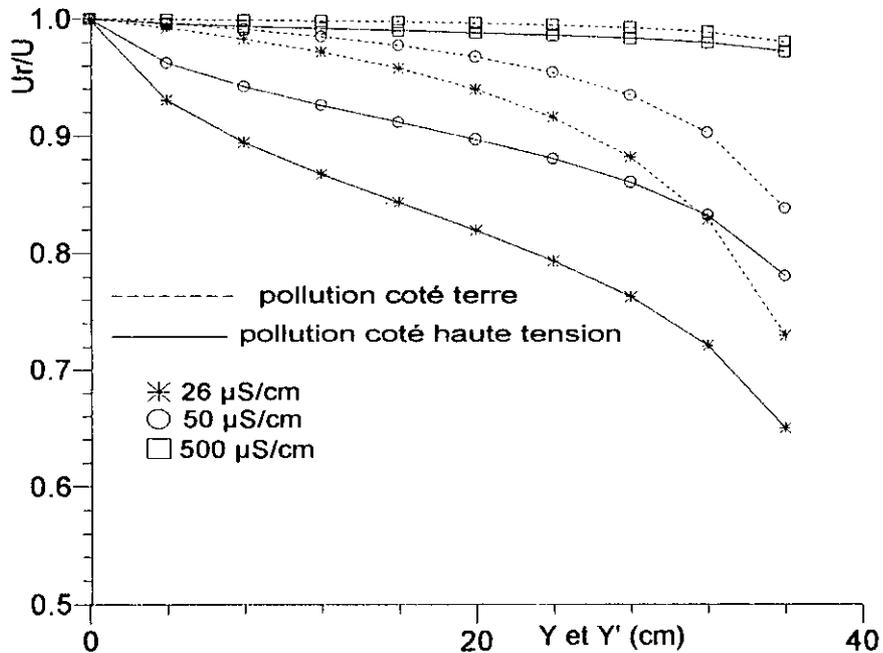
$$U_r(y) = U / (1 + g(y)) \text{ et}$$

$$U_r(y') = U / (1 + g(y'))$$

Les courbes U_r (y et y') montrent bien qu'à partir de la conductivité $500 \mu\text{S}/\text{cm}$, toute la tension se retrouve aux bornes de la zone sèche et ce quelque soit la largeur de la pollution.

Par contre pour les conductivités peu élevées comme 26 et $50 \mu\text{S}/\text{cm}$, on voit bien que l'impédance, non négligeable de la couche de pollution, diminue sensiblement le rapport U_r/U et donc contribue de manière moins significative au phénomène de conduction de la zone sèche.

Ce résultat, théorique, a été bien observé lors des essais où, pour les grandes largeurs de pollution, les phénomènes couronnes et arcs ont été nettement plus intenses pour la conductivité la plus élevée ($2000 \mu\text{S}/\text{cm}$) au point où les mesures aux très grandes largeurs de pollution n'ont pas été possibles (voir partie expérimentale).



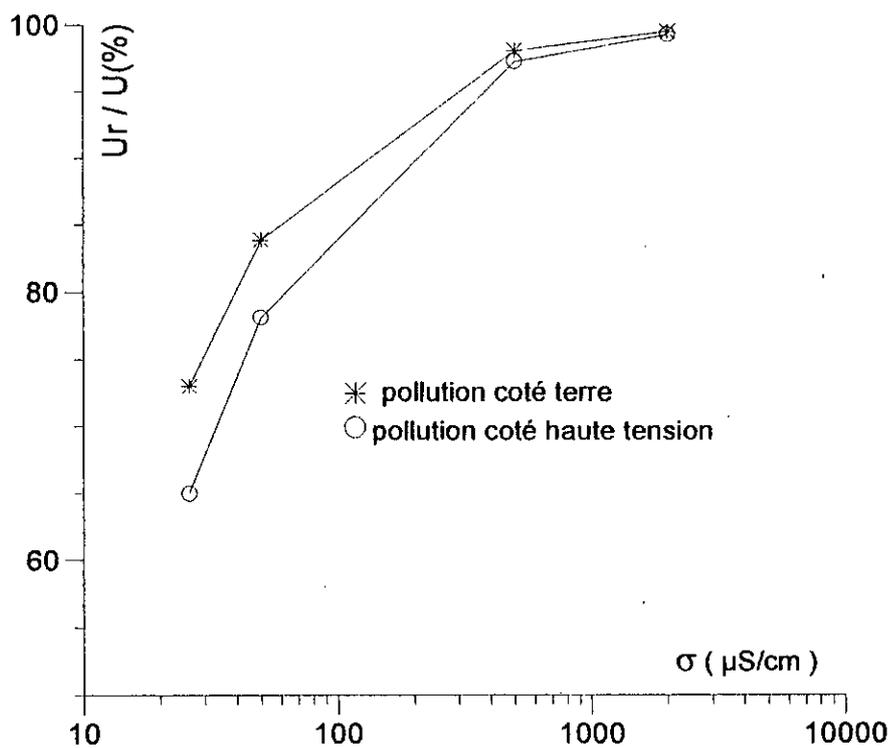
FigIV-7 :Rapport : tension reportée/tension totale appliquée en fonction de la largeur de la couche polluante

Mieux encore, les essais d'arcs nous ont permis de constater l'influence de la conductivité sur la tension disruptive de la zone sèche. Il apparut en effet clairement que la tension d'arc (on entend par tension d'arc, la tension *totale* appliquée) était nettement plus élevée pour une faible conductivité ($50 \mu\text{S/cm}$).

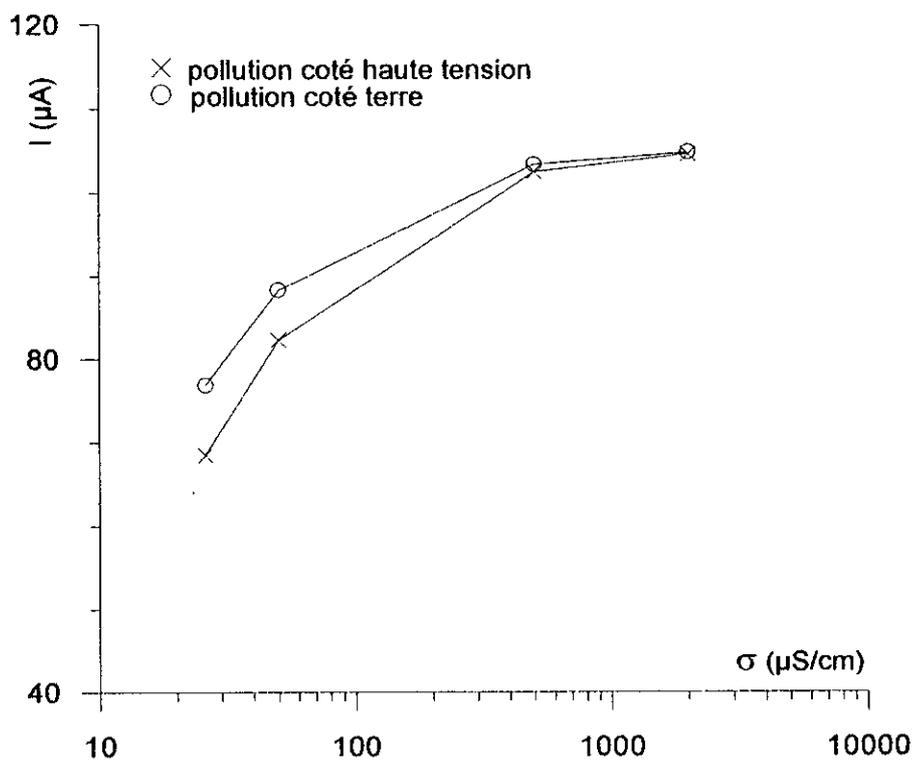
Ceci montre que l'impédance de la pollution à cette conductivité n'est pas négligeable et donc conduit à une chute de tension appréciable à ses bornes : d'où la nécessité d'augmenter davantage la tension appliquée pour pouvoir observer un arc.

Pour les deux conductivités les plus élevées (500 et $2000 \mu\text{S/cm}$), les tensions reportées sont théoriquement identiques (voir U_r/U (%) en fonction de la conductivité à $y=y'=36$ cm, figure IV-8), ce qui ne correspond pas tout à fait aux résultats expérimentaux (essais d'arcs, pour la pollution coté haute tension) où on observe tout de même un écart entre les tensions d'arcs à 500 et $2000 \mu\text{S/cm}$. Nous noterons alors que :

1-les phénomènes d'arcs sont difficilement reproductibles et obéissent parfois à des règles difficiles à contrôler. Ces essais ne nous permettent donc pas de tirer de trop rapides conclusions.



FigIV-8 : Rapport : tension reportée/tension totale appliquée en fonction de la conductivité pour $y=y'=36$ cm



FigIV-9 : Courant de fuite théorique en fonction de la conductivité pour $y=y'=36$ cm

2-d'autres phénomènes entrent probablement en jeu car nous observons un écart *également* entre les courants de fuite à 500 et 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui ne *devrait* théoriquement pas se produire (voir $I(\sigma)$ à $y=y'=36$ cm, figure IV-9). Les résultats pratiques rendent compte d'une conduction très accentuée de la zone sèche à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ par rapport à 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour une même largeur de pollution (36 cm par exemple), phénomène difficilement explicable.

Nous tenterons d'expliquer cet écart en supposant que:

- la chute de tension aux bornes de la couche polluée n'est pas si négligeable en pratique à 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. On peut alors comprendre qu'il y'ait, d'une part une tension d'arc plus élevée, et d'autre part un courant plus faible pour 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ par rapport à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Le modèle aurait alors "sous estimé" les valeurs d'impédances de la pollution aux conductivité élevées.
- il se produit peut être un phénomène physique supplémentaire lorsque la conductivité est très élevée, un peu comme si la solution saline "contaminait" d'une manière ou d'une autre la zone propre, ce qui réduirait l'impédance de cette dernière.

IV-4-Détermination du courant de fuite théorique à partir de l'impédance totale

Les observations faites lors des essais nous ont permis de constater qu'il existe deux comportements distincts du modèle selon le niveau de la contrainte appliquée. Il s'agit d'une part d'un régime ohmique, lorsque les conditions de pollution sont encore non critique et d'autre part d'un régime non linéaire, n'obéissant plus à la loi d'ohm. Celui-ci ne permet pas d'évaluer d'une manière aussi simple l'impédance de la couche propre, celle-ci "supportant" la tension la plus élevée et donc perdant forcément son caractère ohmique (les caractéristiques $U(I)$ présentées dans la partie expérimentale illustrent parfaitement ce phénomène).

Les figures IV-10 à IV-13 représentent la variation du courant de fuite en fonction de la largeur de la pollution. Celles-ci ont été tracées pour trois niveaux de tension et pour les quatre conductivités à savoir 26, 50, 500 et 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Le courant théorique est, bien entendu, déterminé à partir de l'impédance totale et de la tension appliquée. Celui-ci, représenté en traits pleins est comparé aux points expérimentaux représentés en pointillés.

Afin de bien observer l'évolution du courant au fur et à mesure que la largeur augmente, nous avons choisi de représenter les courbes pour une

largeur allant de 0 à L pour les conductivités 26 et 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$, puis de 0 à 0,9L pour 500 et 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (c'est à dire nous avons repris les mêmes variations que pour les essais expérimentaux).

L'analyse de ces courbes montre que le modèle empirique est d'autant plus proche du modèle expérimental que :

- * la pollution est établie côté haute tension
- * le niveau de tension n'est pas trop élevé
- * la largeur de la pollution n'est pas critique

C'est ainsi que les courbes sont pratiquement confondues pour les niveaux 12 et 24 kV lorsque la pollution est établie coté haute tension même pour la conductivité la plus élevée à savoir 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (figures IV-10-a à IV-13-a).

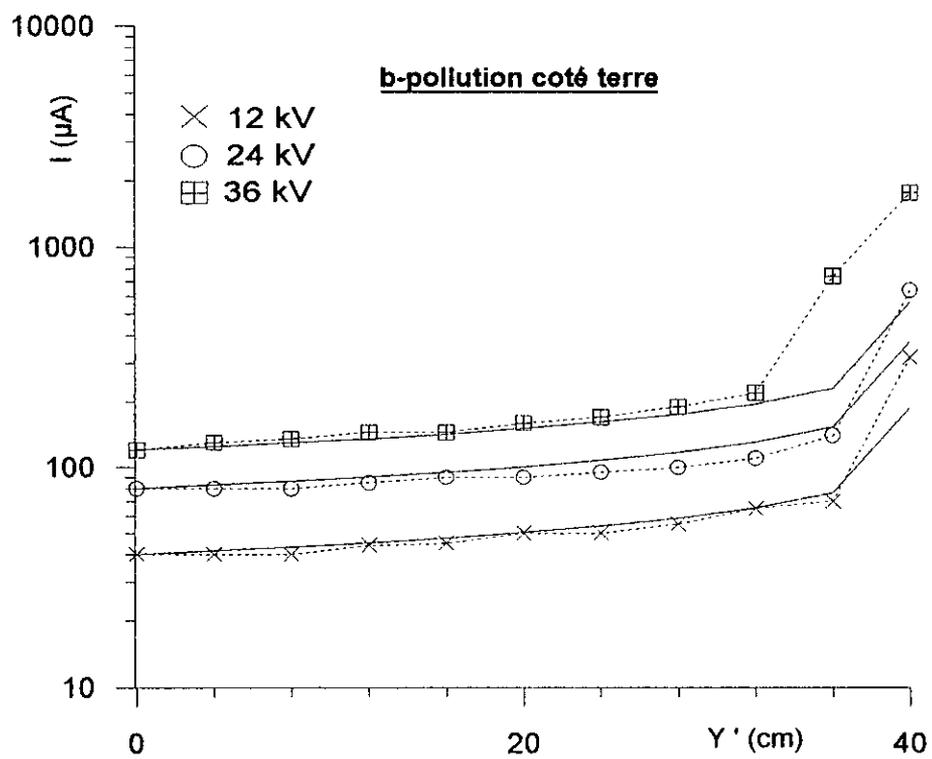
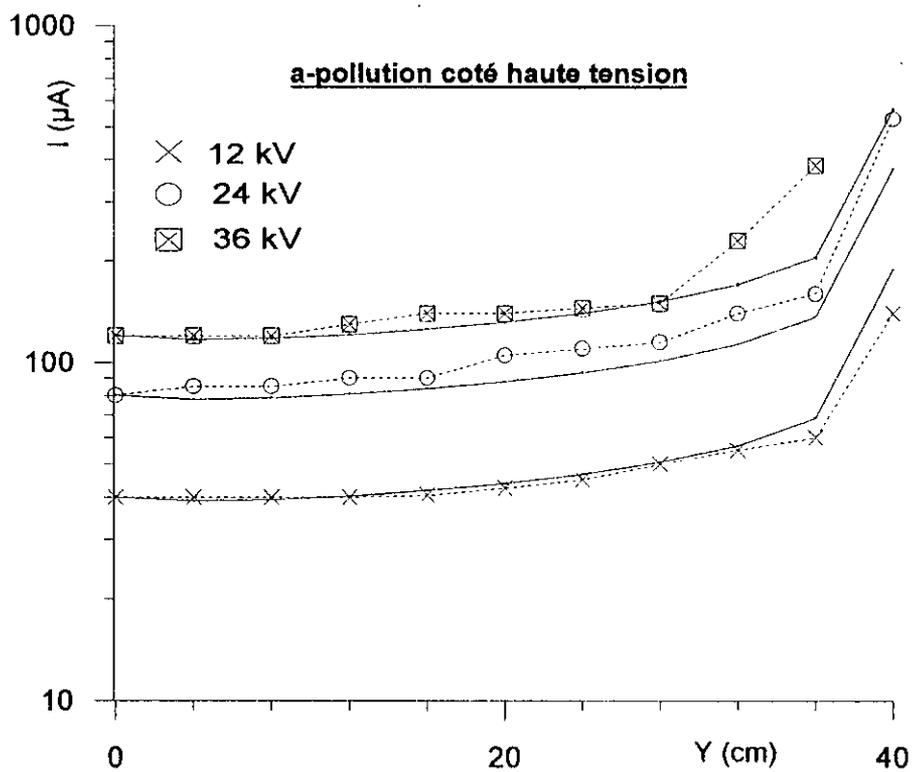
Pour la pollution côté terre et pour les mêmes niveaux de tension, les courbes sont également très proches pour toutes les conductivités sauf pour la conductivité 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

En effet, pour la conductivité 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, les courbes divergent à partir d'une largeur déterminée de pollution. Cette dernière est évaluée aux environs de 20 cm pour le niveau 12 kV (autour de 50% de la longueur totale) et de 16 cm (40% de la longueur totale) pour le niveau 24 kV.

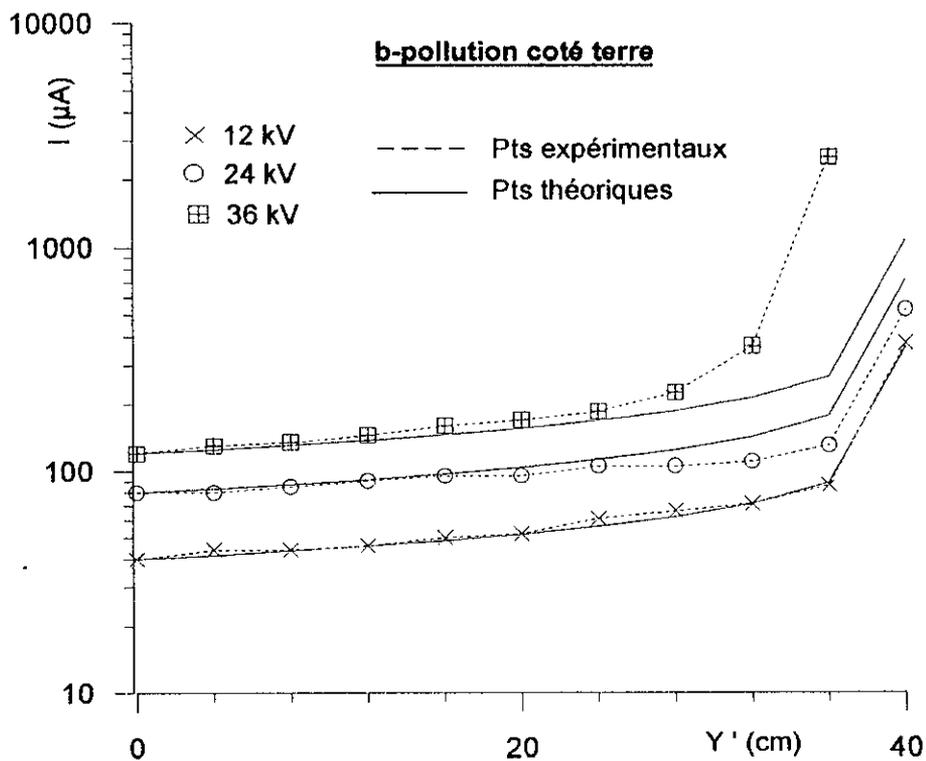
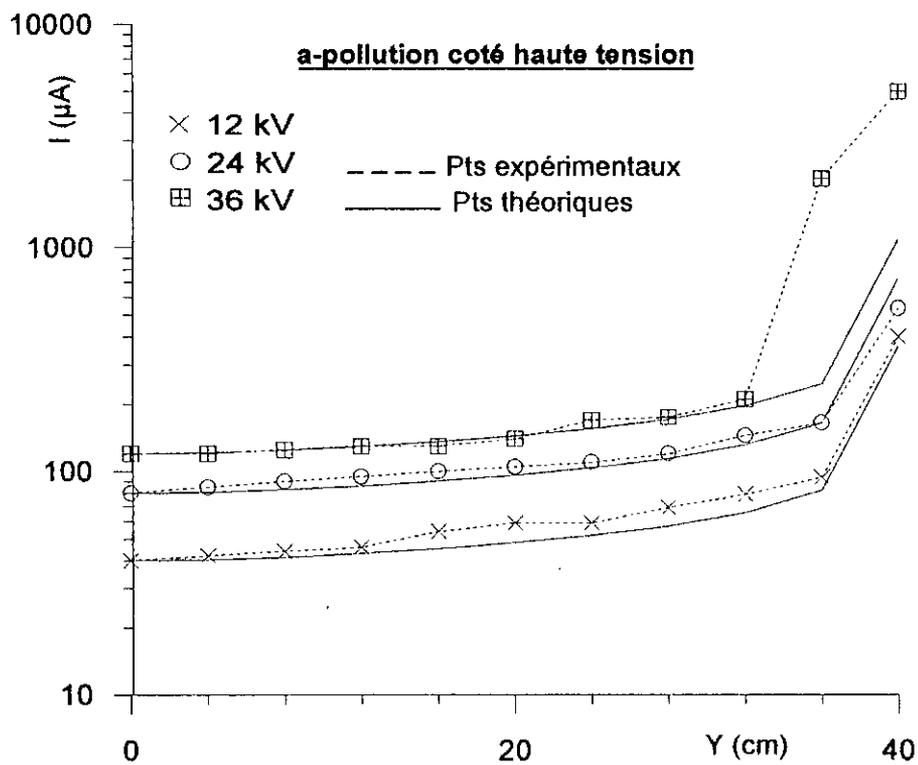
Lorsque la tension atteint 36 kV, le modèle ne convient plus à partir d'une largeur spécifique à *chaque conductivité* et aux deux position de la pollution. Cette largeur "critique" est d'autant plus élevée que :

- * la conductivité est faible (pour 26 et 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$, cette largeur est supérieur à 80% de la longueur totale).
- * la pollution est côté haute tension (même pour la conductivité la plus élevée, la largeur critique reste quand même importante, supérieure à 70% de la longueur totale).

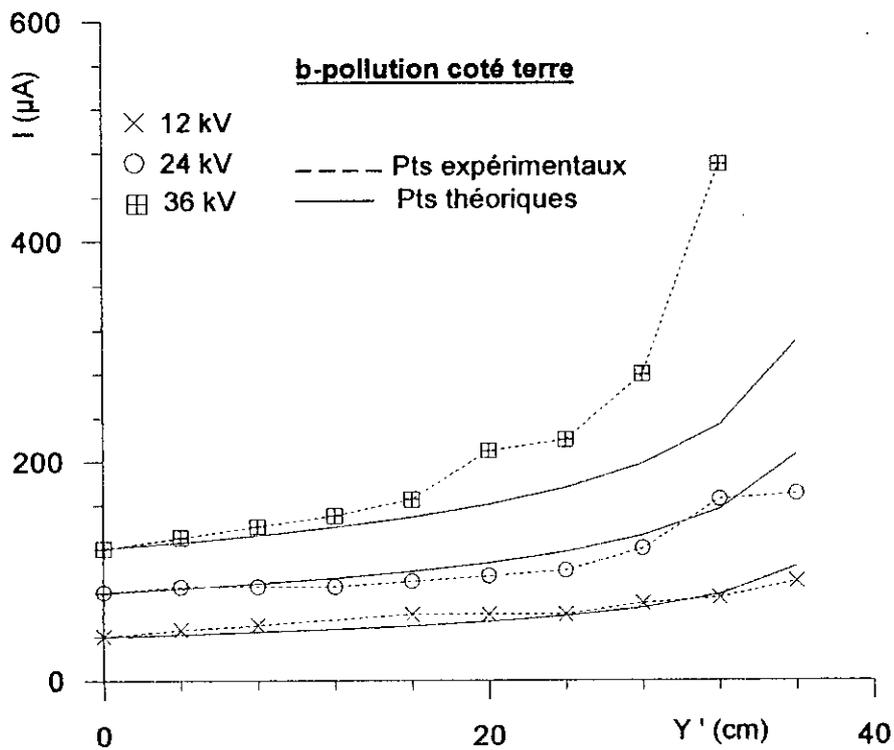
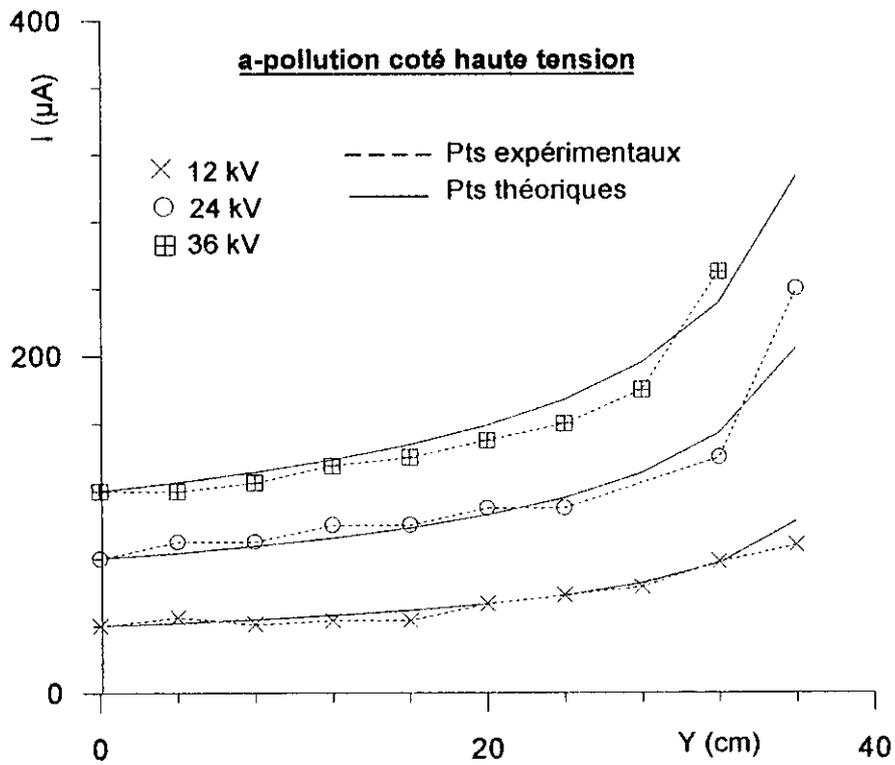
Nous constatons en définitive que le modèle empirique reflète assez bien le comportement de la plaque sous réserve de ne pas atteindre les régimes de conduction de la zone propre, régimes associés aux tensions élevées et/ou conductivités élevées. Ceci est prévisible étant donné que le modèle empirique ne tient pas compte de la diminution de l'impédance de la zone sèche lorsque le régime critique est atteint. Ce régime, non linéaire a été largement commenté dans la partie expérimentale.



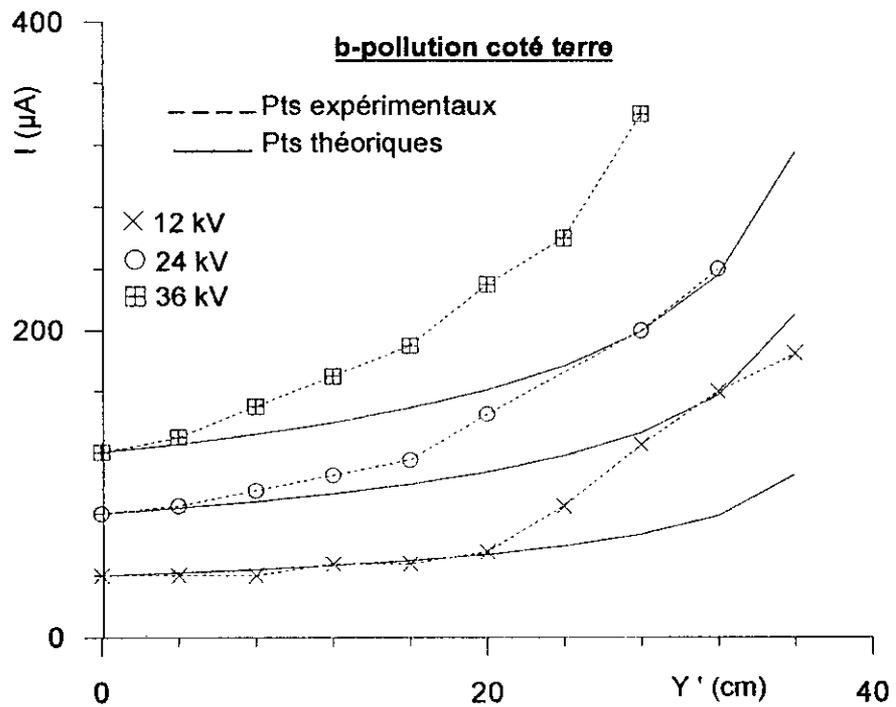
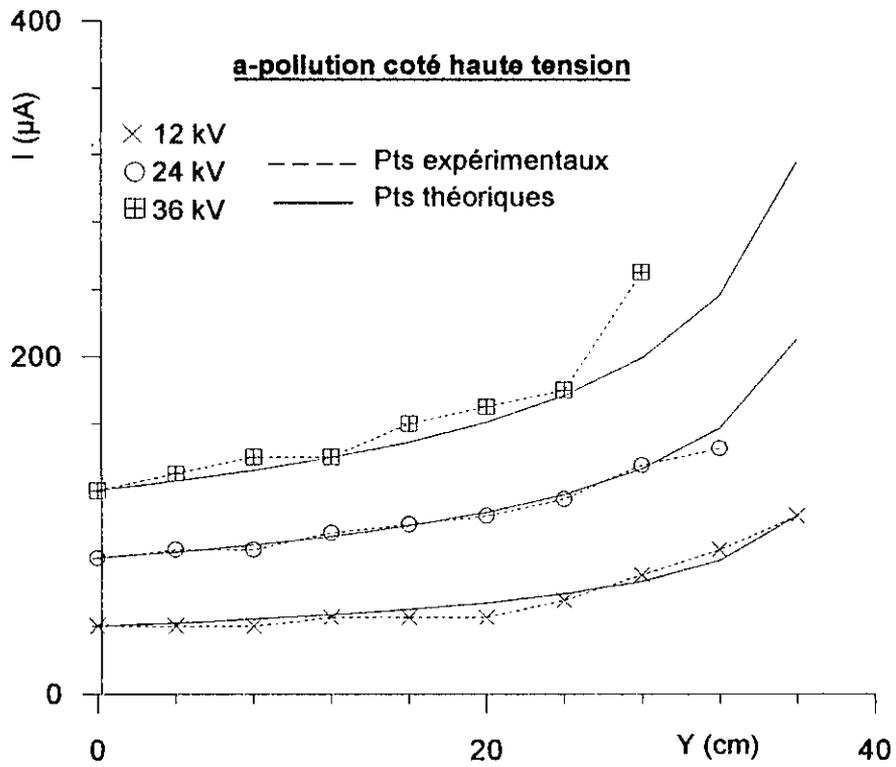
FigIV-10 : Courant de fuite en fonction de la largeur de la couche polluante ($\sigma = 26 \mu\text{S}/\text{cm}$)



FigIV-11 : Courant de fuite en fonction de la largeur de la couche polluante ($\sigma = 50 \mu\text{S/cm}$)



FigIV-12 : Courant de fuite en fonction de la largeur de la couche polluante ($\sigma = 500 \mu\text{S/cm}$)



FigIV-13 : Courant de fuite en fonction de la largeur de la couche polluante ($\sigma = 2000 \mu\text{S/cm}$)

IV-5-Tension d'arc et contournement : Discussion

L'objectif de ce paragraphe est de comparer certains de nos résultats par rapport à d'autres travaux déjà effectués. Comme il existe déjà des équations empiriques, utilisées par de nombreux auteurs, il nous a paru intéressant de comparer nos résultats expérimentaux par rapport à ces formules.

Nous avons ainsi comparé nos résultats par rapport à ceux de **Claverie** et **Porcheron** [23] puisque nous avons utilisé un dispositif semblable au leur, bien que le procédé de répartition de la couche de pollution soit différent.

Nous avons ensuite comparé nos résultats par rapport à quelques uns des travaux empiriques sur isolateurs réels afin de montrer si le modèle choisi reflète bien ou non le comportement de l'isolateur.

IV-5-1-Tension minimale d'entretien de l'arc selon Claverie

La tension d'entretien d'un arc de longueur x en alternatif est donnée par la formule empirique suivante [23], dans une gamme de conductivité allant de 2500 à 40000 $\mu\text{S/cm}$:

$$U_a(x) = 90 (x^2 \cdot R(x))^{1/3}$$

Dans notre cas, la longueur de l'arc x s'exprime en fonction de la largeur de pollution comme :

$$x=L-y \quad \text{pour la pollution coté haute tension (arc côté terre)}$$

$$\text{et } x'=L-y' \quad \text{pour la pollution coté terre (arc côté haute tension)}$$

Nous obtenons donc, en utilisant les formules empiriques déjà établies dans les paragraphes précédents :

*** Arcs côté terre (pollution côté haute tension)**

$$U_a(x) = 90 [x^2 \cdot (K/\sigma) \cdot \log((a+L-x)/(a))]^{1/3}$$

*** Arcs côté haute tension (pollution côté terre)**

$$U_a(x') = 90 [x'^2 \cdot (K/\sigma) \cdot \log((a+L)/(a+x'))]^{1/3}$$

Nous avons finalement tracé les courbes empiriques de **Claverie** et

Porcheron correspondant aux trois conductivités utilisées à savoir 50, 500 et 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces courbes sont ensuite comparées aux points expérimentaux obtenus lors des essais pour les mêmes conductivités (figure IV-14 et IV-15).

L'analyse des courbes confirme bien que dans la plage de variation des conductivités utilisées par ces auteurs, il existe une assez bonne concordance dans les résultats. Pour les très faibles conductivités (50 $\mu\text{S}/\text{cm}$), les courbes s'écartent, ce qui est logique parce que nous ne sommes plus dans le domaine de travail de ces auteurs.

Remarque :

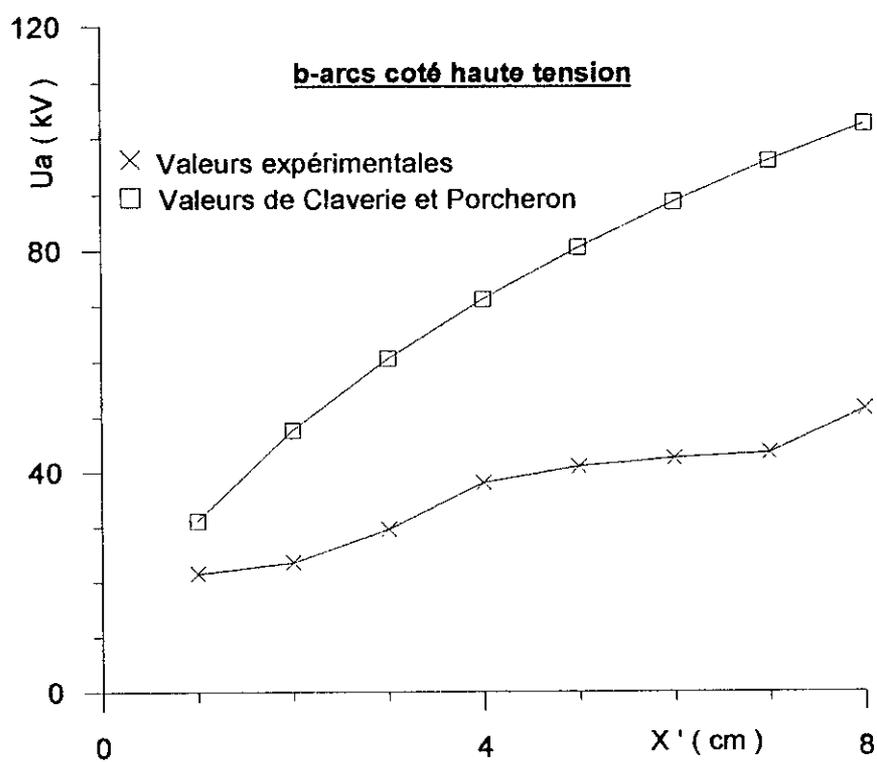
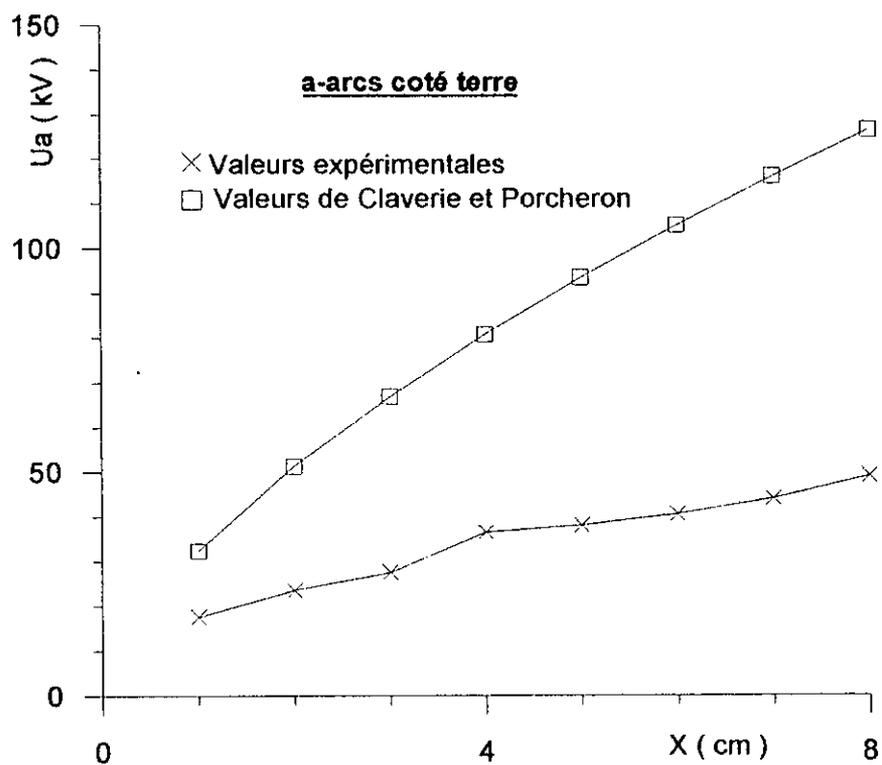
Notons tout de même que le mode d'application de la pollution a son importance puisqu'il est établi que lorsqu'on augmente de manière notable la conductivité, celle-ci ne devrait pratiquement pas influencer sur la tension reportée et donc sur la tension d'entretien de l'arc : les essais sur l'aluminium ont bien illustré ce phénomène.

La formule de **Claverie et Porcheron**, impliquant *toujours* la valeur de la résistance de la pollution ne peut donc être appliquée correctement dans le cas de couches discontinues. On peut alors penser que le processus physique de la création d'arcs n'est pas le même.

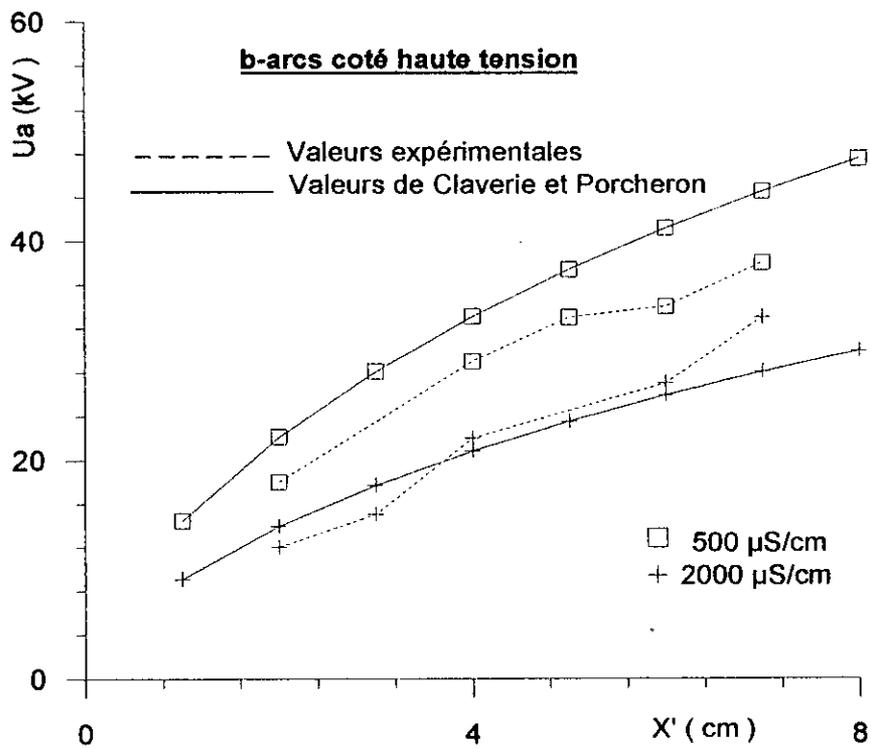
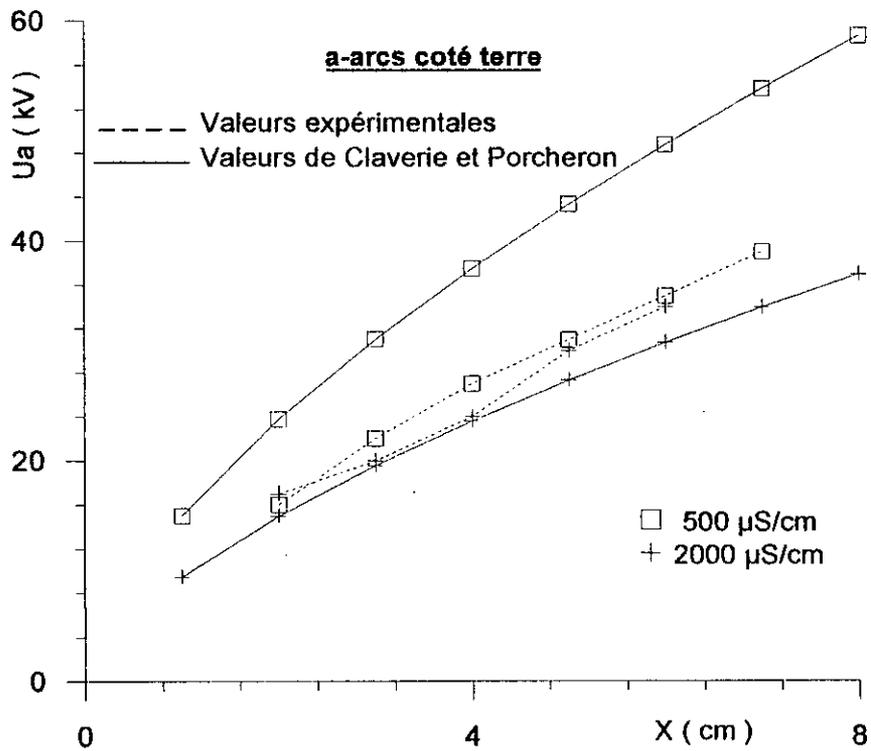
En effet, dans le cas de couches discontinues où la zone sèche est imposée, la température de l'air ambiant situé juste au dessus de la zone sèche avant le court-circuit de la zone sèche détermine la tension disruptive.

Par contre, lorsque la pollution est continue (et nous retrouvons un des résultats de **F.A.M. Rizk** [66]), le modèle par rupture diélectrique tient compte du rayon r_a de l'arc, lequel "grossit" lorsque le courant augmente. Selon Rizk [66], la tension disruptive d'un arc de longueur x est déterminée par rapport à la température ambiante *corrigée* par un facteur inversement proportionnel au rayon de l'arc, donc au courant.

On voit bien donc que dans le cas de propagation de l'arc sous pollution continue, pour un arc de longueur x , une même tension reportée peut conduire ou non à la rupture diélectrique selon l'état du plasma résiduel, lequel est nécessairement conditionné par le rayon maximum de l'arc, c'est à dire par le courant de crête.



FigIV-14 : Tension d'entretien de l'arc en fonction de sa longueur ($\sigma = 50 \mu S/cm$)



FigIV-15 : Tension d'entretien de l'arc en fonction de sa longueur ($\sigma = 500$ et $2000 \mu\text{S/cm}$)

IV-5-2-Contournement :discussion

a-Formule de Claverie

En appliquant la formule de **Claverie** et **Porcheron** [23], on peut déterminer la tension de contournement correspondant à la longueur d'arc critique observée et qui vaut : $x_c=12$ cm (voir partie expérimentale). En remplaçant les deux valeurs de conductivité utilisée dans les essais de contournement, on obtient pour les deux configurations :

* Pollution côté haute tension [configuration (x, y)]

$$\sigma = 50 \mu\text{S/cm} \quad \Rightarrow \quad U_c(\text{claverie}) = 123 \text{ kV} \quad \text{et} \quad U_c(\text{exp})=70.4 \text{ kV}$$

$$\sigma = 2000 \mu\text{S/cm} \quad \Rightarrow \quad U_c(\text{claverie}) = 36 \text{ kV} \quad \text{et} \quad U_c(\text{exp})=50.8 \text{ kV}$$

* Pollution côté terre [configuration (x', y')]

$$\sigma = 50 \mu\text{S/cm} \quad \Rightarrow \quad U_c(\text{Claverie}) = 163 \text{ kV} \quad \text{et} \quad U_c(\text{exp})=72 \text{ kV}$$

$$\sigma = 2000 \mu\text{S/cm} \quad \Rightarrow \quad U_c(\text{Claverie}) = 47.6 \text{ kV} \quad \text{et} \quad U_c(\text{exp})=49 \text{ kV}$$

On constate une nette différence entre nos valeurs et ceux de **Claverie** pour la conductivité $50 \mu\text{S/cm}$, résultat déjà établi pour les essais d'arcs. Par contre les valeurs correspondant à $2000 \mu\text{S/cm}$ sont pratiquement confondues pour les arcs cotés haute tension, qui, d'ailleurs ont été *les seuls* à être considéré par **Claverie**. Pour la pollution coté terre, on constate une divergence des résultats, peut être que parce que cette configuration n'a pas été envisagée par **Claverie**.

Il ne faut cependant pas perdre de vue que le processus de contournement, comme celui de la génération de l'arc, est forcément différent selon que la pollution est continue ou non.

Formule de A.Roth [75]

Celle-ci, établie également d'une manière empirique, s'exprime comme :

$$U_c = 3,16 d + 14$$

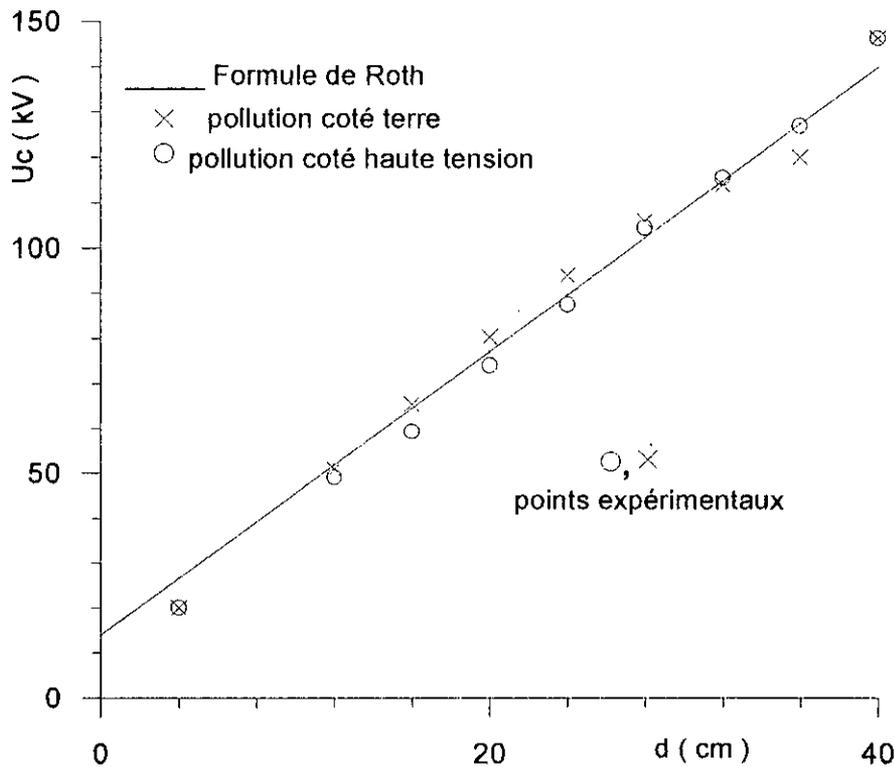
d étant la distance inter-électrodes d'une chaîne d'isolateurs (cm)

U_c tension disruptive de la chaîne, supposée à l'état propre et sec (kV).

Cette formule étant valable pour des distances supérieures à 8 cm, nous avons pensé à comparer ce résultat par rapport à nos résultats à la conductivité

2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en supposant que la couche polluée à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, constituant un court-circuit, est équivalente à une *électrode*.

La corrélation entre les deux résultats, illustrée sur la figure IV-16, est dans ce cas quasi parfaite. Ceci montre que le modèle expérimental reflète remarquablement le comportement de l'isolateur réel puisque la formule de **Roth** concerne le comportement des chaînes d'isolateurs : le modèle plan adopté peut constituer alors un modèle "réduit" intéressant.



FigIV-16 : Tension de contournement en fonction de la distance inter-électrodes

Formule de G. Gallet [76]

Celle-ci est établie pour le contournement d'isolateurs soumis à des tensions impulsionnelles [76]:

$$U_{ci} = 3400 / (1 + 8/d)$$

d : étant la distance inter-électrodes d'une chaîne d'isolateurs (m)

U_c : tension disruptive de la chaîne, supposée à l'état propre et sec (kV).

Cette formule fut ensuite corrigée par le facteur 1,2 pour les cas de tensions à la fréquence 50 Hz, qui est le cas qui nous intéresse :

$$U_c = 1,2 [3400 / (1 + 8/d)]$$

Nous avons ainsi tenté, comme dans le cas précédent, de comparer nos résultats par rapport à ces deux formules empiriques (figure IV-17). Nous constatons une bonne corrélation entre les essais expérimentaux et la formule empirique sous tension impulsionnelle. C'est à dire que dans notre cas, la formule de J.Lalot et G.Gallet serait valable *sans facteur de correction*.

Toutefois, il ne faut pas perdre de vue que le but de ces comparaisons est d'essayer de trouver une similitude entre le modèle plan utilisé et l'isolateur réel : la formule de J.Lalot et G.Gallet n'étant valable que pour des longueurs de chaînes supérieures à 1 m est donc moins proche de notre modèle que celle de Roth.

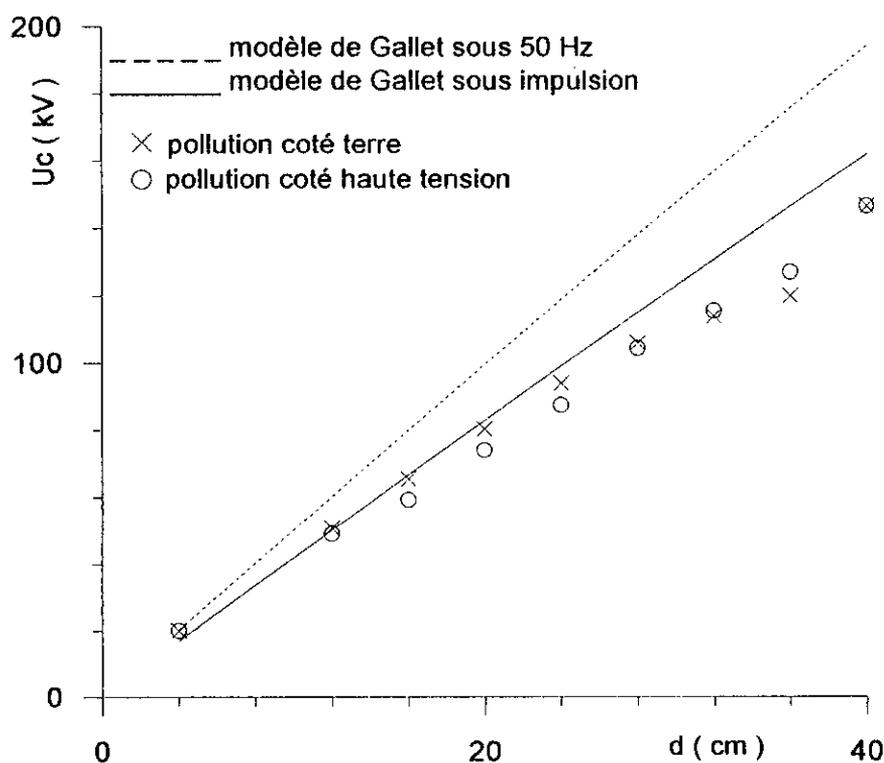


Fig IV-17 : Tension de contournement en fonction de la distance inter-électrodes

IV-6- Conclusions

a-Courant de fuite

Concernant le courant de fuite, nous constatons une très bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et le modèle empirique lorsque la pollution n'engendre pas de régimes critique, c'est à dire lorsque la zone sèche garde les mêmes propriétés d'isolement.

Au delà, il apparaît clairement que d'autres paramètres entrent en jeu, réduisant l'impédance équivalente de cette dernière. Dans ce cas, le modèle 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.

b-Tension reportée

La tension reportée, illustrée par les essais d'arcs, montre une corrélation certaine entre les résultats et le modèle, puisque dans les deux cas (expérimental et empirique), on constate une chute de tension non négligeable aux bornes de la couche polluée aux faibles conductivités (voir les courbes U_r/U). Il reste cependant une nuance entre les deux approches concernant les conductivités élevées, les courbes théoriques prévoyant des tensions d'arcs identiques pour 500 et 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui ne fut pas le cas lors des essais expérimentaux.

Plusieurs hypothèses ont alors été formulées pour expliquer cet écart qui apparaît même pour le courant de fuite (ce qui montre la reproductibilité du phénomène).

c-Tension d'entretien de l'arc et contournement

Bien que, comme nous l'avons relevé, le mode d'application de la pollution ne soit pas sans importance, nous avons obtenu une bonne corrélation entre les valeurs expérimentales et les résultats obtenus par d'autres auteurs [23] dans les limites de conductivités déjà définis par ces derniers.

Cependant, il ne faut pas perdre de vue que le mode de pollution discontinue n'engendre pas les mêmes phénomènes physiques. En effet, la corrélation devra montrer ses limites dans le cas des très grandes conductivités, par exemple, où la progression d'un arc de rayon donné en pollution continue, influe sur la tension disruptive d'une zone sèche de longueur x [66], ce qui n'est pas le cas lorsque la zone sèche est déjà préétablie.

Les mêmes conclusions peuvent être tirées concernant la tension de contournement où nous observons, par rapport à la formule de **Claverie** et **Porcheron**, tout de même une très bonne corrélation entre la tension de contournement à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pollution côté terre (c'est à dire développement de l'arc côté haute tension).

D'autre part, nous observons une très bonne similitude entre les résultats expérimentaux obtenus à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, et quelques unes des formules empiriques établies par divers auteurs, concernant l'isolateur réel, même dans des plages de distances inter-électrodes *plus élevées* [75] : cela nous fait alors penser que le modèle plan adopté pourrait constituer un modèle "réduit" pratiquement valable.

Conclusion Générale

Les travaux consacrés au domaine de la pollution, nombreux et très diversifiés, nous ont permis d'avoir une vue d'ensemble sur les phénomènes électriques liés au dépôt d'une couche polluante sur les chaînes d'isolateurs.

Au terme de notre travail, nous avons constaté la richesse et la diversité de la bibliographie existante et dont nous n'avons présenté qu'une infime partie (chapitre I), jugée la plus représentative.

L'étude expérimentale présentée, a concerné divers essais sur un modèle plan de laboratoire (P.Claverie et Y.Porcheron [23]). Une répartition discontinue de la couche polluante a été établie sur le modèle, en adoptant deux configurations :

- * pollution côté terre (électrode rectangulaire)
- * pollution côté haute tension (électrode circulaire)

D'autres paramètres, tels que la tension appliquée et la conductivité de la couche polluante, ont été pris en considération. Les essais ont porté sur :

- ◇ le courant de fuite
- ◇ la tension d'entretien de l'arc électrique
- ◇ la tension de contournement

L'étude expérimentale a confirmé quelques uns des résultats obtenus par d'autres chercheurs sur des modèles de laboratoire ou sur isolateurs réels.

Nous donnons les principales conclusions :

a-Le courant de fuite

Il existe un régime critique à partir duquel nous obtenons une hausse brutale du courant (régime associé au phénomène d'ionisation de l'air). Ce régime est atteint pour les grandes largeurs de couche polluante, lorsque la tension et/ou la conductivité sont élevées.

D'autre part, le courant de fuite dépend de la position de la couche polluée (côté terre ou côté haute tension). Nous avons ainsi constaté que lorsque l'effet couronne s'établit, le courant de fuite devient *toujours* plus élevé lorsque la couche polluante est du côté de l'électrode rectangulaire, mise à la terre.

Le modèle empirique proposé au chapitre IV, nous a permis d'expliquer et d'interpréter les allures des caractéristiques du courant de fuite obtenues lors des essais.

Nous constatons une bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et le modèle empirique tant que la zone sèche garde les mêmes propriétés d'isolement. Au delà, le modèle 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.

b-La tension d'entretien de l'arc

Il est difficile d'évaluer valablement le développement de l'arc lorsque celui-ci a lieu côté terre à cause d'arcs multiples se développant également côté haute tension. Nous avons néanmoins observé que la position a peu, ou pas, d'influence sur la tension d'entretien de l'arc.

Il a été établi que la conductivité influe sur la tension d'entretien d'arc. Cette dernière diminue sensiblement, pour une même largeur de la zone sèche, lorsque la conductivité augmente.

Les résultats d'essais ont également montré une bonne corrélation avec les travaux d'autres auteurs, dans les limites de conductivités déjà définies par ces derniers [23].

c-La tension de contournement

1. la position de la pollution n'a apparemment pas d'influence sur la tension de contournement pour les conductivités utilisées.
2. il existe une longueur d'arc critique à partir de laquelle on ne peut plus maintenir un arc stable. Cette longueur, évaluée au tiers de la longueur de la plaque, diffère considérablement de celle obtenue par **Claverie et Porcheron** dans le cas de pollution continue [23] : ceci nous fait penser que le processus de création d'arcs est très différent lorsque des zones sèches sont préétablies.
3. La longueur d'arc critique est toutefois indépendante de la conductivité, résultat déjà établi par nombre d'auteurs [23, 33].
4. Certaines formules empiriques, déjà établies par d'autres auteurs et appliquées à l'isolateur réel [75, 76] ont montré une bonne similitude avec nos résultats expérimentaux. Nous en avons déduit que, finalement, le modèle adopté, et le choix du mode d'application de la pollution sur ce dernier, peuvent constituer un modèle "réduit" intéressant compte tenu des résultats obtenus.

d-Les essais avec une couche conductrice (aluminium)

Nous avons tenté de déterminer à partir de ces essais la conductivité limite, à partir de laquelle, en cas de zone sèches préétablies, la couche polluante peut être considérée comme un *court-circuit*. Une conductivité comprise entre 500 et 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ semble correspondre à cette limite puisque les résultats d'essais sont assez proches.

Mieux encore, ces essais ont permis d'établir que la conductivité n'est pas

la seule responsable du phénomène de conduction de la zone sèche. La nature liquide de la pollution, semble également perturber les propriétés de l'interface air-verre. Ces résultats devront néanmoins être confirmés ultérieurement, pour observer s'il y a bien reproductibilité des phénomènes.

Plusieurs de nos résultats pourraient éventuellement être développés dans des travaux futurs.

Ceux-ci pourront concerner, par exemple, le rôle exact que peut jouer une pollution aqueuse par rapport à un autre type de pollution, ou alors la détermination des courbes en "V" sur plusieurs modèles de laboratoire et procéder ainsi à une étude comparative.

Même si l'application de la pollution semble délicate dans le cas de l'isolateur réel, il serait également très intéressant de comparer le comportement de ce dernier à celui de **Claverie** et **Porcheron**, *sous réserve* de le polluer de la même manière (mêmes largeurs, mêmes conductivités, etc.).

De même que la conductivité limite, considérée comme un court-circuit (et avérée dans notre cas pour une valeur comprise entre 500 et 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) peut ultérieurement faire l'objet de nouvelles confirmations.

Enfin, la longueur critique de l'arc, évaluée au tiers de la longueur totale peut également être confirmée (ou infirmée) pour d'autres dimensions du modèle.

Bibliographie

- [1] **Matei Barnea, Pascu Ursu**, "Pollution et protection de l'atmosphère", Edition Eyrolles, Paris 1974.
- [2] **V.M.Rutsky** "Prediction of discharge characteristics of external high-voltage insulation near industrial enterprises, polluting the atmosphere", 9^e international symposium on high voltage engineering, rapport 3247 , Autriche, 28 Août-1^e Septembre 1995.
- [3] **A.Djouadi, H.Melouk**, "Problème de la pollution marine des isolateurs de haute tension en Algérie", PFE, ENP 1975.
- [4] **R.G. Houlgate, P.J. LAMBETH, W.J. Roberts**, " Performances des isolateurs en milieu maritime en très haute et ultra haute tension" CIGRE, Rapport 33-01, 1982.
- [5] **J. Keller-Jacobsen, Aa. Pedersen, J.K. Rasmussen, A. Henriksen, C. Lindqvist, S. Smedsfelt** "Essais au laboratoire et en plein air pour dimensionner correctement les isolateurs exposés à la pollution saline", CIGRE, rapport 33-11, 1978.
- [6] **M. Dobarzik**, "Formes de décharges glissantes sous tension de choc 1,2 / 50 μ s sur les surfaces de diélectriques solides polluées par le sable du Sahara", thèse de docteur-ingénieur, ENP, Alger, Juin 1975.
- [7] **M.A.B El-Koshairy, El Sayed A.H Aly, A.E Abdullah, Ahmed M. El-Arbaty, E.A.A Mansour, S. El Debeiky**, "Comportement des isolateurs en résine époxy pour lignes de transport à haute tension dans les conditions de pollution rencontrées dans le désert. ", CIGRE, rapport 15-12, 1978.
- [8] **A. El-Arabaty, A.Nosseir, S. El-debeiky, E. Nasser, A. El-Sarky** "Choix d'isolateurs utilisables dans des ambiances polluées et notamment dans des régions désertiques.", CIGRE, Rapport 33-11, 1980.
- [9] **M.A.B.El-Koshairy, E.El-Sharkawi, M.M.Awad, H.E.M. Zarzoura, M.M.Khalifa, A.Nosseir**, "Performances de chaînes d'isolateurs haute tension soumises à la pollution du désert", CIGRE, Rapport 33-09, 1982.
- [10] **M. Khalifa, M. Abou-Seada, H. El-Ghazaly** "Laboratory simulation of desert pollution flashover of high voltage insulators", 4^e international symposium on high voltage engineering, rapport 46-03, Athènes, 5-9 Septembre 1983.
- [11] **A.Mekhaldi**, "Etude du développement d'un arc électrique sur des surfaces isolantes contaminées par la pollution désertique", thèse de Magister, ENP, Juin 1990.

- [12] **L.Chougui, R.Belaicha**, "Contribution à l'étude de la pollution des isolateurs de haute tension dans la région d'Arzew", PFE, ENP Janvier 1983.
- [13] **A.Mekhaldi, H.Boudjelthia**, "Contribution à l'étude de la pollution des isolateurs de haute tension dans la région électrique de Annaba", PFE, ENP Juin 1984.
- [14] **Arnaldo G.Kanashiro, Geraldo F.Burani** "Leakage current monitoring of insulators exposed to marine and industrial pollution" IEEE ,ISEI, Montréal, Québec, Canada, 16-19 juin 1996, p.271-274.
- [15] **A.Cimador, M.Cojan, P.Hautefeuille, M.Moreau**, "Méthodes de dimensionnement des isolateurs de lignes aériennes en régions polluées" CIGRE, rapport 33-04, 1978.
- [16] **M.P.Verma, H.Niklasch, W.Heise, H.Lipken, H.Schreiber, G.F.Luxa**, "Critère de contournement par pollution et ses applications pour le dimensionnement et le contrôle de l'isolation" CIGRE, rapport 33-09, 1978.
- [17] **He Pei-Zhong, Xu Cheng-Dong** "Résultats d'essais et de recherches sur des isolateurs naturellement pollués et leur application à la conception de l'isolation d'un réseau en régions polluées" CIGRE, Rapport 33-07, 1982.
- [18] **E.El-Sharkawi, M.Amad, H.Said, M.Morsi**, "reappraisal of pollution severity of overhead transmission lines insulators using the highest leakage current pulses" 4^e international symposium on high voltage engineering", Athènes, Grèce, 5-9 Septembre 1983, Rapport 46-07.
- [19] **Zhang Renyu, Zhu deheng, Guan zhicheng**, "A study on the relation between the flashover voltage and the leakage current of naturally or artificially polluted insulators" 4^e international symposium on high voltage engineering" Athènes, Grèce, 5-9 Septembre 1983, Rapport 46-01.
- [20] **Ioannis A.Stathopoulos**, "Relation between pollution flashover voltage and maximum leakage current" 7^e international symposium on high voltage engineering" Dresden, 26-30 Août 1991, Rapport 43-20.
- [21] **D.A.Swift**, "AC disc insulators : accumulation of pollution within and around the pin cavity", 7^e international symposium on high voltage engineering, rapport44-22, Dresde, Allemagne, 26-30 Août 1991.
- [22] **L.E. Zaffanella, H.M. Schneider, J.H. Dunlap**. "Performance des isolateurs pollués pour lignes CCHT", CIGRE , rapport 33-05, 1986.
- [23] **P.Claverie, Y.Porcheron** "How to choose insulators for polluted areas", IEEE Trans.PAS, vol.92,N°3, Mai-Juin 1973, p.1121-1131.
- [24] **J.Danis**, "A stochastic pollution flashover model", 4^e international symposium on high voltage engineering, rapport 46-12, Athènes, 5-9 Septembre 1983.
- [25] **M.N.Rayes, M.Zhirh**, "Investigation about flashover performance of insulators under uniform and non uniform contamination", 7^e international symposium on high voltage engineering, rapport 43-08, Dresde, Allemagne, 26-30 Août 1991.
- [26] **O.Fouathia, S.Houache**, "Approche d'un isolateur de haute tension par un modèle de laboratoire", PFE, ENP Juin 1996.

- [27] **C.Huroux, A.M.Rahal**, "Le contournement des isolateurs haute tension : approche à l'aide d'un modèle de laboratoire", RGE, Juin 1975, p.425-429.
- [28] **S.Bouazabia, T.Chikhaoui**, "Méthodes d'essais sur les isolateurs pollués dans les conditions désertiques" PFE, ENP Juin 1988.
- [29] **R.Sundarajan, R.S.Gorur**, "Dynamic arc modeling of pollution flashover of insulators under dc voltage", IEEE Trans.On Elec.Insul.Vol.28, No2, Avril 1993.
- [30] **S.Kalachnikov** "Electricité", Edition MIR, Moscou 1980.
- [31] **M.A.da Frota Mattos, P.H. Biagioni, welson Bassi**, "Electric field measurement on time domain generated by corona on insulators on distribution systems", IEEE, ISEI, Montréal, Québec, Canada, 16-19 Juin 1996, p.328-330.
- [32] **O.E. Gouda**, "Electrical discharge on the surfaces of high voltage polluted insulators", 7^e international symposium on high voltage engineering, Dresde, Allemagne, 26-30 Aout 1991, Rapport 43-03.
- [33] **G.Leroy,C.gary** "Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions" Eyrolles, Paris, 1984
- [34] **Groupe d'Action 33-04-03** "Dispositifs de surveillance des isolateurs soumis à la pollution", Electra, N° 152, Février 1994, p.78-90.
- [35] **A.Cimador, S.Vitet**, " La pollution des isolateurs ", EDF-Epure No 27-Juillet 1990
- [36] **C.H.A.Ely, P.J.Lambeth, J.S.T. Looms, D.A.Swift, C.E.G.B** "Contournement des polymères humides et pollués: l'ailette BOOSTER" CIGRE, Rapport 15-02, 1978.
- [37] **I.Yu. Gutman, V.R.Kinesky, V.Z.Trifonov, L.L.Vladmirsky, Yu. N. Yashin**
 "Tenue diélectrique de l'isolation EHT polluée ", CIGRE, Rapport 33-08, 1988.
- [38] **W. Heise, G.F. Luxa, G. Revery, M.P. Verma**, " Estimation de la méthode d'essai sous pollution artificielle par couche solide.", CIGRE, Rapport 33-09 1972.
- [39] **R. Bosignoli, E. Gomes Jr** "Pollution test under natural wetting conditions" 7^e International symposium on high voltage engineering, Dresde, Allemagne, 26-30 Août 1991, rapport 44-12.
- [40] **CEI 60-1**, "Techniques des essais à haute tension", Définitions et prescriptions générales relatives aux essais, deuxième édition 1989-11.
- [41] **R. Kostaluk, W. Czaplak , R. Kucharski** "Mesures de pollution, Essais d'isolateurs pollués, choix des Isolateurs" ,CIGRE, rapport 33-07, 1978.
- [42] **M. Farzaneh, X. Chen, J. Zhang** " The influence of applied voltage on the surface of atmospheric ice deposited on insulating surfaces" , IEEE, ISEI, Montréal, Québec, Canada, 16-19 juin 1996.
- [43] **Masoud Farzaneh**, "Effects of the thickness of ice and voltage polarity on flashover voltage of ice-covered high-voltage insulators", 7^e international symposium on high voltage engineering, rapport43-10, Dresde, Allemagne, 26-30 Août 1991.

- [44] **Zhang Renyu, Zhu Deheng, Zhang Bingyuan**, "The effect of arc bridging between sheds on the flashover performance of polluted stab type support insulators", 4^e international symposium on high voltage engineering, rapport 46-05, Athènes, 5-9 Septembre 1983.
- [45] **A.Boubakeur, M.E Zaim**, "Pollution des isolateurs de haute tension dans les conditions sahariennes", PFE, ENP Juin 1975.
- [46] **Y.C.Cui, Z.L.Wang, Y.Qiu** "Performance of the suspension insulator with a discontinuous semiconducting glaze", 7^e international symposium on high voltage engineering, rapport 44-06, Dresde, Allemagne, 26-30 Août 1991.
- [47] **M. Otsubo, Y. Shimono, T. Hikami, C. Honda**, "Influence of the humidity of leakage current under accelerated aging of polymer insulating materials", IEEE, ISEI, Montréal, Québec, Canada, 16-19 Juin 1996.
- [48] **J.G. Wankowicz, Z. Pohl** "Influence of high voltage insulator position on pollution flashover voltage", 9^e international symposium on high voltage engineering, rapport 3219, Autriche, 28 Août -1^e Septembre 1995.
- [49] **H.H.Woodson, A.J. Mc Elroy**, "Insulators with contaminated surface, Part II, Modeling of discharge mechanisms", IEEE, Trans.PAS, Vol.89, No8, Nov-Dec 1970, p.1858-1867.
- [50] **L.L.Alston, S.Zoledziowski**, "Growth of discharges on polluted insulators" IEEE, Trans.PAS, Vol.110, No7, Juillet 1963, p.1260-1266.
- [51] **J.P.Holtzhausen**, "the relationship between the parameters affecting the Acpollution performance of a cylindrical insulator", 9^e international symposium on high voltage engineering, rapport 3233, Autriche, 28 Août -1^e Septembre 1995.
- [52] **R.Wilkins**, "Flashover voltage of high voltage insulators with uniform surface pollution films", Proc. IEE, 116, No3, Mars 1969, p.457-465.
- [53] **R.Tamarante, A.Tair**, "Mesure de courant de fuite sur les diélectriques pollués", PFE, ENP juin 1993.
- [54] **A.Laoufi, S.Randi**, "Corrélation entre modèle continu et discontinu d'un isolateur pollué", PFE, ENP Juin 1995.
- [55] **M.T.Fellah, M.Dribine**, "Etude de l'influence de l'épaisseur de la couche polluante sur le contournement des isolateurs pollués". PFE, ENP Juin 1996.
- [56] **S.Helis, A.Meddour**, "Etude du contournement d'un isolateur pollué", PFE, ENP Septembre 1996.
- [57] **F.Obenaus**, "Fremdschichtüberschlag und Kriechweglänge", Deutsche Elektrotechnik, vol.4,1958, p.135-136.
- [58] **G.Neumärker**, "Verschmutzungszustand und Kriechweg", Monatsber. d. Deut. Akad. Wiss., Berlin, vol.1,1959, p.352-359.
- [59] **B.F.Hampton**, "Flashover mechanism of pollution", Proc.IEE, vol.11, N^o5, Juillet 1964, p.985-990.
- [60] **S.Hesketh**, "General criterion for the prédiction of pollution flashover", Proc.IEE, vol.114, N^o 4, Avril 1967, p.531-532.
- [61] **R.Wilkins, A.A.J.AI-Baghdadi**, "Arc propagation along an electrolyte surface", Proc.IEE, vol.118, N^o 12, Décembre 1971, p.1886-1892.

- [62] **H.Boehme, F.Obenaus**, "Essais de contournement sur des isolateurs pollués en laboratoire et en lieu de service du point de vue de la conception d'un modèle d'amorçage par courant rampant", CIGRE 1966, rapport 407.
- [63] **A.S.Maikopar**, "The open small current arc", *Elektrichestvo*, N° 2, 1965, p.22-25.
- [64] **F.A.M.Rizk**, "Analysis of dielectric recovery with référence to dry zone arc on polluted insulators", IEEE conf. Paper, N°71 C 134 PWR, Winter Power Meeting, New York, Janvier-Fevrier 1971.
- [65] **J.J.Hurley, G.J.Limbourn**, "Correlation of service performances of insulators and lightning arresters under polluted conditions with test results with a view to examining the validity of present criteria for insulator selection and testing", CIGRE SC.33, Septembre 1969.
- [66] **F.A.M.Rizk**, "modèles mathématiques du contournement des isolateurs sous pollution", *Electra* N°78 Octobre 1981, p.71-103.
- [67] **R.Moumeni, A.Bahous**, "Modélisation dynamique de l'arc électrique sur des isolateurs pollués de haute tension", PFE, ENP Septembre 1996.
- [68] **A.Al-Baghdadi**, "The méchanism of flashover of polluted insulation", Ph.D. Dissertation, The victoria university of manchester, May 1970.
- [69] **T.C.Cheng, C.T.Wu, A.Rodriguez-Penz**, "Contamination flashover of HVDC insulators", Table 3-13, final report, prepared for electric power research institute (EPRI), EL-2016, Aug. 1981.
- [70] **I.Kimoto, T.Fujimura, K.Naito**, "Performance of insulators for direct current transmission line under polluted condition", IEEE, Trans.PAS, Vol.92,
- [71] **A.Mekhaldi, S.Bouazabia**, "Condition phénomène on polluted insulating surface under AC high voltages", 9^e international symposium on high voltage engineering, rapport 3174, Autriche, 28 Août -1^e Septembre 1995.
- [72] **P.Margrain**, "Aide-Mémoire d'électrotechnique appliquée", Editions Dunod, Paris, 2^e trimestre 1979.
- [73] **K.Küpfmuller**, "Electricité théorique et appliquée", Dunod, Paris, 1959.
- [74] **F.A.M.Rizk, S.I.Kamel**, "Modelling of HVDC wall bushing flashover in non-uniform rain" IEEE trans on power delivery, vol 6, No4, Octobre 1991, p.1650-1662
- [75] **A.Roth**, "Hochspannungstechnik", Springer Verlag, Berlin, 1965.
- [76] **G.Gallet, G.Leroy, R.Lacey, I.Kromer**, "General expression for positive switching impulse strength valid up to extra long air gaps", IEEE transactions on power Apparatus and systems, vol.PAS94, N°5,1975.

Annexe : Résultats expérimentaux

N.B : Tous les courants sont exprimés en micro-Ampères

a- Essais préliminaires

• plaque propre (courant de fuite-temps)

t(s)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
I 10k	34	34	34	34	35	36	34	34	36	36	36	36	33
I 16k	65	60	60	60	65	65	60	55	60	60	65	60	60
I 30k	105	120	100	100	100	100	100	100	95	95	100	100	100
I 42k	130	130	130	130	140	140	135	140	135	120	125	120	130

• couche pleine (courant de fuite-temps) à 26 μ S/cm

t(s)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
I 7,5k	190	200	200	200	170	180	180	190	190	200	180	200	190
I 21 k	400	400	425	400	400	425	450	400	425	425	400	400	400
I 40 k	750	750	725	700	725	675	650	700	675	700	650	675	675

b- Résultats expérimentaux

• courants de fuite-largeur pollution

Conductivité 26 μ S/cm

y(cm)	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
I 12kV	40	40	40	40	40.5	42.5	45	50	55	60	140
I 15kV	50	52	52	53	55	60	60	70	80	90	270
I 21kV	70	70	70	80	85	85	90	100	120	140	
I 24kV	80	85	85	90	90	105	110	115	140	160	530
I 30kV	100	110	110	110	115	120	130	140	155	180	460
I 36kV	120	120	120	130	140	140	145	150	230	385	600

y'(cm)	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
I'12kV	40	40	40	44	45	50	50	55	65	70	320
I'15kV	50	52	54	60	62	64	66	70	75	90	390
I'21kV	70	70	70	75	80	80	85	90	95	120	640
I'24kV	80	80	80	85	90	90	95	100	110	140	
I'30kV	100	100	100	110	110	110	120	140	155	400	
I'36kV	120	130	135	145	145	160	170	190	220	745	1770

Conductivité 50 μ S/cm

y(cm)	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
I 12kV	40	42	44	46	54	59	59	69	79	94	400
I 18kV	60	60	65	65	65	70	75	85	100	125	300
I 21kV	70	70	75	75	80	85	95	105	120	140	370
I 24kV	80	85	90	95	100	105	110	120	145	165	535
I 30kV	100	105	110	110	110	130	130	145	145	185	1445
I 33kV	110	110	120	130	130	143	148	150	200	390	3750
I 36kV	120	120	125	130	130	140	170	175	210	2030	5000

y'(cm)	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
I'12kV	40	44	44	46	50	52	61	66	71	86	376
I'18kV	60	65	70	70	70	70	75	75	90	115	300
I'21kV	70	75	80	85	85	90	90	95	100	110	520
I'24kV	80	80	85	90	95	95	105	105	110	130	530
I'30kV	100	105	110	115	135	145	155	170	195	245	2545
I'33kV	110	110	110	110	120	125	125	150	200	1750	3150
I'36kV	120	130	135	145	160	170	185	225	365	2525	

Conductivité 500 μ S/cm

y(cm)	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36
I 12kV	40	45	41	43	43	53	58	63	78	88
I 18kV	60	60	60	62.5	62.5	65	70	80	90	115
I 24kV	80	90	90	100	100	110	110		140	240
I 30kV	100	100	100	105	125			140	195	3500
I 36kV	120	120	125	135	140	150	160	180	250	

y'(cm)	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36
I'12kV	40	46	50		60	60	60	70	75	90
I'18kV	60	60	65	75	80	82	82	90	100	110
I'24kV	80	85	85	85	90	95	100	120	165	170
I'30kV	100	105	115	120	140	160	190	210	330	
I'36kV	120	130	140	150	165	210	220	280	470	

Conductivité 2000 μ S/cm

y(cm)	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36
I 12kV	40	40	40	45	45	45	55	70	85	105
I 18kV	60	62.5	65	70	75	80	90	110	125	150
I 24kV	80	85	85	95	100	105	115	135	145	
I 30kV	100	100	110	105	115	130	135	150	185	
I 36kV	120	130	140	140	160	170	180	250		

y'(cm)	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36
I'12kV	40	40	40	47.5	47.5	55	85	125	160	185
I'18kV	60	70	75	85	90	110	125	160	220	300
I'24kV	80	85	95	105	115	145		200	240	
I'30kV	100	105	115	130	145	170	200	240	320	
I'36kV	120	130	150	170	190	230	260	340		

- tensions de contournement-largeur pollution

conductivité 50 μ S/cm

y(cm)	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
Uc(kV)	146.5	140	123	113.5	104	102	92.5	70.4	65	57	66

y'(cm)	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
Uc(kV)	146.5	138	117.5	120	110	110	87.25	72	62	59.6	66

conductivité 2000 μ S/cm

y(cm)	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
Uc(kV)	146.5	120	114	106	94	80.25	65.4	50.8			

y'(cm)	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
Uc(kV)	146.5	127	115.5	104.5	87.4	74	59.25	49			

- tension d'entretien d'arc-longueur d'arc**

conductivité 50 μ S/cm

x=x'(cm)	1	2	3	4	5	6	7	8
Uax'(kV)	21.5	23.5	29.5	38	41	42.5	43.5	51.5
Uax(kV)	17.5	23.5	27.5	36.5	38	40.5	44	49

conductivité 500 μ S/cm

x=x'(cm)	2	3	4	5	6	7
Uax'(kV)	18		29	33	34	38
Uax(kV)	16	22	27	31	35	39

conductivité 2000 μ S/cm

x=x'(cm)	2	3	4	5	6	7
Uax'(kV)	12	15	22		27	33
Uax(kV)	17	20	24	30	34	

c-Essais complémentaires

- plaque propre (caractéristique tension-courant)**

Trois caractéristiques sont présentées

U(kV)	10	13	17	19	23	27	30	34	38	41	44.5	46
I(μ A)	35	45	65	70	75	95	100	120	125	135	150	160

U(kV)	10	14	19	23	27	34	37.5	41	45	48	52.5
I(μ A)	24	38	65	70	85	110	120	125	150	160	170

U(kV)	10	14	19	23	30	33.5	37	41	45	49	52
I(μ A)	30	45	70	75	90	115	130	135	150	165	175

• Couche pleine (caractéristique tension-courant) à 26 $\mu\text{S}/\text{cm}$

deux caractéristiques extrêmes sont présentées :

U(kV)	5	9	12	18	22	28	32
I(μA)	45	85	120	180	230	300	350

U(kV)	12	15	21
I(μA)	320	390	640

• Essais sur l'aluminium

U=12 kV

y, y' cm	4	8	12	16	20	24	28	32	36
I(y)	44		40	44		50	52.5	64	77.5
I(y')	41.5		49		66	72.5	72.5	80	90

U=24 kV

y, y' cm	0	4	8	12	16	20	24	28	32
I(y)	80	80	75	90	90	95	100	105	130
I(y')	80	80	90	110	110	115	145	150	170

U=30 kV

y, y' cm	0	4	8	12	16	20	24	28	32
I(y)	100	100	95	107.5	115	120	120	135	155
I(y')	100	100	105	130	145		175	175	215