

T0153
1991/10



THESE

présentée par

JEROME VIARD

POUR OBTENIR LE TITRE DE DOCTEUR

DE L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER GRENOBLE I

(ARRETE MINISTERIEL DU 5 JUILLET 1984)

Contribution à l'étude de l'incidence des arborescences d'eau sur la tenue
diélectrique du polyéthylène.

Soutenue le 15 Mars 1991 devant la commission d'examen

PRESIDENT

M. RENARD

EXAMINATEURS

J. LAJZEROWICZ

C. LAURENT

Y. POGGI

RAPPORTEUR

J.F. LEGRAND

Thèse préparée au laboratoire d'Electrostatique et de Matériaux diélectriques
du CNRS de GRENOBLE, Laboratoire associé à l'Université Joseph Fourier.

Ce travail a été réalisé au Laboratoire d'Electrostatique et de Matériaux Diélectriques. Je remercie l'ensemble du personnel du laboratoire qui m'y a accueilli pendant trois ans.

Monsieur Y. Poggi avait la responsabilité de diriger ce travail, je le remercie pour la confiance qu'il m'a témoignée au cours du déroulement de cette étude et pour ses suggestions à l'occasion de la rédaction du mémoire.

Je remercie M. J.C. Filipini pour m'avoir proposé un sujet et un emploi pendant une partie importante de la durée de cette étude. Je remercie également la Société B.P. Chemicals qui l'a financée en grande partie.

M. M. Renard a bien voulu présider la commission d'examen et MM J. Lazjerowicz et C. Laurent ont bien voulu y participer, je les en remercie.

Je remercie M. J.F. Legrand d'avoir accepté d'être le rapporteur de ce travail, bien qu'il fût empêché d'assister à la soutenance.

Je remercie M.C. Laurent pour l'intérêt qu'il a manifesté dès le début à ce travail, pour ses suggestions et les nombreux échanges et conversations scientifiques qu'il a suscités, et également d'avoir été le rapporteur de ce travail.

Je remercie M. G. Lulier pour sa collaboration sous diverses formes à ce travail, qui n'aurait pas été possible sans l'ingéniosité, l'efficacité, la disponibilité de M.R. Riva auquel j'exprime toute ma reconnaissance.

Enfin je remercie tous mes amis, ceux qui m'ont apporté leur estime, leurs encouragements, leurs conseils. Parmi eux je remercie en particulier C. Brosseau pour ses conseils aussi bien scientifiques qu'amicaux.

Pour conclure il me reste à remercier celle qui a supporté pendant plusieurs années sans contrepartie les conséquences de l'investissement exigé par ce travail et sans la confiance et la générosité de laquelle ce travail n'aurait pu être mené à son terme.

INTRODUCTION

1. POSITION DU PROBLEME.

L'utilisation du polyéthylène comme isolant des câbles haute tension a aussitôt suscité de grands espoirs chez les professionnels du transport de l'énergie électrique, en raison des excellentes propriétés diélectriques du matériau.

Toutefois avec le recul du temps il est apparu que des incidents affectaient les câbles au polyéthylène au cours de leur utilisation, nécessitant leur remplacement et réduisant sensiblement leur durée de vie attendue.

Ce constat apparaissait difficilement compréhensible en raison des espoirs précédents. Par ailleurs, au début des années 1970, J. H. LAWSON attira l'attention sur la présence dans l'isolation des câbles haute tension de régions plus opaques que le reste du matériau, contenant de l'eau et désignées sous le nom d'arborescences d'eau[1].

Les arborescences d'eau furent naturellement aussitôt suspectées d'être à l'origine de la rupture prématurée et inexplicée des câbles. Aussi dès sa manifestation le phénomène suscita de nombreux travaux expérimentaux fortement encouragés par le milieu industriel.

Ces recherches s'orientèrent principalement dans deux directions:

Les unes eurent pour objectif de tester expérimentalement la validité de l'hypothèse de la nocivité des arborescences d'eau pour les câbles. Les difficultés rencontrées pour atteindre cet objectif précédent illustrent le fait que la notion même d'arborescence d'eau n'était pas aussi claire qu'elle le paraissait de prime abord. Plusieurs questions se posaient: qu'est-ce-qu'une arborescence d'eau? Comment affecte-t-elle le milieu diélectrique? Est-elle un milieu continu ou discontinu?

D'autres recherches eurent pour objectif l'étude du phénomène de l'arborescence d'eau en elle-même, sa cinétique de croissance ou les propriétés physico-chimiques de l'arborescence à un certain stade de son développement. Ces questions ont fait l'objet de nombreux travaux réalisés au laboratoire. Les

résultats obtenus fournissent des réponses aux questions précédentes sur la caractérisation de l'arborescence d'eau.

Le problème que nous abordons se situe donc dans la continuité d'un travail fondamental entrepris au laboratoire. Il constitue cependant une nouvelle étape, qui consiste à revenir à la question initiale, à l'origine des études précédentes: quel est l'effet de l'arborescence d'eau sur la tenue diélectrique de l'isolant? Cette question a désormais plus de chances de recevoir une réponse satisfaisante dans la mesure où le détour constitué par l'étude du phénomène de l'arborescence d'eau en elle-même, a permis de mieux cerner l'un des éléments du problème.

L'examen détaillé de la littérature et des questions qu'elle pose fera l'objet d'un premier chapitre.

2. NOTRE APPROCHE DU PROBLEME.

Elle tient en trois considérations:

1-La difficulté à décider si les arborescences d'eau sont nocives ou non pour les câbles montre que ce problème n'admet pas de réponse simple et sans détour.

Cela nous conduit à mettre en question la convergence des résultats expérimentaux selon laquelle: "les arborescences d'eau affaiblissent (dans tous les cas) la tenue diélectrique de l'isolation". Une première partie de notre étude expérimentale consiste donc à examiner, au moyen de tests de tenue diélectrique, réalisés en géométrie pointe-plan (géométrie utilisée jusqu'à présent au laboratoire), si la proposition précédente est fondée ou non, et à proposer une interprétation du résultat.

Ce point fera l'objet du chapitre trois, le chapitre deux étant consacré à la description des dispositifs expérimentaux, des méthodes de mesure, des techniques de fabrication des échantillons.

2-Ce premier travail débouche sur un constat: l'arborescence d'eau accroît dans certains cas la tenue diélectrique d'un échantillon en configuration: pointe (conductrice)-polyéthylène-plan (conducteur).

Ce résultat conduit à son tour à une nouvelle question: l'arborescence d'eau accroît-elle ou laisse-t-elle inchangée la tenue diélectrique dans tous les cas? Ou bien peut-on imaginer une autre configuration expérimentale dans laquelle l'arborescence d'eau diminuerait la tenue diélectrique? Cette interrogation

débouche sur la mise en oeuvre d'une nouveau dispositif pointe d'eau-polyéthylène-pointe métallique.

Cette deuxième partie de notre étude expérimentale se conclut par un deuxième constat: dans cette nouvelle configuration, l'arborescence d'eau diminue la tenue diélectrique.

Ce point fait l'objet du chapitre quatre.

3-Les données précédentes peuvent toutes d'eux s'interpréter par une modification de la répartition du champ électrique inter-électrode.

Cette interprétation conduit à la question suivante: quelle relation pouvons-nous établir entre les paramètres caractéristiques de l'arborescence d'eau et la perturbation du champ électrique? Est-il possible de prédire la valeur du renforcement de champ à partir de ces paramètres?

Ce point fait l'objet du chapitre cinq.

REFERENCE

- [1] J. H. LAWSON, Conference Record IEEE-PES Insulate Conductor Comittee; 49th Meeting, Miami, FLorida 1971, p. Vd.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

CHAPITRE PREMIER

INTRODUCTION

1.LE DEBAT D'OPINION SUR LA NOCIVITE DES ARBORESCENCES D'EAU POUR LA FIABILITE DES CABLES EN SERVICE.

1.1. L'existence d'une controverse.

1.2.L'origine de la controverse et les diverses argumentations en présence.

1.2.1.Mesures de rigidité diélectrique et leur interprétation.

1.2.2.Mesures de durée de vie et de fiabilité des câbles.

1.2.3.Comparaison des résultats des tests de tenue diélectrique et de durée de vie.

1.3.L'établissement d'un consensus temporaire sur la nocivité des arborescences d'eau.

2.L'EAU SOUS FORME D'ARBORESCENCE ET L'EAU REPARTIE EN VOLUME.

2.1.Propriétés structurelles de l'eau dans les arborescences.

2.1.1.L'eau est présente dans des cavités.

2.1.2.De nombreux travaux suggèrent fortement que les cavités ne sont pas connectées.

2.1.3.Selon plusieurs auteurs l'eau dans l'arborescence est plus liée qu'en volume.

2.2. Les concentrations respectives de l'eau dans l'arborescence et de l'eau répartie dans la totalité du matériau.

2.2.1. La quantité d'eau présente en volume dans les câbles varie considérablement suivant le type de matériau et pour le polyéthylène réticulé suivant le procédé de réticulation.

2.2.2. Concentrations maximales respectives de l'eau dans les arborescences et en dehors des arborescences .

3. LES PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES DES ARBORESCENCES D'EAU COMPAREES A CELLES DU DIELECTRIQUE SATURE EN EAU.

3.1. Les propriétés électriques du polyéthylène en environnement humide sans arborescences d'eau.

3.1.1. L'effet de l'eau sur la tenue diélectrique du polyéthylène.

3.1.2. L'effet de l'eau sur la conductivité du polyéthylène.

3.2. Les propriétés électriques des arborescences d'eau.

3.2.1. La conductivité des arborescences d'eau.

3.2.2. La tenue diélectrique des arborescences d'eau.

3.2.3. La polarisabilité des arborescences d'eau.

CONCLUSION.

CHAPITRE DEUX

INTRODUCTION.

1. LES AVANTAGES DE L'EMPLOI DE L'AIGUILLE D'EAU ET DE MODELES DE LABORATOIRE SUR L'UTILISATION DE SECTIONS DE CABLES IMMERGEES.

1.1. Rappel sur les deux techniques de production des arborescences.

1.2. L'aiguille d'eau permet de produire des arborescences d'eau sans que le reste du matériau ne soit saturé en eau.

1.3.L'utilisation de modèles de laboratoire permet de contrôler le champ électrique et d'obtenir des situations expérimentales reproductibles.

1.4.L'emploi de modèle de laboratoire n'interdit pas de simuler les situations effectives rencontrées dans les câbles.

2.LE MATERIAU UTILISE DANS LA FABRICATION DES ECHANTILLONS.

3.EXPERIMENTATION EN CONFIGURATION POINTE-PLAN.

3.1.La fabrication des éprouvettes de polyéthylène.

3.2.L'obtention des arborescences.

3.3.Le test de rigidité diélectrique.

4.ECHANTILLONS DE GEOMETRIE POINTE-POINTE.

4.1.La fabrication des éprouvettes comportant une pointe métallique.

4.1.1.La réalisation de ces éprouvettes pose un problème nouveau.

4.1.2.La solution finalement retenue.

4.2.L'obtention des arborescences.

4.3.Les tests de rigidité diélectrique.

4.3.1. Mesure de la tension de rupture.

4.3.2. Mesure de la tension d'obtention d'une arborescence électrique.

CHAPITRE TROIS

1.PROBLEMATIQUE.

2.LA PROCEDURE EXPERIMENTALE.

3.LE MODE DE PRESENTATION DES RESULTATS.

4.PRESENTATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX.

4.1.Essais de tenue diélectrique effectués sur des éprouvettes sans arborescence d'eau.

4.2.Résultats du test de tenue diélectrique réalisé sur 46 éprouvettes contenant des arborescences d'eau.

4.3.Comparaison des résultats de tenue diélectrique obtenus avec arborescences d'eau aux résultats de référence.

4.4.Incidence de la longueur des arborescences d'eau sur la tenue diélectrique.

4.4.1.Présentation globale des résultats en fonction de la longueur:

4.4.2.Classement des éprouvettes selon les longueurs d'arborescence:

5. DISCUSSIONS DES RESULTATS PRECEDENTS

6. TENTATIVE D'INTERPRETATION DES RESULTATS PRECEDENTS.

6.1.L'analogie entre l'effet de l'eau et celui des arborescences d'eau sur la tenue diélectrique en champ divergent.

6.2. L'origine de la diminution du champ électrique n'est pas la même dans les deux cas.

6.3.Evaluation de la réduction du champ sur la pointe induite par l'arborescence d'eau.

6.3.1.Les données expérimentales disponibles.

6.3.2. Deux modélisations de l'arborescence.

6.4.Les conséquences de l'atténuation du champ

6.4.1. Valeurs comparées du champ sur la pointe et sur le plan en l'absence d'arborescence d'eau.

6.4.2. Valeurs comparées du champ sur la pointe et sur le plan en l'absence d'arborescence d'eau.

CONCLUSION.

CHAPITRE QUATRE.

1. INTRODUCTION.

1.1. Le renforcement du champ en configuration pointe-pointe.

1.2. Ordre de grandeur du renforcement de champ attendu.

2. LA PROCEDURE EXPERIMENTALE.

2.1. Le choix du rayon de courbure de la pointe métallique.

2.2. L'obtention des arborescences d'eau avec des pointes de $3,5\mu\text{m}$ de courbure.

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

3.1. Résultats expérimentaux obtenus avec des électrodes d'un rayon de courbure de $3,5\mu\text{m}$.

3.1.1. Mesures de référence.

3.1.2. Mesures de la tension de rupture d'éprouvettes contenant des arborescences.

3.1.3. Comparaison des tensions de rupture des éprouvettes contenant des arborescences aux tensions de référence.

3.2. Résultats obtenus avec des électrodes de $6\mu\text{m}$ de rayon de courbure.

3.2.1.Mesures de référence.

3.2.2.Mesures de la tension de rupture d'éprouvettes contenant des arborescences.

3.2.3.Comparaison des tensions de rupture des éprouvettes contenant des arborescences aux tensions de référence.

3.3.Comparaison des arborescences électriques, obtenues avec ou sans arborescences d'eau.

3.3.1.L'aspect des arborescences électriques.

3.3.2.La cinétique de propagation de l'arborescence électrique.

4. DISCUSSION DES RESULTATS.

4.1.Signification de la forme de l'arborescence électrique.

4.2.Relation entre la cinétique de l'arborescence électrique et la tension appliquée.

4.3. Conclusion.

5.DEUXIEME TENTATIVE DE VERIFICATION EXPERIMENTALE DE L'HYPOTHESE D'UN ACCROISSEMENT DU CHAMP ELECTRIQUE.

5.1.Mesures de référence

5.2..Epruvettes contenant une arborescence d'eau.

5.3.Comparaison des résultats avec arborescence d'eau aux valeurs de référence.

6. INTERPRETATION DES RESULTATS.

7.CONCLUSION

CHAPITRE CINQ.

INTRODUCTION.

1. INVENTAIRE DES PARAMETRES CARACTERISANT LES PROPRIETES DIELECTRIQUES D'UNE ARBORESCENCE D'EAU, ETUDE EXPERIMENTALE DE L'INCIDENCE D'UN DE CES PARAMETRES, LA DENSITE D'EAU, SUR CES PROPRIETES.

1.1. Effet de la longueur de l'arborescence d'eau sur la valeur du champ sur la deuxième électrode.

1.2. Le paramètre géométrique ne permet pas à lui seul de caractériser les propriétés diélectriques de l'arborescence d'eau.

1.2.1. Tensions voisines obtenues pour des longueurs différentes.

1.2.2. Tensions différentes obtenues pour des longueurs voisines.

1.3. Outre la longueur, la permittivité de l'arborescence d'eau détermine le renforcement du champ à l'extérieur de l'arborescence.

1.4. Mesure de la concentration en eau dans l'arborescence.

1.4.1. La transmittance est facilement mesurable; elle permet aussi d'accéder à la concentration en eau.

1.4.2. Mise en oeuvre pratique d'une mesure de transmittance.

1.5. Vérification expérimentale de la validité du nouveau critère.

1.5.1. Difficulté à produire des arborescences d'eau de longueurs égales.

1.5.2. Présentation globale des résultats bruts.

1.5.3. Répartitions des arborescences en trois classes de transmittance.

2. MODELISATION DE L'INFLUENCE DE L'ARBORESCENCE D'EAU SUR LE RENFORCEMENT DU CHAMP ELECTRIQUE.

2.1. Valeurs du champ et du potentiel entre 2 pointes, en milieu homogène.

2.2.Première modélisation de l'arborescence d'eau et du renforcement de champ apporté; l'arborescence est supposée homogène.

2.2.1.Hypothèses de modélisation.

2.2.2.Conséquences de la deuxième hypothèse.

2.2.3.Comparaison des résultats fournis par le modèle aux résultats expérimentaux et conclusion.

2.3.Un nouveau modèle de l'arborescence d'eau, considérée comme un milieu hétérogène.

2.3.1.Enoncé et justification des hypothèses du modèle.

2.3.2.Mise en oeuvre pratique des hypothèses précédentes.

2.3.3.Calcul de la permittivité en fonction de la teneur en eau.

2.3.4.Valeur de la concentration maximale à la pointe d'eau.

2.3.5.Valeurs des permittivités relatives et concentration moyenne pour $C_0 = 0,68$.

2.3.6.Une nouvelle modélisation de la distribution des potentiels dans l'espace inter-électrode avec une arborescence hétérogène.

2.3.7.Comparaison des résultats fournis par le modèle aux résultats expérimentaux.

Conclusion.

3.INCIDENCE DE LA FRACTION D'ESPACE INTER-ELECTRODE OCCUPEE PAR L'ARBORESCENCE D'EAU SUR LE RENFORCEMENT DE CHAMP.

Introduction.

3.1.Première classe, $L/d \approx 35\%$, arborescences de petites dimensions.

3.1.1.Une difficulté expérimentale.

3.1.2. Caractéristiques de la classe d'arborescences obtenues à 65°C .

3.2.Deuxième classe d'arborescences, $L/d \approx 70\%$

3.3.Comparaison des résultats obtenus pour les deux premières classes.

3.3.1. Comparaison de C°1 et C°2, concentration en eau à la pointe des deux premières classes de L/d.

3.3.2. Comparaison des valeurs de tensions obtenues pour les deux premières classes de L/d.

3.4. Troisième classe d'arborescences, L/d = 90%.

3.5. Relation entre répartition de l'eau et topologie du champ électrique dans les trois classes d'arborescences d'eau, pendant leur croissance.

3.5.1. Il existe une relation entre densité d'eau et amplitude du champ électrique pendant la croissance de l'arborescence.

3.5.2. L'extrapolation de la répartition de l'eau en géométrie pointe-plan au cas de la géométrie pointe-pointe et ses conséquences.

3.5.3. Configuration spatiale du champ électrique local au sein de l'arborescence d'eau et son incidence sur la densité d'eau, pour les 3 classes de L/d.

3.5.4. Deux arguments expérimentaux.

CONCLUSION.

CONCLUSION GENERALE

ANNEXE

CHAPITRE PREMIER

ETUDE CRITIQUE DE LA LITTERATURE.

b-Les principaux résultats:

Les expérimentateurs concluent unanimement à l'abaissement de la tenue diélectrique de l'isolant du fait des arborescences d'eau qu'il contient [4 à 12].

Certains auteurs sont plus précis et tentent d'établir une relation entre la décroissance de la tenue diélectrique et des caractéristiques des arborescences d'eau, comme la longueur ou le nombre d'arborescences par mm^3 . D'après leurs conclusions, la longueur des arborescences a une incidence plus importante que leur densité sur la tenue diélectrique. Ils constatent, par exemple, « Que la tension de rupture est fortement reliée à la longueur maximum des arborescences... » [6] .

D'autres auteurs [12] considèrent le contexte plus large de la pénétration de l'eau dans le matériau, cette eau pouvant être présente ou non sous forme d'arborescence. Ils constatent une première diminution de la tenue diélectrique, de 33%, intervenant très rapidement alors que les arborescences n'ont pas eu le temps de se développer. « Cette chute initiale de tenue diélectrique est partiellement due à une quantité significative d'humidité dans l'isolation. » [12]. Aucune indication n'est fournie sur la manière dont cette humidité abaisse la tenue diélectrique. Cette première phase est suivie d'une décroissance plus lente de la tenue diélectrique, « due à un accroissement de la dimension et de la densité des arborescences. » [12]. L'idée est que les arborescences sont conductrices: « Les structures remplies d'eau agissent comme des contaminants conducteurs à travers l'isolation... » [12].

c-Remarques sur la procédure expérimentale, le choix des paramètres caractéristiques des arborescences et des facteurs retenus pour la rupture:

-La procédure utilisée (immersion des échantillons) ou mise en contact avec un réservoir de grande dimension, ne permet pas de distinguer l'incidence de deux facteurs pouvant abaisser la tenue diélectrique du matériau à savoir: les arborescences d'eau et l'eau diffuse présente dans tout le volume du matériau.

Le protocole, utilisé parfois, consistant à procéder en deux étapes: immersion du matériau sans application de la tension, test de tenue diélectrique puis application de la tension et nouvelles mesures de tenue diélectrique ne permet pas vraiment de séparer les deux facteurs précédents. Ce protocole suppose en effet qu'à partir du moment où une tension est appliquée, l'eau qui pénètre dans le matériau va nécessairement prendre la forme d'arborescences. Mais rien

ne garantit la validité de cette hypothèse. Plusieurs auteurs ont rapporté en effet, que, lorsque l'eau contient des ions, une tension continue [13] et même une tension alternative [14] pouvait contribuer à faire pénétrer de l'eau dans le polyéthylène, sans qu'il y ait formation d'arborescence d'eau. Par suite rien ne prouve, que même après vieillissement sous tension, la rupture soit due aux arborescences d'eau et non pas à l'eau diffuse .

En conclusion, la procédure de l'immersion permet seulement de constater la présence simultanée d'arborescences d'eau et d'une diminution de tenue diélectrique. Elle ne permet pas de conclure que ces arborescences d'eau sont à l'origine de la diminution de la tenue diélectrique. Cette diminution , en effet, peut aussi bien être due à l'eau diffuse. Ce dernier point de vue a été exprimé récemment par S. PELISSOU [15].

-Un seul paramètre significatif conditionnant la rupture diélectrique est retenu: la longueur de l'arborescence. Son incidence semble bien établie : A.BULINSKI et R.DENSLEY [7] établissent même l'existence de deux seuils de longueurs à partir desquels la tension de rupture chute brusquement.

Mais rien ne dit que ce paramètre soit le seul, ni qu'il ne soit corrélé à un autre paramètre plus significatif encore quoique moins facilement identifiable comme la densité en eau des arborescences. Très concrètement, cela signifie que la longueur seule, ne permettrait pas de comparer les arborescences produites expérimentalement à celles retrouvées dans les câbles en service. Rien ne dit qu'à longueur égale des arborescences aient les mêmes propriétés diélectriques. Cette dernière remarque interdit donc de transférer les conclusions tirées de l'expérimentation précédente au fonctionnement des câbles en service.

-Enfin cette expérimentation ne prend pas en compte explicitement un facteur important pour le claquage: les défauts de l'isolation tels que les inclusions métalliques, la rugosité de l'isolant, les cavités, etc... Or après un examen détaillé d'un lot de câbles ayant subi un claquage, J.MINTZ conclut que l'importance attribuée jusque là (avant ses propres observations) aux arborescences d'eau dans les claquages a été surestimée alors que celle attribuée aux défauts a été sous-estimée. Il trouve en effet dans les câbles ayant claqué moins d'arborescences d'eau qu'il ne s'y attendait et plus de défauts que ce à quoi il s'attendait [16].

On pourrait répondre que l'ignorance du facteur défaut est sans importance pourvu que ces défauts soit présents en nombre équivalents dans les câbles de référence(sans arborescence d'eau). Cela est exact, mais alors on ne saura pas si le

claquage est dû à la présence d'arborescences seules ou d'arborescences en présence d'un défaut ce qui est totalement différent. Dans ce dernier cas en effet les arborescences d'eau, en tant que telles, ne sont pas dommageables au fonctionnement des câbles. Il suffirait donc de se prémunir contre les défauts pour ne plus avoir à se préoccuper des arborescences d'eau.

d-L'interprétation des résultats des tests de tenue diélectrique.

Peu d'auteurs ont pris la peine de développer explicitement une interprétation de l'abaissement de la tenue diélectrique des câbles par les arborescences d'eau.

Cependant une idée a entraîné rapidement l'adhésion de nombreux observateurs. Selon eux les arborescences seraient constituées de canaux conducteurs [5,17,18]. Cette hypothèse du canal conducteur leur permet d'expliquer simplement à la fois la diminution de résistivité du câble et la diminution de tenue diélectrique qui lui est associée. L'idée sous-jacente est que le canal constitue le chemin de rupture: « une baisse rapide de la résistivité montre que l'arborescence a traversé la paroi isolante et que son claquage est imminent. » [5].

Toutefois l'existence de canaux de grandes dimensions, d'un diamètre de l'ordre du μm est rapidement controversée. Mais C.A. BULINSKI et R.J. DENSLEY [7] proposent alors l'hypothèse de canaux de $0,1 \mu\text{m}$ de diamètre très résistifs bien que conducteurs.

Par ailleurs, W. KALKNER et al. [11] affirment eux, avoir vu des canaux en microscopie électronique et pouvoir interpréter ainsi les «transformations d'arborescences d'eau en arborescences électriques» qu'ils ont constatées. Ces deux auteurs décrivent très précisément la manière dont selon eux les canaux conducteurs conduisent au claquage: «Les deux hypothèses de déclenchement du claquage par des arborescences d'eau reposent sur la supposition qu'il existe déjà de petits canaux creux au sein de l'arborescence d'eau qui peuvent se développer davantage et s'agrandir au cours du temps.» [11]. Ainsi grâce à l'hypothèse de l'agrandissement des canaux initiaux, l'hypothèse d'un affaiblissement de la tenue diélectrique par les arborescences d'eau devient intelligible et donc crédible.

Mais l'hypothèse des canaux a été écartée par C.A. BULINSKI et R.J. DENSLEY, eux-mêmes, un an plus tard [19] et presque unanimement abandonnée par la suite. Ceci privait ainsi de théorie et même d'un commencement d'explication le rôle éventuel joué par les arborescence d'eau dans l'abaissement

de la rigidité diélectrique. L'hypothèse de «La transformation de l'arborescence d'eau en arborescence électrique» devenait elle aussi du même coup très obscure.

1.2.2. Mesures de durée de vie et de fiabilité des câbles effectuées sur des installations ou en laboratoire .

a-Procédure.

Elle consiste à enregistrer la durée de vie de câbles en service ou de câbles vieillis de façon accélérée en laboratoire. Les différents câbles testés sont ensuite séparés en diverses classes selon qu'ils contiennent ou non des arborescences d'eau ou selon la taille et le nombre de ces arborescences. La durée de vie des différentes classes sont comparées les unes aux autres.

On enregistre aussi le nombre de défauts électriques survenus dans une installation pendant une période donnée et les origines éventuelles de ces défauts: arborescences d'eau, défauts mécaniques, etc.

Ces mesures de durée de vie sont des mesures difficiles et les valeurs obtenues dépendent fortement des conditions de test. Les valeurs en soi sont donc en principe toujours contestables. En revanche les valeurs relatives obtenues par comparaison dans des conditions expérimentales identiques ne le sont pas.

b-Résultats.

Les principaux résultats qui ressortent de la lecture de la littérature sont les suivants:

- La longueur des arborescences d'eau n'a pas d'incidence sur la durée de vie des câbles.[20,21]

- Le taux des défauts électriques qui a une origine non mécanique est très faible, comme le montre de nombreuses études statistiques réalisées en Allemagne [11]. Par suite, «Il ne faut pas dramatiser à l'excès les effets du phénomène d'arborescence d'eau sur la fiabilité des câbles.»[11]

-Les informations disponibles «suggèrent fortement que les arborescences d'eau ne sont pas nuisibles et ne réduisent pas la durée de vie des câbles.»[22]

1.2.3. Comparaison des résultats des mesures de tenue diélectrique et de durée de vie.

Les mesures de tenue diélectrique tendent à prouver que les arborescences d'eau diminuent, dans tous les cas, la tenue diélectrique des câbles. Elles devraient donc être nocives pour la fiabilité et la durée de vie des câbles haute tension.

Les observations directes sur l'origine des défaillances survenues dans les installations électriques et leur durée de fonctionnement, les tests de durée de vie en laboratoire, tendent à prouver au contraire que les arborescences d'eau ne sont pas nocives pour ces installations.

La comparaison de ces résultats débouche donc sur une contradiction.

1.3. L'établissement d'un consensus temporaire sur la nocivité des arborescences d'eau.

Pendant plusieurs années (approximativement de 1984 à 1988), dans de nombreux cas, il n'y a pas de confrontation entre les arguments que nous venons d'exposer. La contradiction précédente reste latente pour de nombreux auteurs. Et certaines publications font référence à un consensus d'opinion sur l'effet nocif des arborescences d'eau sur la fiabilité des câbles [23,25]. L'existence même de ce consensus a quelque chose de paradoxal. Il ne peut reposer sur des données expérimentales, car elles se contredisent. Il ne peut s'appuyer sur des données théoriques il n'y a pas, en effet, de théorie qui fasse vraiment l'unanimité. Il semble plutôt reposer sur un raisonnement de sens commun que l'on peut formuler ainsi:

"L'arborescence qui contient de l'eau *conductrice* constitue *nécessairement* une "dégradation" de l'isolation [26] donc elle représente un danger pour le fonctionnement des câbles. Le degré de cette dégradation est mesuré par la fraction de l'isolation qui est traversée par l'arborescence.

Cependant, dans les trois dernières années (de 1988 à 1990), on peut noter plusieurs remises en cause du consensus précédent:

Tout d'abord, A..BULINSKI et R.J.DENSLEY, remarquent, que: malgré la présence d'arborescences d'eau traversant complètement l'isolation et qui, de ce fait représentent la dégradation la plus importante, «des câbles peuvent avoir une durée de vie satisfaisante, pour des contraintes de fonctionnement normales, même en étant sévèrement détériorés».[27].

La conclusion qui suit est très claire: elle suggère très nettement que les arborescences d'eau ne peuvent être tenues pour responsables, à elles seules, de la rupture d'un câble dans un fonctionnement normal: "Ainsi ou bien il y a un autre mécanisme qui est dominant pour les longues durées de vieillissement, ou bien plus vraisemblablement, les ruptures doivent être initiées par des surtensions."[27].

Il faut rappeler ensuite la prise de position de S.PELISSOU [15] en 1989 estimant que la réduction de la rigidité diélectrique est corrélée plutôt à la densité d'eau qu'à la présence d'arborescences d'eau.

Enfin très récemment, en Octobre 1990, dans une rétrospective sur les arborescences d'eau R.D. NAYBOUR [28] propose un exemple dans lequel les arborescences d'eau accroissent la tenue diélectrique.

De ces dernières remarques on peut conclure à l'absence d'une conception physique claire de l'arborescence d'eau.

Qu'est-ce-que au juste une arborescence d'eau? Cette question n'a pas reçu jusque là de réponse satisfaisante.

La définition commune de "dégradation de l'isolation" pêche par son imprécision. Veut-on dire par là que l'arborescence est conductrice ? Sinon quelle signification donne-t-on à ce terme?

Ces questions renvoient à d'autres immédiatement connexes :

-Quelle est la structure de l'arborescence d'eau?

-Quelles sont les propriétés spécifiques de l'eau dans l'arborescence?

-Quelles sont les propriétés spécifiques de l'eau diffuse dans le volume du matériau?

Voilà autant de questions auxquelles il semble désormais indispensable de répondre, pour progresser dans la compréhension de l'incidence de l'arborescence d'eau sur les propriétés diélectriques du polyéthylène. Cette remarque nous conduit à interroger la littérature sur toutes ces questions et débouche sur la deuxième partie de notre étude bibliographique. Nous commençons par les propriétés structurelles.

2.L'EAU SOUS FORME D'ARBORESCENCE ET L'EAU REPARTIE EN VOLUME.

2.1.Propriétés structurelles de l'eau dans les arborescences d'eau.

L'échelle à laquelle on se situe le plus couramment pour caractériser la structure de l'arborescence d'eau est celle du micron ou la dizaine de microns. D'autres travaux s'intéressent cependant aux propriétés de la molécule d'eau ou des ions auxquels elle est associée.

2.1.1.L'eau est présente dans des cavités.

L'existence de cavités remplies d'eau, constituant l'élément de base de l'arborescence est évoquée depuis longtemps, à partir de clichés réalisés en microscopie électronique à balayage [8,17,29]. Le diamètre des cavités est de l'ordre du μm . Par contre, la question de l'inter-connection de ces cavités a été plus controversée. Initialement l'hypothèse de canaux continus reliant les cavités a été avancée [11].

2.1.2.De nombreux travaux suggèrent fortement que les cavités ne sont pas connectées.

Dès 1984, dans sa revue sur les " Récents progrès dans la compréhension du phénomène d'arborescence d'eau"[30], B. BERNSTEIN note plusieurs contributions «qui établissent l'évidence que les arborescences d'eau sont constituées de cavités remplies d'eau déconnectées, plutôt que de canaux continus.». Au laboratoire, des travaux [31,32] ont contribué à ce résultat. En particulier J.Y. KOO a montré [31,33] par des mesures de capacité, que l'arborescence d'eau se comportait comme un diélectrique au même titre que le polyéthylène ou le nylon et non pas comme un conducteur métallique.

Des contributions récentes [34] établissent que la vitesse de diffusion de l'eau dans les arborescences d'eau est plus faible que dans le polyéthylène ordinaire. Les auteurs en concluent que ce résultat est en faveur de l'existence de « gouttelettes d'eau discrètes. »[34].

Cependant, d'autres auteurs défendent au contraire l'idée de «la mobilité de l'eau dans les arborescences d'eau», [35], ou affirment que « l'eau diffuse rapidement dans les régions d'arborescences d'eau »[36]. Pour appuyer cette affirmation. Ils élaborent l'hypothèse de canaux de très faible diamètre, 1 à 10 nm, indétectables en microscopie électronique. Mais tout cela reste purement spéculatif et aucun argument expérimental ne vient étayer ces affirmations.

En résumé il n'existe pas à ce jour d'arguments vraiment convaincants en faveur de l'hypothèse d'une inter-connexion des cavités par des canaux. Mais pour qui voudrait éliminer complètement cette hypothèse un simple fait pose cependant question: des arborescences préalablement desséchées se ré-hydratent très rapidement une fois immergées dans l'eau.

Cela dit, la faible vitesse de diffusion de l'eau dans l'arborescence est en accord avec l'idée que la molécule d'eau est davantage liée au substrat de PE dans l'arborescence qu'à l'extérieur.

2.1.3. Selon plusieurs auteurs l'eau dans l'arborescence est plus liée au polyéthylène que dans le reste du matériau .

Les travaux de ROSS et al.[35], accréditent l'idée d'une molécule d'eau et d'ions liés chimiquement et physiquement au sein de l'arborescence d'eau. Ils parlent explicitement de «la nature hydrophile des arborescences d'eau». La contribution de K. ABDOLALL [37], fondée sur une étude RMN conclut dans le même sens:« que l'eau dans l'arborescence n'a pas les propriétés d'une molécule libre ou de l'eau présente en volume....» qu' «Elle n'existe pas dans de grandes cavités ou dans des canaux macroscopiques.».

Au contraire, en ce qui concerne l'eau présente en volume, on dispose d'exemples montrant une molécule d'eau moins liée à son environnement:

Certains câbles réticulés en phase vapeur présentent une quantité importante d'eau. Cette eau est parfois visible dans des coupes transversales de ces câbles regardées par transparence sous la forme d'un "halo" plus opaque que le reste du matériau et qui entoure le conducteur. S. PELISSOU et al. [38] ont étudié les propriétés de l'eau contenue dans ces "halos". Ils concluent d'après une analyse de la relation, constante diélectrique/fréquence, que «le rapport de la quantité d'eau liée à celle de l'eau libre est extrêmement petit.». Par ailleurs, leurs observations en microscopie infrarouge à transformée de Fourier leur « suggèrent qu'il y a peu d'interaction entre l'eau dans les "halos " et la matrice de XLPE.».

Cette liaison de la molécule d'eau à la matrice de PE dans l'arborescence ne plaide pas en faveur de l'idée d'une arborescence d'eau conductrice.

2.2. Les concentrations respectives de l'eau dans l'arborescence et de l'eau répartie dans la totalité du matériau.

Les arborescences d'eau ne représentent pas nécessairement la plus grande partie de l'eau présente dans les câbles mais cette eau est très fortement localisée. Les concentrations locales peuvent être très supérieures à celle de l'eau diffuse.

2.2.1. La quantité d'eau répartie dans l'ensemble du câble varie considérablement suivant le matériau utilisé pour la fabrication et pour le polyéthylène réticulé suivant le procédé de réticulation.

Selon T.TANAKA et al.[39] la quantité d'eau absorbée, dans la fabrication des câbles au P.R.C. réticulés en phase vapeur, est de 2000 à 3000ppm. Cette eau reste ensuite, en partie au moins, dans le matériau et les concentration moyenne en volume sont du même ordre [14,15,39,40],. Comme le font remarquer C.MEYER et A.CHAMEL [14], ces concentrations sont très supérieures à la solubilité de l'eau dans le matériau qui est de l'ordre de la centaine de ppm à 25°C. Ceci s'explique par la présence dans le matériau de cavités d'un diamètre de l'ordre de celui des cavités rencontrées dans les arborescences soit de 1 micron[39 à 41] La comparaison du volume occupé par les cavités et de la densité d'eau implique que l'eau soit présente sous forme liquide. La fraction volumique des cavités, dont le nombre moyen peut atteindre 10^6 par mm^3 , correspond en effet approximativement à la concentration moyenne en poids de l'eau contenue dans le câble.

Dans les câbles au P.E. la densité en cavités est environ 100 fois plus faible [41], la concentration en eau à température ambiante est de l'ordre de la solubilité. Mais si le matériau a subi un traitement thermique la concentration peut être plus élevée même en l'absence de cavité [14]: « à haute température l'absorption de l'eau dans le LDPE s'accroît notablement et il a été montré,..., que la plus grande partie de l'eau s'aggrège (get clustered) lorsque la température décroît.»[14]. Il n'est pas précisé sous quelle forme l'eau est ainsi localisée.

Il est difficile d'estimer ce que représente l'eau sous forme d'arborescence par rapport au volume total du matériau, faute de données suffisantes sur les longueurs et le nombre des arborescences d'eau. Il est difficile par suite de comparer les parts respectives d'eau sous forme d'arborescence et sous forme répartie dans un matériau donné. Il est en revanche possible et intéressant de comparer les concentrations maximales.

2.2.2. Concentrations maximales respectives de l'eau dans les arborescences et en dehors des arborescences .

Quand elle dépasse fortement la solubilité de d'eau dans le matériau, la concentration en eau peut être mesurée par la densité des micro-cavités, le diamètre moyen des cavités étant du même ordre ($1\mu\text{m}$) aussi bien dans l'arborescence qu'en dehors de celle-ci. La densité maximale de micro-cavités peut être supérieure de trois ordres de grandeur dans les arborescences d'eau, à ce qu'elle est dans une autre région du matériau. En effet, au laboratoire, J.L.CHEN [42] a dénombré, dans des arborescences à proximité de la pointe d'eau, des densités locales d'environ 1 cavité par μm^3 soit 10^9 cavités par mm^3 .

Ces valeurs de concentration, conditionnent les propriétés électriques, de l'arborescence d'eau, dernier point de notre étude bibliographique.

3. LES PROPRIETES ELECTRIQUES DES ARBORESCENCES D'EAU COMPAREES A CELLES DU DIELECTRIQUE SATURE EN EAU.

3.1. Les propriétés électriques du polyéthylène en environnement humide sans arborescences d'eau.

Bien que les publications relatives à l'effet de l'eau sur les propriétés diélectriques du polyéthylène soient beaucoup moins nombreuses que celles relatives à l'effet des arborescences d'eau, certains effets de l'eau sont connus depuis longtemps.

3.1.1. L'effet de l'eau sur la tenue diélectrique du polyéthylène.

Si l'on examine cette question du point de vue des résultats expérimentaux une distinction immédiate s'impose. En effet, selon que les tests de tenue diélectrique sont faits en champ divergent ou en champ uniforme ou quasi uniforme, les résultats obtenus sont différents.

a-Résultats en champ divergent: Ils se traduisent par un accroissement de 10 à 30%, selon les cas, de la tenue diélectrique et également par un accroissement de la durée de vie des échantillons testés [43 à 46]. Depuis longtemps l'eau, est connue comme un des additifs qui «apparemment retarde grandement la croissance d'une arborescence électrique.» [44]. Les auteurs précédent n'ont pas cherché à déterminer si des arborescences d'eau avaient été formées dans les situations expérimentales qu'ils rapportent. Des observations plus récentes confirment que l'eau accroît la tension de rupture d'échantillons de

polyéthylène en géométrie pointe-plan et accroît le temps d'incubation à tension constante avant la rupture [45,46].

b-Résultats en champ uniforme ou quasi-uniforme.

Ils se traduisent par une réduction de la tenue diélectrique de 25 à 30% selon les cas [12, 47,]. : Ainsi, C.KATZ et al. [12], rapportent, pour des câbles immergés et soumis à un champ électrique alternatif une réduction de la tension de rupture de 33% obtenue avant la croissance d'arborescences d'eau. Ils concluent que: «l'abaissement de la tenue diélectrique est dû partiellement à la présence d'humidité dans l'isolation et partiellement aux structures d'arborescence d'eau.».

Certains auteurs ont effectué simultanément des mesures de tenue diélectrique et de teneurs en eau, ainsi S. PELISSOU [15] établit une corrélation entre la teneur en eau et la tenue diélectrique. Il constate l'existence d'un seuil de 400 ppm à partir duquel la décroissance de tenue diélectrique s'accélère.

L'ensemble des résultats précédents apparemment contradictoires peuvent s'interpréter à partir de l'incidence de l'eau sur la conductivité du polyéthylène.

3.1.2. L'effet de l'eau sur la conductivité du polyéthylène et ses conséquences sur la tenue diélectrique.

R.E. BARKER rapporte que «la présence d'humidité peut accroître, dans certains cas, de six décades le niveau de la conductivité observée dans les polymères », ... , «Aux faibles concentrations l'effet important est la dissociation de H₂O, tandis qu'aux plus hautes concentrations l'accroissement de la dissociation de toutes les espèces ioniques devient important.»[48].

a-Dans les tests en champ divergent au moyen d'une pointe, cet accroissement de conductivité peut conduire paradoxalement à un renforcement de la tenue diélectrique .

En effet si la phase terminale de la rupture est bien un processus de conduction, cette phase est précédée d'une phase prédisruptive. Dans cette première phase, le processus dominant n'est pas la conduction à travers la totalité du matériau mais l'injection avec piégeage local de charges dans le matériau à proximité de la pointe. L'injection est suivie d'une recombinaison de charges de signes opposées qui entraîne la dégradation progressive du matériau par l'énergie lumineuse libérée [49,50]. Dans ces conditions tout ce qui retarde l'injection de charges retarde aussi la dégradation locale du matériau et la rupture.

ionomères sont définis comme «des polymères contenant des ions »[56] et plus précisément comme «une phase aqueuse conductrice qui se sépare en "clusters", contenant des ions, dispersés,...dans une matrice isolante.»[54]. Ils présentent ainsi en apparence, une grande analogie structurelle avec les arborescences d'eau. La présence d'ions au sein de l'arborescence d'eau a, en effet été mise en évidence à plusieurs reprises [55]. Les arborescences d'eau se présentent donc bien comme des cavités d'eau conductrice immergées dans une matrice polymère hydrophobe et isolante.

Mais l'analogie s'arrête là. Un blanc avait été volontairement laissé dans la définition précédente, car les auteurs précisait «des clusters contenant des ions dispersés au hasard dans la matrice isolante». Dans ce dernier cas en effet un calcul de percolation sur réseau régulier [56] montre que quel que soit le type de réseaux, à trois dimensions il y a percolation à partir d'une fraction de volume occupé égale à 15%. Cette valeur est très proche des valeurs de concentration en eau dans les arborescences mesurées au laboratoire par C. MEYER [57].

Si l'hypothèse d'une distribution aléatoire des cavités était satisfaite nous pourrions légitimement nous attendre à une transition identique dans les arborescences d'eau. Mais la répartition des cavités ne semble pas du tout aléatoire dans les arborescences d'eau. Elle semble plutôt régulière, à l'échelle de quelques dizaines de μm , du moins, comme on peut le constater d'après un certain nombre de photographies prises en microscopie électronique. Ce résultat n'est pas surprenant dans la mesure où le polyéthylène, matériau semi-cristallin, est beaucoup plus ordonné que les ionomères. Par suite, il n'est pas étonnant que dans les arborescences d'eau, la densité de percolation soit très supérieure à celle des ionomères. On peut seulement se donner pour cette densité une borne supérieure théorique qui correspond au remplissage complet du réseau et varie pour les réseaux réguliers classiques de 34 à 74% du volume [54]. Encore une fois l'arborescence apparaît beaucoup moins conductrice que le modèle proposé.

En conclusion, en dehors du cas limite où la densité de micro-cavités est telle que ces cavités occupent tout l'espace disponible et sont contiguës, il ne peut y avoir conduction, en règle générale, par percolation entre les cavités.

3.2.2. La tenue diélectrique des arborescences d'eau.

En ce qui concerne la tenue diélectrique intrinsèque des arborescences d'eau, la littérature fournit très peu d'éléments d'appréciation. Toutefois G. BAHDER, G.S. EAGER, LUKAC rapportent que «la tenue diélectrique des câbles

contenant des arborescences qui traversent complètement l'isolation ne diffère pas sensiblement de ceux dont les arborescences sont longues, mais ne traversent pas complètement la paroi isolante.»[20]. Autrement dit on a d'un côté dans un matériau comportant une région faible ou supposé tel sur toute son épaisseur, l'arborescence traverse toute la paroi isolante. On a d'un autre côté un matériau qui comporte une région faible sur une partie seulement de son épaisseur et une partie intacte. Et ces deux matériaux présentent tous deux la même résistance à la rupture.

Il y a deux interprétations possibles de ce résultat: ou bien la rupture diélectrique de l'ensemble est conditionnée par la région qui contient l'arborescence d'eau et le fait qu'une partie de l'isolant soit intacte n'a pas d'incidence sur la résistance de l'ensemble au claquage. C'est un nivellement par le bas des tenues diélectriques des deux matériaux, l'hétérogène et l'homogène. Ou bien, au contraire, la région d'arborescence d'eau a la même rigidité que le polyéthylène intact et le fait pour l'arborescence de traverser partiellement ou entièrement le matériau ne modifie pas sa tenue diélectrique. C'est le nivellement par le haut des tenues diélectriques des deux matériaux. Il ne semble donc pas déraisonnable de considérer l'arborescence d'eau comme un diélectrique et même comme un bon diélectrique [32], cela ne signifie pas que l'arborescence ne possède pas pour autant des propriétés diélectriques différentes de celle du polyéthylène.

3.2.3. La polarisabilité des arborescences d'eau.

D'après les mesures de capacité de J.Y. KOO et al.[32], la permittivité relative de la zone d'arborescence serait de l'ordre de 2 à 2,8 fois celle du polyéthylène, soit de 4,6 à 6 fois celle de l'air. H. ZELLER fait remarquer [36], qu'une telle permittivité est incompatible avec une concentration en eau de 10% environ et réclamerait une concentration de 25 à 27%, bien que d'autres auteurs affirment le contraire [32,58]. En fait il semble bien que H. ZELLER ait raison sur ce point: un calcul de permittivité relative par l'approximation de Maxwell-Wagner et validé par des travaux expérimentaux donne une valeur de 1,75 pour une concentration en eau de 20%[59]. Toutefois il ne semble pas nécessaire pour autant de conclure avec lui que la plus grande partie de l'eau dans les arborescences est contenue en dehors des cavités. En effet la répartition hétérogène de l'eau dans les arborescences mise en évidence par J.L.CHEN et al.[42] autorise à envisager des concentrations locales bien supérieures à 10% tout en conservant ce chiffre comme valeur moyenne. Il en résulte la nécessité d'élaborer un modèle plus complexe que celui d'une permittivité constante pour prendre en compte l'hétérogénéité diélectrique

de l'arborescence. La prise en compte de cette hétérogénéité se traduit par une amplification du champ dépolarisant dû à l'eau, qui se trouve de fait au moins aussi important que celui dû à une permittivité homogène de 4,6 ou 6. Ce modèle sera décrit plus loin, pour l'instant nous retiendrons seulement que l'arborescence d'eau peut comporter des régions de permittivité élevée.

CONCLUSION.

Au cours de cette étude nous avons vu se substituer peu à peu à la conception initiale de "détérioration de l'isolation", une conception de l'arborescence d'eau plus précise sur ses propriétés diélectriques .

Le fait de considérer l'arborescence d'eau comme un milieu diélectrique, de permittivité supérieure à celle du polyéthylène nous permet déjà d'anticiper des conséquences possibles de cette propriété. Si nous appliquons une différence de potentiel entre deux électrodes séparées par du polyéthylène, la répartition des potentiels électriques entre ces deux électrodes ne sera pas la même selon que le matériau contient une arborescence d'eau ou non. Autrement dit, la présence d'une arborescence d'eau perturbera la distribution des potentiels entre les électrodes. Cependant la répartition spatiale des potentiels électriques ne nous est pas directement accessible et leur perturbation pas davantage. Seuls les effets détectables de cette perturbation pourront nous donner des informations. L'examen de ces effets nous permettra à la fois de valider ou non notre hypothèse de travail actuelle et de la préciser en progressant ainsi dans la connaissance de l'arborescence d'eau.

En pratique nous étudierons l'effet des propriétés diélectriques de l'arborescence d'eau sur la tension de rupture d'échantillons que nous soumettrons à des tests de rigidité diélectrique. Ce projet pose une question quant à la nature de la technique expérimentale choisie. Nous avons vu en parcourant la littérature que la technique la plus couramment utilisée présentait un inconvénient de taille. Elle interdit de séparer deux facteurs qui conditionne la rigidité diélectrique: l'eau sous forme diffuse présente dans la totalité du volume du matériau et l'eau sous forme d'arborescence. Ce constat nous conduira à proposer une autre technique expérimentale.

La justification du choix de la situation expérimentale, sa description ainsi que celle, des méthodes de mesures, des techniques mises en oeuvre pour la fabrication des échantillons font l'objet du chapitre suivant.

REFERENCES DU CHAPITRE PREMIER

- [1] E.J. MCMAHON,
IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-13 N° 4, August 1978, 286.
- [2] C. LAURENT, Thèse de doctorat d'Etat, Toulouse, 1984.
- [3] R.M. EICHORN, IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-12 N° 1, February 1976, 2.
- [4] T. MIYASHITA, IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-6 N° 3, September 1971.
- [5] G. BAHDER, T. W. DAKIN, J.H. LAWSON, CIGRE 1974 15-05.
- [6] B.S. BERNSTEIN, N. SRINIVAS, P.N. LEE ,
Annual Report of the 1975 CEIDP, (NAS, Whashington), p. 296.
- [7] A. BULINSKI, R.J. DENSLEY,
IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-16 N° 4, August 1981 p. 319.
- [8] L.A. DISSADO, J.C. FOTHERGILL, S.V. WOLFE,
Annual Report of the 1981 CEIDP, (NAS, Whashington), p. 264.
- [9] A. BULINSKI, S. BAMJI, J. DENSLEY, N. SHIMIZU,
Annual Report of the 1983 CEIDP, (NAS, Whashington), p. 294.
- [10] D. A. SILVER, R.G. LUKAC,
Intern. Conf. on Polymer Insulated Power Cables Jicable, Mars 1984.
- [11] W. KALKNER, U. MULLER, E. PESCHKE, H.J. HENKEL, R. VON OLSHAUSEN,
CIGRE 1982, 21-07.
- [12] C. KATZ, G.S. EAGER, E.R. LEBER, F.E. FISHER,
Intern. Conf. on Polymer Insulated Power Cables Jicable, Mars 1984.
- [13] D.W. AUCKLAND and R. COOPER,
Annual Report of the 1974 CEIDP, NAS, Whashington D. C. 1975, p. 71.

- [14] C.T. MEYER, A. CHALMEL,
IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-15 N° 5, October 1980, p. 389.
- [15] S. PELISSOU, Proceedings of the Third international Conference on
Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, Trondheim, Norway 1989, p.433.
- [16] J. D. MINTZ, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103,
N° 12, December 1984, p.3448.
- [17] C.T. MEYER, J.C. FILIPINI, N. FELICI,
1978 Ann. Rep. CEIDP, NAS, Whashington D. C. , p.374.
- [18] J.C. FILIPINI, C.T. MEYER,
IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-17 N° 6, December 1982, p. 554.S.
- [19] BAMJI, A.BULINSKI, J. DENSLEY,
IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-19 N° 1, February 1983, p. 32.
- [20] R.LYLE, J.W. KIRKLAND, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems,
Vol. PAS-100, N° 8, August 1981, p.3764.
- [21] H. FRANKE, H. HEUMANN, D. KAUBISCH,
Intern. Conf. on Polymer Insulated Power Cables Jicable, Mars 1984, 113.
- [22] G. BADHER, C. KATZ, J. LAWSON, W. VALSTROM,
IEEE Power Summer Meeting Vancouver, July 1973 Paper T 73, p. 496.
- [23] T. TANABE, T. SAKURAI, K. KIKUCHI, T. FUKUDA,
Intern. Conf. on Polymer Insulated Power Cables Jicable) Mars 1984, 119.
- [24] E.J. FISHER,
Intern. Conf. on Polymer Insulated Power Cables Jicable) Mars 1984, 135.
- [25] G. BAHDER, C.KATZ, G.S. EAGER, E. LEBER, W. H. JONES, W.H. MANGRUM,
IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, N° 4, April
1981, p.1581.

- [48] R.E. BARKER,
Pure & Applied Chemistry, Vol. 46, pp157-170. Pergamon Press 1976.
- [49] C. LAURENT, C. MAYOUX, J. Appl. Phys. 58,4346, 1985.
- [50] T. LEBEY and C. LAURENT, J. Appl. Phys. 68, 275, 1 July1990.
- [51] R. PATCH, Conference Record of the 1978 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Philadelphia, 130.
- [52] C. CHAUVET, C. LAURENT, C. MAYOUX, Annual Report of the 1989 CEIDP, p. 231.
- [53] K. A. MAURITZ, C. E. ROGERS, Macromolecules 1985, 18, 433.
- [54] W. HSU, J.BARKLEY, P. MEAKIN, Macromolecules 1980, 13, 198.
- [55] B.H. CRICHTON, M.J. GIVEN, O. FARISH, H.M. BANDFORD,
Intern. Conf. on Polymer Insulated Power Cables Jicable, Mars 1984, 93.
- [56] H. SCHER and R. ZALLEN, J. Chem. Phys. , Vol. 53, 1970, 3759.
- [57] C. T. MEYER, IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-18, N° 1, February 1983, p. 28.
- [58] R. PATCH, A. PAXIMADAKIS, P. ROMERO, Conference Record of the 1990 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Toronto, 160.
- [59] [J. B. HASTED, Aqueous dielectrics. Chapman and Hall. London, 1973.

CHAPITRE DEUX

DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

UTILISES

POUR LES TESTS DE

RIGIDITE DIELECTRIQUE

INTRODUCTION.

Les configurations expérimentales utilisées pour les tests de tenue diélectrique sont de deux types, mais toutes deux utilisent la technique de l'aiguille d'eau et des modèles de laboratoire. Nous exposerons les raisons de ce choix.

Les échantillons associés à chaque configuration expérimentale, diffèrent à la fois par la géométrie de leurs électrodes et par la technique de fabrication, cependant leur matériau est identique, ses caractéristiques seront précisées.

Ensuite pour chaque configuration expérimentale, nous passerons en revue la technique de fabrication des échantillons, les variables retenues pour caractériser la tenue diélectrique et les méthodes de mesure.

1.LES AVANTAGES DE L'EMPLOI DE L'AIGUILLE D'EAU ET DE MODELES DE LABORATOIRE SUR L'UTILISATION DE SECTIONS DE CABLES IMMERGÉES.

1.1.Rappel sur les deux techniques de production des arborescences.

La technique la plus fréquemment utilisée, est celle de l'immersion. Elle consiste à plonger une section de câble dans un récipient contenant de l'eau. Une différence de potentiel alternative, d'amplitude constante, est appliquée entre le conducteur du câble et le liquide qui constitue une deuxième électrode, pour obtenir des arborescence d'eau. On mesure ensuite la tension de rupture en appliquant aux deux électrodes précédentes la tension d'essai.

Nous avons employé pour notre part la technique de l'aiguille d'eau, aussi bien pour produire des arborescences d'eau que pour effectuer les tests de tenue diélectrique. Cette technique consiste à injecter localement de l'eau dans le matériau, en réalisant préalablement une empreinte au moyen d'une aiguille. Cette eau mélangée à un sel conducteur constitue l'électrode, à partir de laquelle sera produite l'arborescence d'eau et également l'une des électrodes utilisée dans le test de rigidité. Nous précisons maintenant, la spécificité de cette technique par rapport à la technique des morceaux de câbles immergés.

1.2.L'aiguille d'eau permet de produire des l'arborescences d'eau sans que le reste du matériau ne soit saturé en eau.

Dans le cas de l'immersion, un réservoir d'eau de grande dimension entoure complètement l'isolation, la surface de contact entre l'eau et l'isolation est très

importante. Elle peut atteindre plusieurs centaines de cm^2 . Par suite, dans le cas des essais par immersion, la probabilité de pénétration de l'eau dans le polyéthylène, en dehors des arborescences d'eau proprement dites, est importante. Le matériau, lors des essais est nécessairement saturé en eau.

Cette eau qui pénètre, en dehors des arborescences d'eau peut influencer sur la tenue diélectrique de l'isolation. En effet du fait de l'étendue des électrodes c'est toute le volume du matériau qui est soumis au test de tenue diélectrique et pas seulement la région d'arborescence d'eau. Cette influence de l'eau diffuse en dehors de l'arborescence constitue un phénomène parasite par rapport à l'objectif que nous recherchons: la détermination de l'incidence des arborescences d'eau sur cette tenue diélectrique.

Dans le cas de l'aiguille d'eau la situation est différente. Un réservoir d'eau de dimension très inférieure au précédent est inséré dans l'isolation, sa surface de contact avec la partie du matériau soumise au test de tenue diélectrique est de quelques mm^2 . La probabilité d'une pénétration importante de l'eau dans le matériau à partir de ce réservoir par simple diffusion en dehors de l'arborescence est donc réduite. On peut remarquer aussi que la topologie des équipotentiels réduit également la région soumise au test à une fraction du matériau dans laquelle le champ est très intense. Cette région coïncide avec l'arborescence d'eau. L'influence des régions extérieures à l'arborescence d'eau sur la tenue diélectrique de l'échantillon se trouve ainsi réduite.

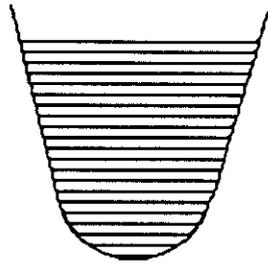
La technique de l'aiguille d'eau limite donc l'incidence sur la tenue diélectrique de l'échantillon de l'effet parasite de l'eau diffuse en dehors de l'arborescence.

1.3.L'utilisation de modèles de laboratoire permet de contrôler le champ électrique et d'obtenir des situations expérimentales reproductibles.

Dans le modèle de laboratoire la géométrie des électrodes peut être contrôlée.

La technique de l'aiguille d'eau permet de définir avec précision la géométrie de l'électrode liquide constituée dans notre cas d'une pointe conique terminée par une demi-sphère et d'un plan.

La deuxième électrode, dans la première configuration expérimentale, est constituée par un plan conducteur situé à l'extérieur du matériau en face de la pointe d'eau.



Polyéthylène

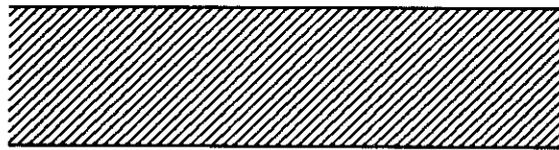
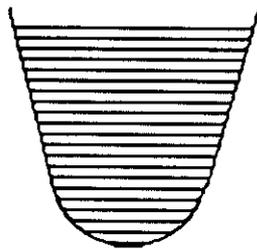


Figure 1: Configuration pointe-plan constitué d'une pointe d'eau et d'un plan métallique, séparés par du polyéthylène.

Dans la deuxième configuration, la deuxième électrode est constituée par une pointe métallique dans l'axe de la pointe d'eau et lui faisant face.



Polyéthylène

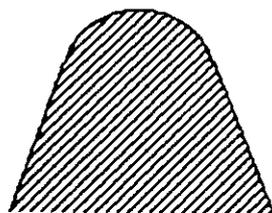


Figure 6: La configuration expérimentale comprend une pointe d'eau et une pointe métallique, séparées par du polyéthylène.

Le rayon de courbure de chaque pointe peut être contrôlé. La géométrie de ces deux électrodes peut donc être définie également avec précision.

Pour une différence de potentiel donnée appliquée aux électrodes, la valeur du champ électrique maximal à l'extrémité de l'une ou des deux pointes est donc approximativement fixée et indépendante de l'éprouvette, du moins en l'absence d'arborescence d'eau. Cette valeur du champ n'est qu'approximative parce que la valeur effective du champ maximum dépend aussi de la charge injectée dans le matériau, à proximité de la pointe qui, elle, peut varier d'une éprouvette à l'autre. Toutefois la définition du champ reste même avec cette dernière restriction très supérieure à ce qu'elle est lors des essais sur sections de câbles. Cette technique, en effet, ne permet pas un contrôle aussi précis de la géométrie des électrodes et par suite du champ local.

Enfin la technique de fabrication des échantillons permet de reproduire des situations expérimentales approximativement identiques, ce qui n'est pas le cas dans les essais sur câbles.

1.4.L'emploi de modèle de laboratoire n'interdit pas de simuler les situations effectives rencontrées dans les câbles.

Selon certains [1], l'aiguille d'eau constituerait un défaut "artificiel" qui l'empêcherait de simuler correctement ce qui se passe dans les câbles. Selon ces auteurs, le renforcement de champ introduit par l'aiguille d'eau serait bien supérieur à celui engendré dans les câbles par le défaut à l'origine des arborescences d'eau. Cette critique constitue en même temps un aveu: Les arborescences d'eau se développent toujours à l'occasion d'un défaut entraînant un renforcement de champ local.«Cette idée semble unanime.» [2] chez tous les observateurs. L'existence même d'un défaut, dans l'aiguille d'eau, ne constitue donc pas une déformation de la situation physique réelle. La contestation porte sur l'amplitude de l'accroissement du champ, induit par le défaut. Mais sur ce point la critique reste très vague car aucune indication précise n'est donnée sur la valeur des renforcements de champ "naturels" rencontrés dans les câbles. Nous pensons donc dans ces conditions que l'avantage résultant de la possibilité de contrôler le champ prime sur l'inconvénient dénoncé. Il est toujours possible en effet d'accroître, si besoin est, le rayon de courbure de la pointe, pour diminuer un renforcement de champ que l'on jugerait excessif.

Les deux configurations expérimentales évoquées précédemment simulent chacune deux situations rencontrées dans les câbles.

Dans la configuration pointe-plan, un défaut représentant un maximum local du champ a été à l'origine d'une arborescence d'eau qui s'est développée autour de lui. Le défaut est situé à l'intérieur de l'arborescence d'eau.

Dans la configuration pointe-pointe, il y a deux défauts correspondant à deux maxima locaux du champ. L'un de ces défauts seulement a été à l'origine d'une arborescence d'eau, l'autre subsiste à l'extérieur de l'arborescence d'eau.

2. LE MATERIAU UTILISE DANS LA FABRICATION DES ECHANTILLONS.

Le matériau utilisé est du polyéthylène basse densité d'un indice de fluidité égale à 0,1%, d'une masse volumique de $0,92 \text{ g/cm}^3$. La résine de base a été fournie par BP Chemicals sous la référence DMX 430.

Nous examinons maintenant la procédure utilisée dans chaque configuration.

3. EXPERIMENTATION EN CONFIGURATION POINTE-PLAN.

La région (2) qui sera soumise au test de la rupture diélectrique est surmontée d'un réservoir d'eau alimentant la pointe pendant la croissance de l'arborescence d'eau. L'ensemble constitue une éprouvette dont la conception a été réalisée, il y a plusieurs années, au laboratoire.

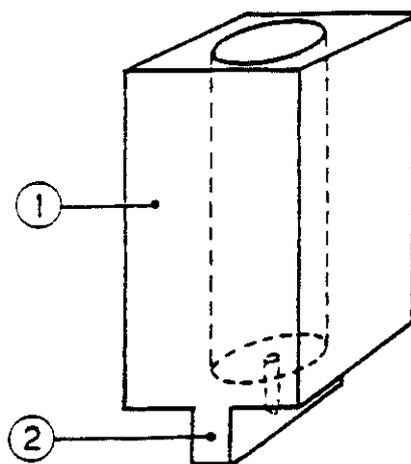


Figure 3: Dessin d'après [3] d'une éprouvette conçue pour la production d'arborescences d'eau et pour les tests de tenue diélectrique. 1-Réservoir d'eau; 2-Zone de plus faible épaisseur (3mm) permettant l'observation de l'arborescence.

3.1. La fabrication des éprouvettes de polyéthylène.

Les éprouvettes sont moulées par injection. La distance entre la pointe et le plan est ajustée après moulage au moyen d'un microtome. Cette distance est fixée à $500\mu\text{m}$ avec une tolérance de 10 %.

Les éprouvettes sont dégazées pendant 24 H, recuites sous azote pendant 24 H à 70°C puis refroidies progressivement. Ce traitement permet de relaxer les contraintes de fabrication. L'expérience a montré qu'il réduisait également la dispersion dans la croissance des arborescences.

L'ensemble des échantillons ainsi obtenus est ensuite soumis à un tri en fonction du rayon de courbure de la pointe d'eau. Seuls sont conservés ceux dont le rayon de courbure est égal à $10\mu\text{m} \pm 10\%$. Les échantillons restant sont ensuite répartis en deux lots, l'un servant directement à établir la référence dans les tests de tenue diélectrique, l'autre étant destiné à la production des arborescences d'eau.

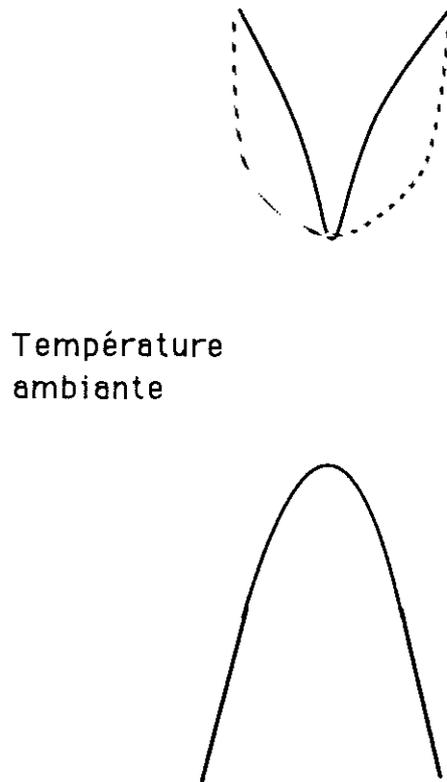
3.2. L'obtention des arborescences.

Les empreintes sont remplies d'une solution eau, NaCl à 0,1 mole/litre. Une tension alternative de fréquence 1500Hz est ensuite appliquée entre la pointe d'eau et le plan qui lui fait face pendant une durée suffisante pour obtenir des arborescences de grandes dimensions relativement à l'espace inter-électrode c'est à dire de 250 à $450\mu\text{m}$. L'application d'une fréquence supérieure à 50Hz permet d'accélérer la cinétique de croissance des arborescences. L'amplitude crête de la tension est fixée à 8kV.

3.3. Le test de rigidité diélectrique.

La variable choisie pour caractériser la tenue diélectrique est la tension de rupture. La procédure de mesure est la suivante:

Un générateur basse fréquence suivi d'un amplificateur et d'un transformateur haute tension peut délivrer une tension alternative à 50 Hz d'une amplitude crête variant de 0 à 45kV. L'amplitude de la tension est accrue manuellement par paliers en agissant sur le potentiomètre du générateur basse fréquence. Entre chaque accroissement la tension est maintenue constante pendant cinq minutes. La vitesse de croissance de la tension est en moyenne de 1kV/minute.



Température
ambiante

Figure 7: Le résultat d'un moulage avec démontage à température ambiante. En haut, l'empreinte obtenue en trait plein et l'empreinte souhaitée en pointillé. En bas, l'aiguille métallique sans retrait du matériau.

Cette solution était inacceptable dans la mesure où elle ne permettait pas de contrôler le rayon de courbure de la pointe d'eau et par suite le champ électrique sur cette pointe.

4.1.2. La solution finalement retenue.

Une tentative a été alors entreprise à partir du raisonnement suivant: La procédure de moulage par injection donnait de bons résultats en ce qui concerne la forme de l'empreinte d'eau, il fallait donc s'inspirer de cette procédure qui prévoyait un démoulage à 80°C, avant la solidification complète du matériau. Dans ces conditions, le résultat obtenu est le suivant: bonne qualité de l'empreinte, léger retrait du matériau à proximité de la pointe métallique, cf figure 8.

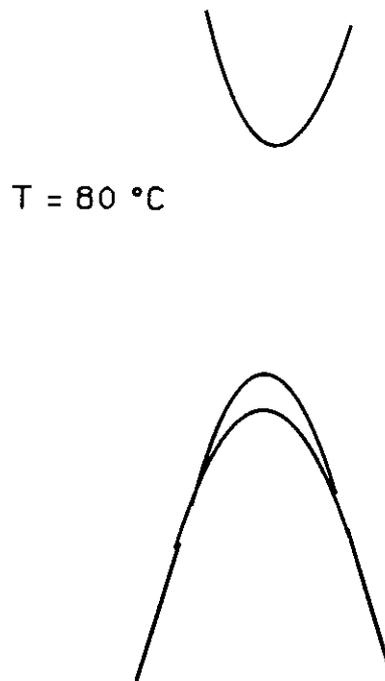


Figure 8 : Le résultat d'un démoulage avec retrait de l'aiguille matrice à 80°C. En bas, l'aiguille métallique dans son logement avec une léger retrait du matériau.

Le retrait partiel de la pointe métallique ne s'accompagne pas comme c'était le cas pour l'empreinte de la pointe d'eau d'une déformation. Il est donc possible après le démoulage de procéder sous microscope à l'enfoncement de la pointe métallique jusqu'à l'amener en contact avec le matériau, c'est la procédure qui a été retenue. Le grandissement obtenu permet de détecter des écarts résiduels d'un à deux microns entre la pointe et le matériau. Dans de nombreux cas, aucun écart n'est décelable. Cette solution n'est pas une solution idéale, c'est une solution de compromis. Elle aurait été irrecevable si nous avions voulu examiner des phénomènes prédisruptifs très fins comme par exemple l'émission de lumière qui précède l'apparition de l'arborescence électrique. Dans notre cas, notre objectif était seulement de constater un écart entre des tensions de rupture obtenues avec et sans arborescence d'eau et non pas de faire des mesures absolues du champ de rupture. Par ailleurs, étant donné le seuil de sensibilité de notre système de détection, nous avons considéré que les imperfections du contact à l'interface polyéthylène-métal ne constituait pas un motif d'invalidation de nos résultats. En effet le système de détection de décharges partielles pourtant assez sensible (0,2 pC) ne voyait pas de différence entre des cavités à la pointe métallique inférieure à $1\mu\text{m}$ ou de quelques microns (5 à $6\mu\text{m}$). Pour ces deux raisons, nous avons considéré que le critère de l'adhésion de l'aiguille métallique au matériau, constaté

sous microscope avec un grossissement de 1500 et permettant de détecter un écart de l'ordre de 1 μm était suffisant.

4.2.L'obtention des arborescences.

Les éprouvettes subissent la procédure habituelle de dégazage recuit et un dernier tri relatif à la qualité de l'empreinte d'eau et de l'interface métal-polymère sur la pointe métallique.

Les empreintes sont remplies comme précédemment d'une solution eau, NaCl à 0,1 mole/litre ou une mole/litre. Une tension alternative de fréquence 1500Hz, est ensuite appliquée entre la pointe d'eau et la pointe métallique qui lui fait face.

Le remplacement du plan conducteur par une pointe métallique comme deuxième électrode pose des problèmes nouveaux pour la détermination de la tension maximale applicable pendant la croissance de l'arborescence d'eau. Il y a en effet un risque non négligeable d'apparition d'une arborescence électrique sur la pointe métallique, pendant la croissance de l'arborescence d'eau qui n'existait pas auparavant.

Différents types de solution seront apportées à ce problème, elles seront exposées lors de la présentation des résultats.

Dans tous les cas de figures retenus, cette tension est maintenue pendant une durée suffisante pour obtenir des arborescences de grandes dimensions relativement à l'espace inter-électrode c'est à dire de 250 à 450 μm .

4.3.Les tests de rigidité diélectrique.

Dans cette configuration, les tests de rigidité diélectrique seront de deux sortes suivant la variable choisie comme indicateur de cette rigidité.

Dans un premier type de test, la variable retenue comme indicateur de la rigidité diélectrique est, la tension de rupture.

Dans un deuxième type de test, la variable retenue est la tension à laquelle est détectée une arborescence électrique sur la pointe métallique. Le choix de cette nouvelle variable fournit une meilleure définition de la rigidité diélectrique indépendante de la cinétique de propagation de l'arborescence électrique. Cela n'est pas toujours le cas pour la tension de rupture de l'échantillon.

4.3.1. Mesure de la tension de rupture.

La procédure mise en oeuvre pour la mesure de la tension de rupture est en tous points identique à celle employée en géométrie pointe-plan (cf 3.4.).

Toutefois une modification est apportée au rythme de croissance de l'amplitude de la tension d'essai, pour toutes les autres électrodes. Cette dernière est accrue désormais par saut de 2kV. La définition de la tension est un peu améliorée, l'allongement des paliers de tension de 5 à 10 minutes a résulté d'une modification technique et non d'un choix délibéré.

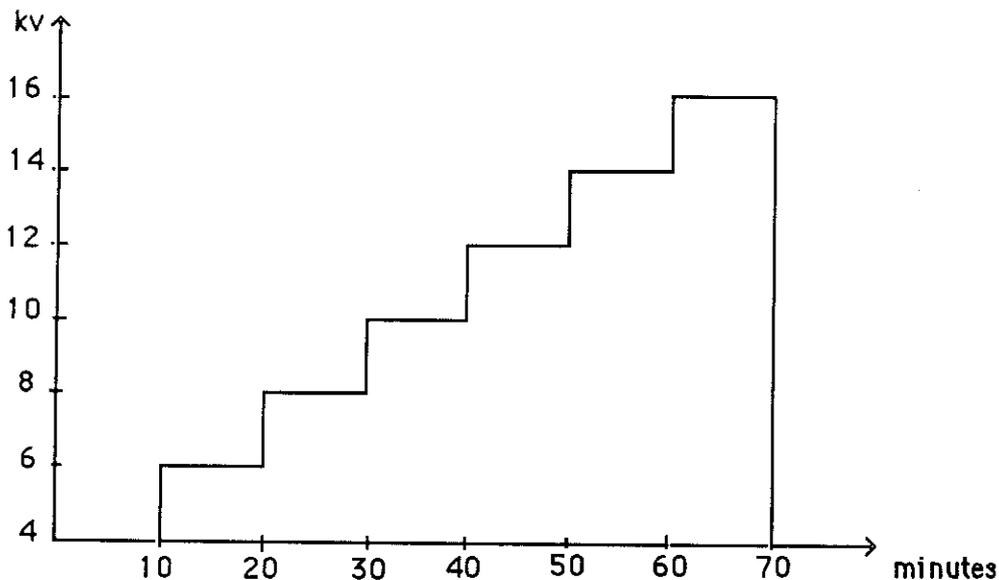


Figure 9: L'amplitude de la tension d'essai est accrue de 2 kV toutes les dix minutes

4.3.2. Mesure de la tension d'obtention d'une arborescence électrique.

a-La détection de l'arborescence électrique.

L'apparition de l'arborescence électrique est détectée simultanément par observation de la pointe métallique à l'aide d'un microscope et d'un dispositif vidéo assurant un grandissement de 400 fois, et par la détection de décharges à proximité de cette pointe. Etant donnée la faible distance inter-électrode, l'apparition de l'arborescence électrique est associée temporellement dans la grande majorité des cas à la détection des premières décharges partielles au seuil de sensibilité du détecteur soit 0,2pC. Le critère retenu est cependant l'apparition d'une arborescence électrique visible et non pas le taux ou l'amplitude des décharges détectées. Il n'est donc procédé, à ce moment là, à aucune mesure

proprement dite des décharges mais simplement à leur détection. Converties en signal sonore, elles annoncent l'imminence d'une arborescence électrique visible sur un moniteur vidéo.

b-La détection de décharges partielles.

Le principe est le suivant: lorsqu'une décharge se produit, elle se traduit par une variation de l'intensité du courant alternatif qui alimente la cellule de mesure. Cette variation est détectée, amplifiée et redressée.

La réalisation est assurée au moyen du dispositif suivant : La cellule de mesure qui contient l'éprouvette supposée être le siège de décharges est reliée à la masse par l'intermédiaire d'un circuit résonnant self-capacité. Ce circuit présente une impédance très faible pour la fréquence d'alimentation (50Hz) mais importante pour les signaux de décharges. La tension aux bornes de ce circuit est amplifiée et redressée.

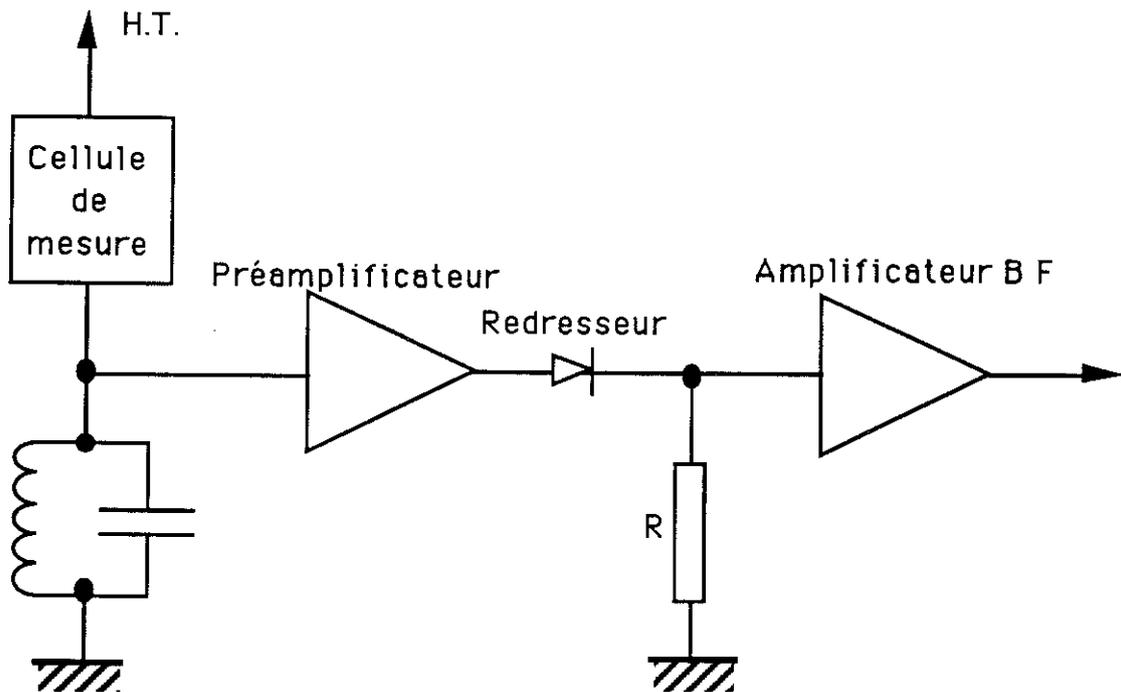


Figure 10: Synoptique du dispositif de détection de décharges partielles.

c-La cellule de mesure et le dispositif de visualisation.

La cellule de mesure est constituée d'un récipient isolant rempli d'huile de silicone dans lequel sont aménagées deux fenêtres situées de part et d'autre de l'éprouvette à l'emplacement des deux points.

L'une de ces fenêtres est en contact avec une fibre optique apportant la lumière nécessaire à l'éclairage des pointes, l'autre fenêtre est en contact avec l'objectif à fort agrandissement d'un microscope, lui-même connecté à une caméra vidéo.

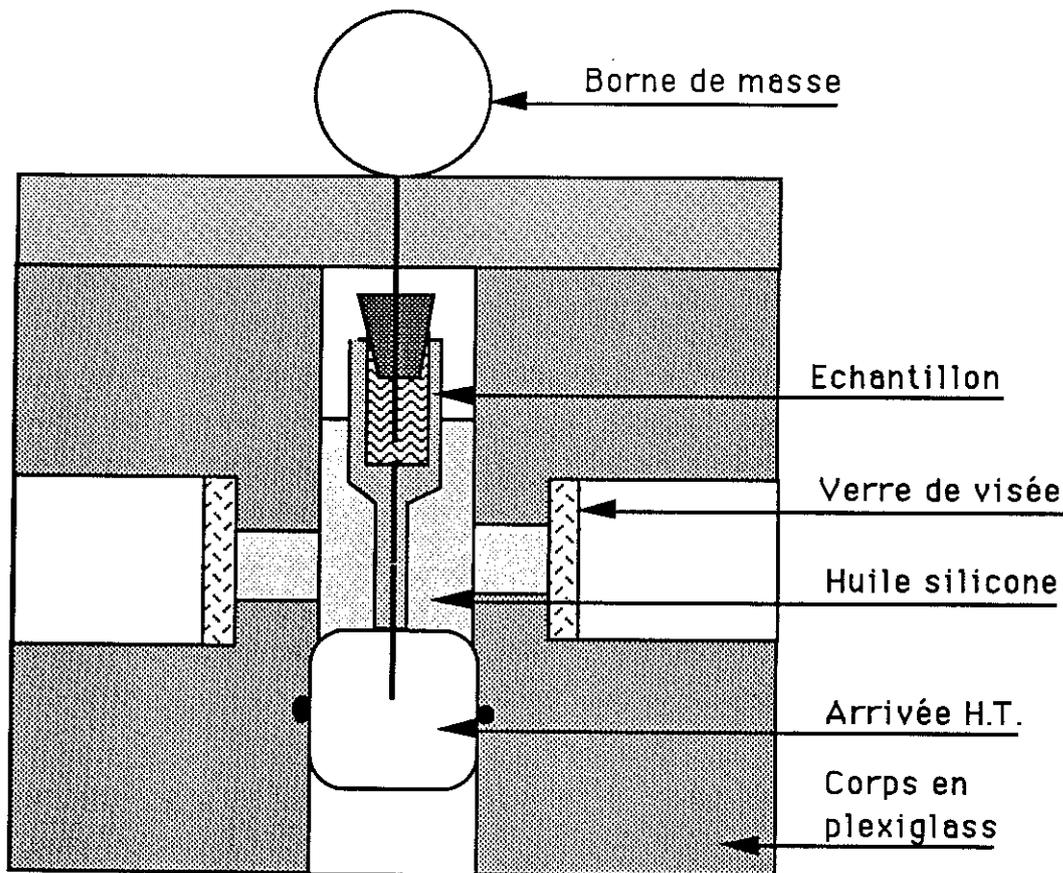


Figure 11: la cellule de mesure.

La cellule de mesure est reliée au transformateur haute tension par une résistance de protection. Elle est en contact avec le microscope à travers un tube isolant.

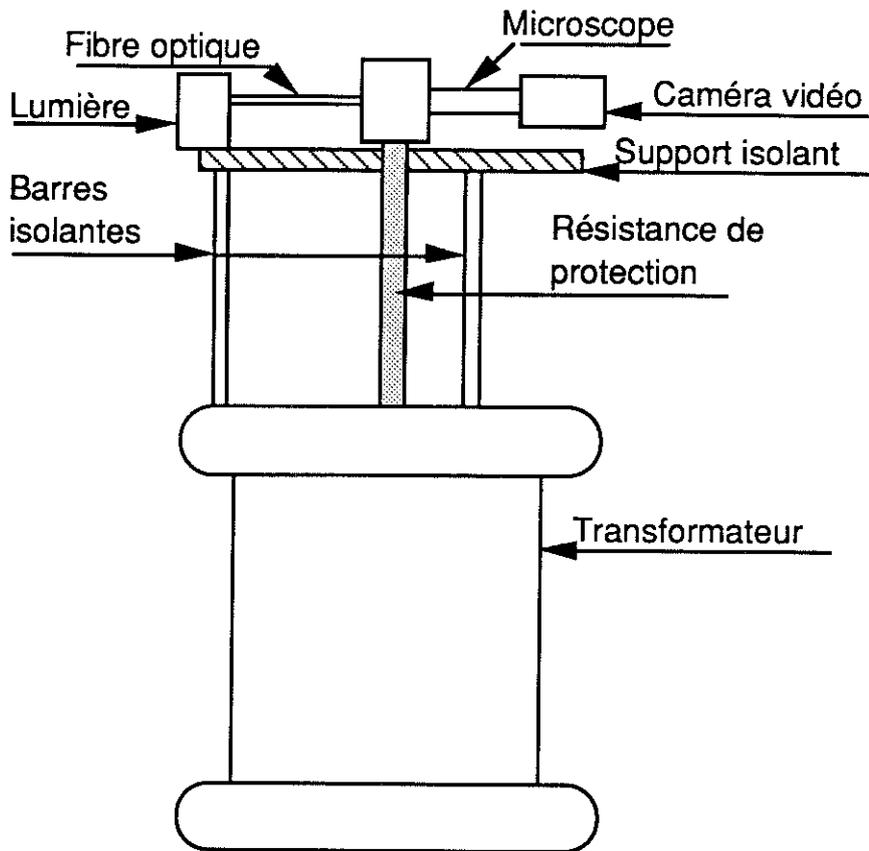


Figure 12 :L'ensemble transformateur, cellule de mesure et visualisation.

d-Production de la haute tension

Le dispositif de production de la haute-tension est en tous points identique à celui utilisé pour les essais de tenue diélectrique, décrit au paragraphe 1.4. de ce chapitre. Il n'en diffère que par la qualité de ses éléments : le transformateur haute tension est un transformateur de grande qualité d'isolation de façon à éviter qu'il ne soit le siège de décharges partielles. La commande de l'accroissement de la tension est manuelle.

L'amplitude de la tension est accrue de 1kV par minute. Les paliers de tension sont donc fortement réduits par rapport à la procédure utilisée pour les mesures de tension de rupture. La mesure de la haute tension est assurée par un voltmètre muni d'une sonde haute tension. La précision de la mesure est de 2%.

REFERENCE DU CHAPITRE DEUX.

- [1] A.T. BULINSKI, S.S. BAMJI, R.J. DENSLEY,
IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-21 N° 4, August 1986 p. 645.
- [2] R.M. EICHORN, IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-12 N° 1, February 1976, 2.
- [3] J.C. FILIPINI and C.T. MEYER,
IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 23 N° 2, April 1988 p. 275.

1.DEFINITION DE LA PROBLEMATIQUE.

Il s'agit dans un premier temps de vérifier si, oui ou non, la présence d'une arborescence d'eau affaiblit la tenue diélectrique d'échantillons de polyéthylène en configuration pointe-plan.

Nous tenterons dans un deuxième temps d'interpréter le résultat du test proposé.

2.LA PROCEDURE EXPERIMENTALE.

C'est un procédure différentielle:

La première étape consiste à mesurer la tension de rupture d'un lot d'éprouvettes de polyéthylène vierges comprenant une pointe d'eau, et en contact avec un plan conducteur. Ces éprouvettes constitueront la référence.

La seconde étape consiste à mesurer la tension de rupture d'un lot d'éprouvettes contenant des arborescences d'eau.

Dans un troisième temps, les tensions de rupture des deux populations précédentes sont comparées entre elles.

3.LE MODE DE PRESENTATION DES RESULTATS.

La rupture diélectrique est un phénomène en partie aléatoire. Nous nous intéresserons donc à la distribution statistique des valeurs de tension mesurées pour une population donnée. Cette distribution sera présentée sous forme d'histogrammes représentant: soit le nombre d'occurrences n_i d'une valeur V_i de tension de rupture mesurée, soit la fréquence statistique de cette tension définie comme le rapport du nombre précédent aux nombre total d'éprouvettes testées:

$$\text{Fréq. stat.} = \frac{n_i}{\sum n_i}.$$

En fait, étant donné le faible nombre d'essais, les valeurs de tension portées en abscisse de l'histogramme seront regroupées en classe de tensions.

La distribution statistique sera, le cas échéant, également caractérisée par

sa valeur moyenne et son écart type estimé. Ces deux grandeurs permettront également de définir éventuellement un intervalle de confiance pour la valeur moyenne calculée, en utilisant la loi de Student-Fisher [3].

4.PRESENTATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX.

4.1.Essais de tenue diélectrique effectués sur des éprouvettes sans arborescence d'eau.

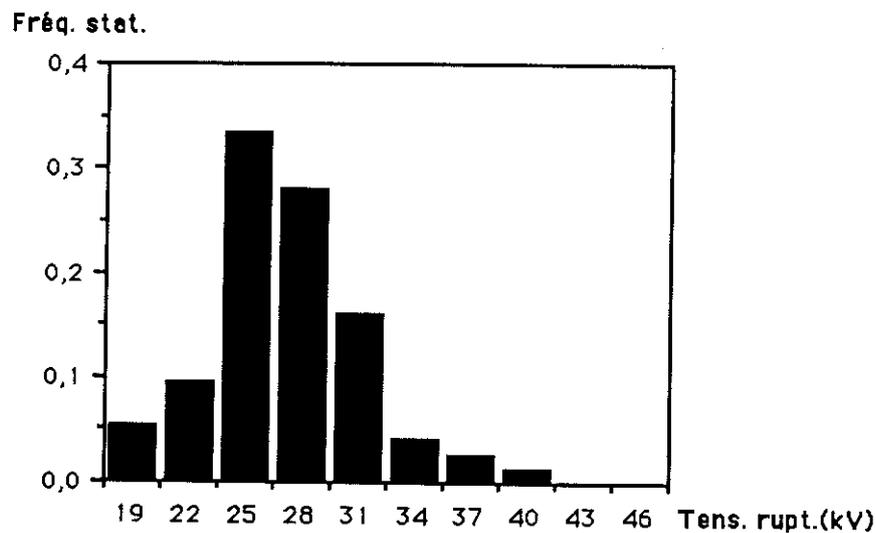


Figure 1: Fréquences statistiques des résultats d'un test de tenue diélectrique effectué sur 75 éprouvettes de référence. En abscisse la valeur de tension de rupture mesurée, en ordonnée la fréquence statistique de cette valeur.

La valeur moyenne de la tension de rupture est de 26,9kV, l'écart type de 4kV, ce qui permet de définir un intervalle de confiance à 95% pour cette valeur moyenne de [26kV; 27,8kV]

Un test réalisé ultérieurement au laboratoire dans des conditions identiques et sur un lot de 10 éprouvettes identiques, mais par un autre expérimentateur, R. BOUZERARA [4] donne une tension moyenne de claquage de 26kV.

4.2. Résultats du test de tenue diélectrique réalisé sur 46 éprouvettes contenant des arborescences d'eau.

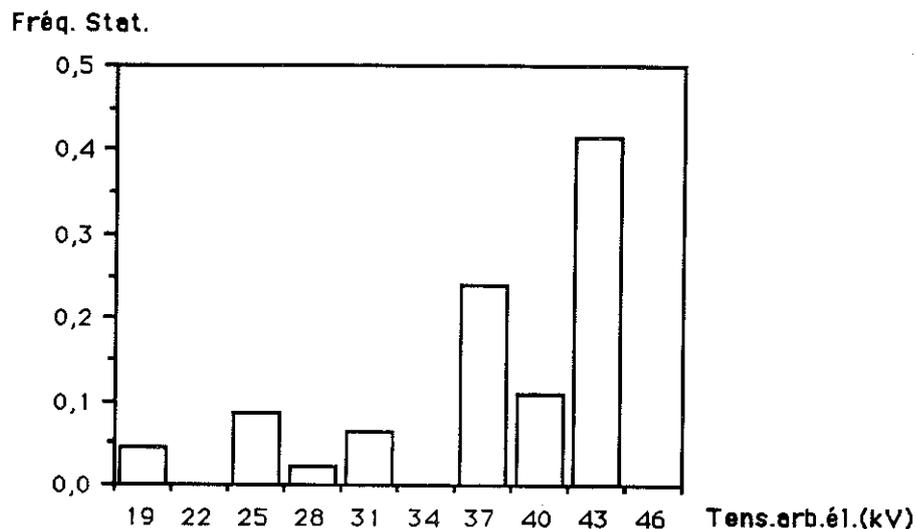


Figure 2 : Fréquences statistiques des mesures de tension de rupture, effectuées sur 46 éprouvettes contenant des arborescences d'eau, et réparties en classes de 3 kV.

Comme on peut le constater cette population est beaucoup plus dispersée que la population de référence. Par ailleurs cette population est très hétérogène et la distribution n'est, à l'évidence, pas gaussienne. Cela n'a rien de surprenant en soi, car les arborescences, contenues dans les éprouvettes actuellement soumises au test, ne sont pas toutes identiques. Elles constituent donc une source de diversification et d'hétérogénéité pour la tenue diélectrique.

4.3. Comparaison des résultats de tenue diélectrique obtenus avec arborescences d'eau aux résultats de référence.

On a regroupé sur un même graphe les deux distributions réparties en classes de 3kV : celle relative aux éprouvettes avec arborescence d'eau et celle relative aux éprouvettes de référence.

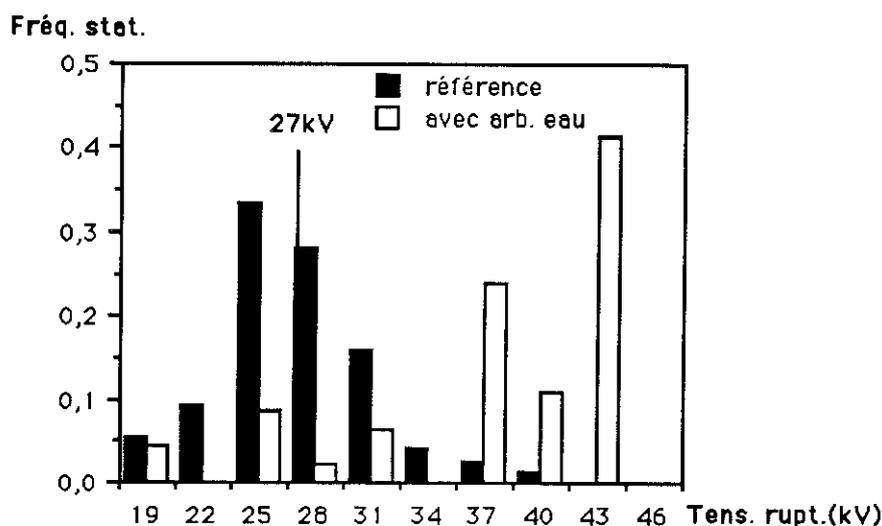


Figure 3: Fréquences statistiques des mesures de tension de rupture effectuées sur 46 éprouvettes contenant des arborescences d'eau et sur les éprouvettes de référence.

Les deux populations ne sont pas vraiment séparées, elles se recouvrent partiellement. Par ailleurs on ne peut comparer leurs valeurs moyennes. En effet la définition d'une valeur moyenne des tensions de rupture pour la population d'éprouvettes avec arborescences n'a guère de sens étant donnée l'hétérogénéité de cette population. Il semble plus judicieux de comparer les fréquences statistiques cumulées, c'est à dire la probabilité qu'une tension de rupture soit inférieure à une valeur donnée ou au contraire la probabilité qu'une tension de rupture soit supérieure à une valeur donnée.

On peut remarquer d'abord que la population de référence est située principalement du côté des plus faibles tensions. Le graphe des fréquences statistiques cumulées montre en effet que 90% des éprouvettes de référence ont des tensions de rupture comprises entre 18 et 30kV.

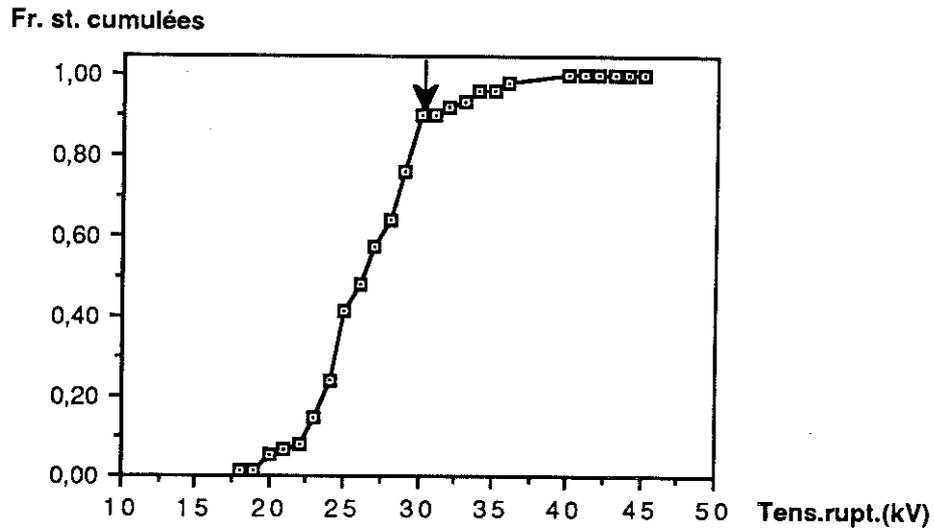


Figure 4: Fréquences statistiques cumulées des tensions de rupture de référence, en partant des plus faibles vers les plus élevées. La flèche indique la tension (30kV) à partir de laquelle 90 % des effectifs sont atteints.

La population contenant des arborescence d'eau occupe majoritairement la région des plus fortes valeurs de tension. Le calcul des fréquences statistiques cumulées montre que 78% des tensions de rupture sont situées entre 36 et 44kV. Le reste des tensions de rupture est situé dans la zone des tensions de référence.

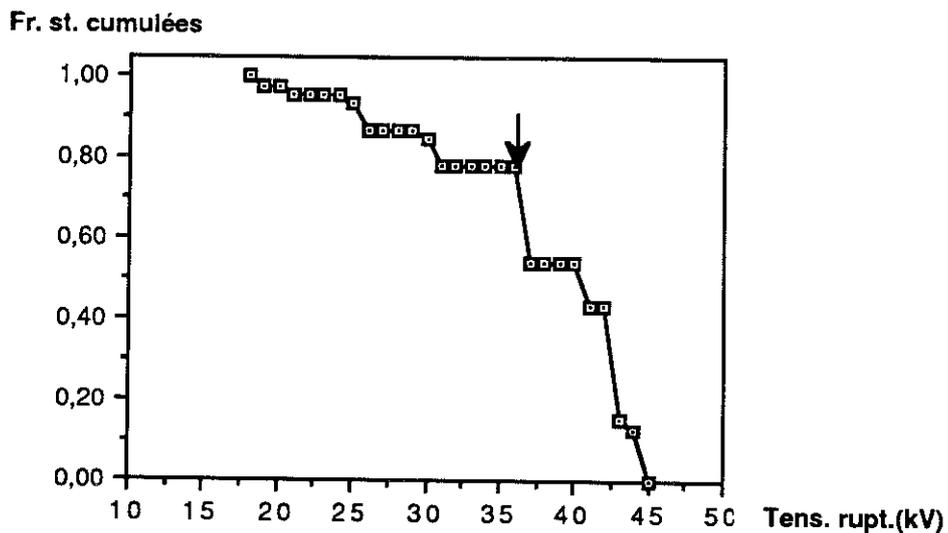


Figure 5: Fréquences cumulées des tensions de rupture d'éprouvettes avec arborescence, en allant des tensions les plus élevées aux plus faibles. La flèche indique la tension (36kV) au dessus de laquelle se trouve situés 78% des effectifs.

On en conclut que statistiquement, l'arborescence d'eau élève la tension de rupture de l'échantillon. Ce constat va bien au delà de l'affirmation de l'innocuité des arborescences d'eau. Il revient à conclure que ces arborescences peuvent dans certains cas neutraliser le danger de rupture diélectrique occasionné par le défaut qui leur a donné naissance.

Le constat précédent laisse entier la question de l'hétérogénéité des résultats obtenus. Cette hétérogénéité pourrait avoir pour origine la longueur des arborescences qui varie de 200 à 440 μm . D'où l'idée de classer les tensions de rupture en fonction de la longueur des arborescences.

4.4. Incidence de la longueur des arborescences d'eau sur la tenue diélectrique.

Il y a deux manières au moins de présenter les résultats des tests de tenue diélectrique en relation avec la longueur des arborescences. On peut mettre en relation chaque tension mesurée avec la longueur de l'arborescence de l'éprouvette testée. On peut aussi répartir l'ensemble des éprouvettes en sous groupes suivant la longueur des arborescences contenues.

4.4.1. Présentation globale des résultats en fonction de la longueur:

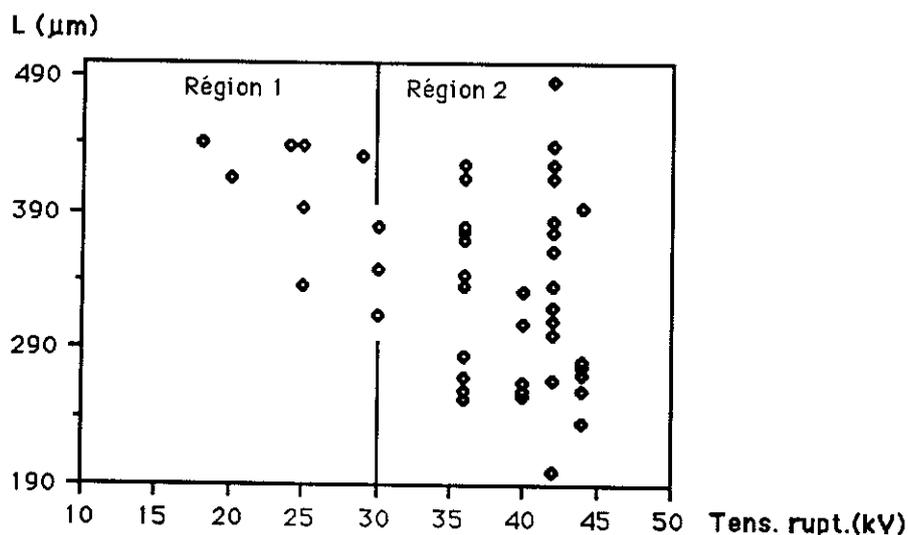


Figure 6: Répartition de 46 tensions de rupture selon la longueur des arborescences.

Deux parties distinctes apparaissent nettement sur le graphique précédent. Dans la région 1, la répartition des points expérimentaux pourrait laisser croire

que la tension de rupture décroît quand la longueur des arborescences croît. Mais la région 2 interdit de le penser. Elle établit clairement que la tension de rupture mesurée ne dépend pas de la longueur de l'arborescence dans la grande majorité des cas.

Ce dernier point est encore mieux illustré en ajoutant aux résultats précédents d'autres mesures effectuées ultérieurement au laboratoire, dans des conditions expérimentales en tous points identiques, (la tension de référence en l'absence d'arborescence étant pratiquement la même cf 4.1) par R. BOUZERARA [4]. Ces mesures sont effectuées sur 10 éprouvettes semblables aux précédentes, mais contenant des arborescences de 138 à 164 μm de longueur.

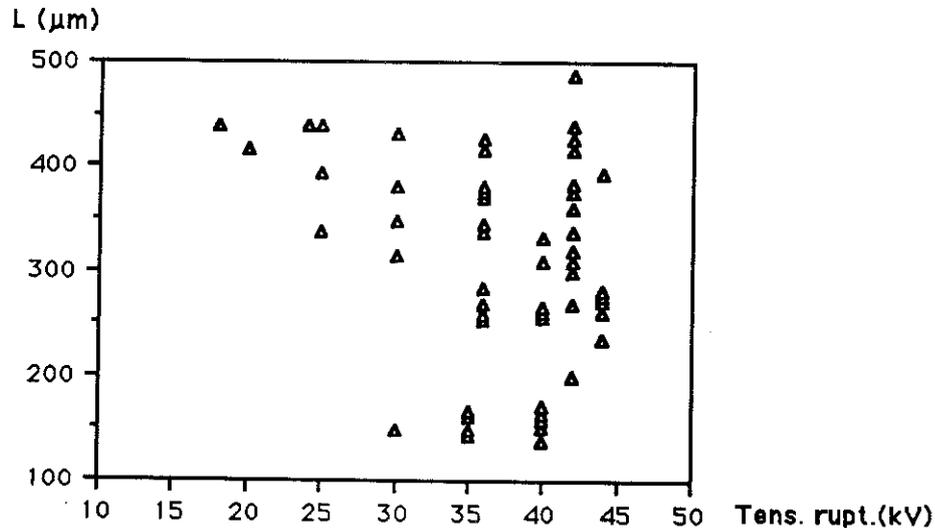


Figure 7: Répartition de 56 tensions de rupture selon la longueur des arborescences.

Il apparaît nettement que, dans l'intervalle 30 à 42kV, qui contient 80% des effectifs la longueur de l'arborescence peut varier de façon très importante, parfois d'un facteur 3, sans que la tension de rupture soit modifiée.

Ce graphique illustre également le fait que le pourcentage de l'espace inter-électrode occupé par l'arborescence peut varier de 27 à 100% sans que la tenue diélectrique de l'éprouvette en soit affectée, en accord avec G. BAHDER et al. [5]. Ce simple constat est difficilement conciliable avec l'idée d'arborescences conductrices. Il est en accord avec des mesures de courants capacitifs, réalisées au laboratoire [6], concluant que l'arborescence d'eau se comporte plutôt comme un diélectrique que comme un conducteur.

4.4.2. Classement des éprouvettes selon les longueurs d'arborescence:

Nous avons cette fois divisé une population de 45 éprouvettes contenant des arborescences en trois classes en fonction de la longueur L des arborescences, répertoriées dans le tableau suivant:

	Effectif	Intervalle de longueur	L moyen	Tens.moy.
I	16	$235 \leq L \leq 315\mu\text{m}$	$L1 = 274\mu\text{m}$	39kV
II	18	$320 \leq L \leq 393\mu\text{m}$	$L2 = 360\mu\text{m}$	37kV
III	11	$416 \leq L \leq 486\mu\text{m}$	$L3 = 434\mu\text{m}$	33kV

Les tensions de rupture mesurées pour chaque classe ont été réparties en classe de 5kv et les distributions de fréquences statistiques obtenues sont représentées sur un même graphe.

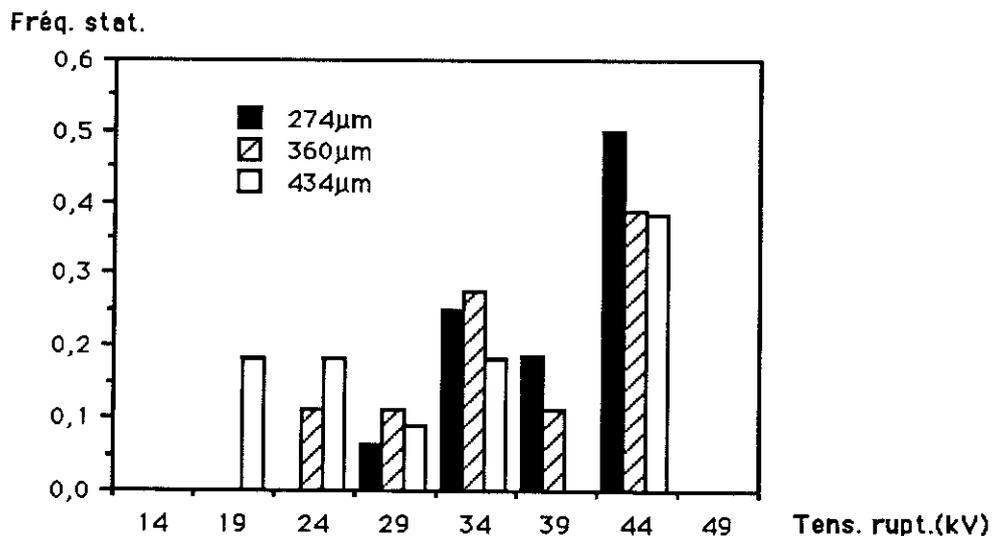


Figure 8: Histogrammes des tensions de rupture de 45 éprouvettes réparties en trois sous groupes selon la longueur des arborescences. Les longueurs indiquées sur le graphe sont les longueurs moyennes associées à chaque groupe.

A la lecture du graphe précédent, il apparaît que les trois distributions, du moins dans l'intervalle, 29, 44kV, présentent la même structure et sont très similaires. Ainsi le critère de la longueur ne permet pas d'éliminer l'hétérogénéité de la population testée.

Cependant, la comparaison des tensions moyennes des 3 classes pourrait laisser croire à une dépendance simple entre l'inverse de la longueur moyenne des arborescences et la tension de rupture. La lecture du tableau laisse apparaître en effet une légère croissance de la tension de rupture moyenne de 33 à 39kV lorsqu'on passe de la classe III, $L_3 = 474\mu\text{m}$ à la classe I, $L_1 = 274\mu\text{m}$. Si tel était le cas, pour les échantillons de référence, $L = 0$, la tension de rupture devrait être nettement supérieure à 39kV or il n'en est rien puisque $V_{\text{réf.}} = 27\text{kV}$. Il serait plus exact de dire que les arborescences les plus longues accroissent moins la tension de rupture, que les plus courtes.

La lecture du graphe montre par ailleurs que le passage d'une classe à une autre de longueur supérieure ne se traduit pas par un déplacement global de la population sur l'échelle des tensions qui serait significatif d'une corrélation entre longueur et tension. Le passage d'une classe à l'autre se traduit par un élargissement de cette distribution. Des valeurs de tensions plus faibles apparaissent mais en même temps les effectifs dans les très fortes valeurs de tensions de rupture restent importants.

Ces résultats sont donc en désaccord avec les observations de nombreux auteurs qui écrivent que «La tenue diélectrique des mini-câbles décroît quand la longueur des arborescences qui se développent à partir de la surface intérieure de l'isolant (du câble) s'accroît.»[7].

Dans notre cas, la longueur des arborescences, ne constitue pas un paramètre pertinent permettant de caractériser la tenue diélectrique des éprouvettes testées.

5. DISCUSSIONS DES RESULTATS PRECEDENTS

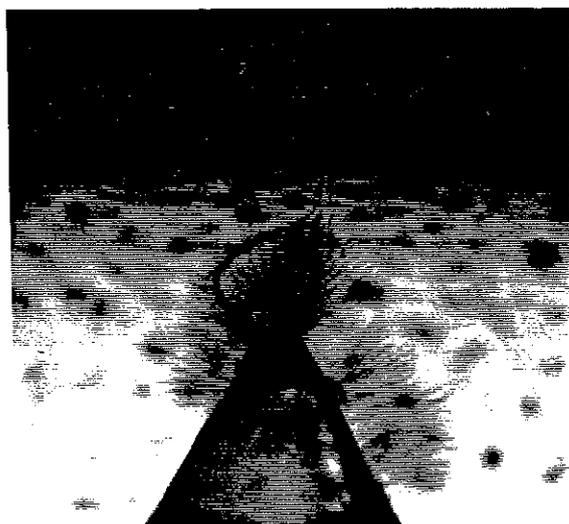
Pour résumer les observations précédentes on peut remarquer en premier lieu que la présence d'arborescences d'eau loin de simplifier le phénomène de la rupture en accroît la complexité.

Les échantillons sans arborescence présentent une certaine homogénéité vis à vis de la rupture diélectrique. Les échantillons avec arborescence répondent de façon très dispersée à un test de tenue diélectrique. Cette dispersion ne peut cependant pas s'expliquer par des différences de longueur d'arborescence.

Malgré cela les tests de tenue diélectrique permettent de répondre sans ambiguïté à la question qui les avaient motivés: la présence d'une arborescence d'eau accroît-elle, diminue-t-elle ou laisse-t-elle inchangée la tenue diélectrique du dispositif qui la contient?



Cliché n°1 : Contournement du sommet de la pointe par le canal inter-électrodes.



Cliché n°2 : Contournement de l'arborescence par le canal inter-électrodes.



Cliché n°3 : Liaison directe pointe-plan en l'absence d'arborescence.

A supposer que l'hypothèse précédente d'une atténuation du champ sur la pointe par l'arborescence d'eau, semblable à l'atténuation du champ due à l'eau, soit confirmée, cela n'impliquerait pas cependant l'identité des processus qui y conduisent.

6.2. L'origine de la diminution du champ électrique n'est pas la même dans les deux cas.

Dans le cas de l'eau, le nivellement du champ local sur la pointe est attribué [10,11], à un accroissement de la conductivité dû à la dissociation d'espèces ioniques, présentes sous forme d'impuretés dans le matériau, en champ fort. Dans le cas des arborescences d'eau, l'atténuation du champ à l'intérieur de l'arborescence peut être attribué non pas à un phénomène de conduction mais de polarisation. Les micro-cavités d'eau contenant des ions se comportent comme autant de dipôles dont le champ résultant s'oppose au champ extérieur. Ce phénomène est interprété au niveau macroscopique par un accroissement de la permittivité du matériau [6] .

Cela étant, il est nécessaire de calculer la permittivité de ce milieu et ensuite l'incidence de cet accroissement de permittivité sur la valeur du champ à la pointe pour évaluer la validité de l'hypothèse de la réduction du champ, par un effet de polarisation.

6.3. Evaluation de la réduction du champ sur la pointe induite par l'arborescence d'eau.

Pour évaluer la permittivité il faut des informations sur la quantité d'eau contenue dans l'arborescence.

6.3.1. Les données expérimentales disponibles.

Toutes les théories qui tentent de prédire la permittivité d'un milieu diélectrique hétérogène à deux composants ici le polyéthylène et l'eau conductrice, exprime la permittivité résultante du milieu en fonction du rapport volumique des deux composants. En toute rigueur, il est indispensable de connaître la quantité d'eau contenue dans le polyéthylène pour apprécier la permittivité du milieu. Dans notre cas, nous ne disposons d'aucune indication sur la quantité d'eau contenue dans les arborescences soumises au test de rupture diélectrique. Nous savons seulement d'après les travaux de J.L.CHEN [12] que la densité de micro-

cavités et donc la concentration en eau décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la pointe d'eau.

Sur le graphique suivant se trouve exprimée la concentration relative locale, C_D en fonction de la distance D , à laquelle on se trouve du sommet de la pointe.

$$C_D = N_D/N_0;$$

avec N_D = nombre de cavité par mm^3 , mesuré à la distance D de la pointe.

et N_0 = nombre de cavité par mm^3 , mesuré au sommet de la pointe.

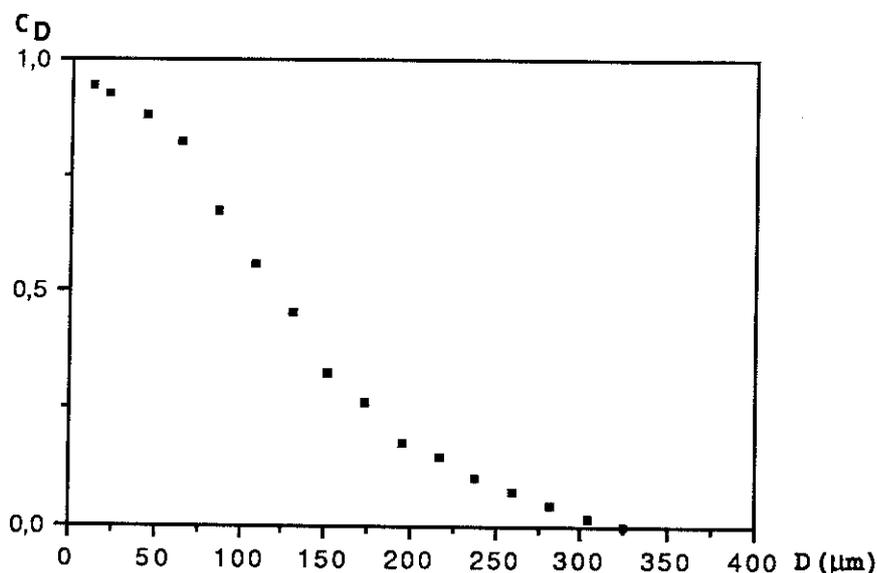


Figure 9: Densité relative de micro-cavités en fonction de la distance au sommet de la pointe d'eau, mesurée dans l'axe de la pointe, d'après [12] .

Nous savons aussi [13] que la densité maximale à proximité immédiate du sommet de la pointe peut être de l'ordre de 10^9 micro-cavités par mm^3 . Au vu de ces informations il n'est pas possible de prédire une valeur exacte de diminution du champ électrique sur la pointe. Notre objectif est seulement de montrer que l'hypothèse de la diminution du champ sur la pointe par un accroissement de permittivité constitue une solution acceptable et en accord avec certains résultats expérimentaux que nous avons présentés.

Dans le cas limite de la densité maximale de 1 cavité en moyenne par μm^3 , il y aura très probablement percolation entre les cavités. La région entourant la

pointe sera donc localement conductrice. Il n'est pas surprenant que dans ce cas, l'amorçage du claquage ne soit plus nécessairement localisé à la pointe puisque le maximum local du champ qui contrôlait le début de la rupture a disparu ou a été fortement réduit. Cependant rien ne dit que dans les arborescences mentionnées précédemment une telle densité maximale ait été toujours ou même souvent atteinte. Dans le cas où seule une fraction de la densité maximale est atteinte nous supposons qu'il n'y a pas conduction et nous pouvons envisager de calculer la permittivité du milieu et la diminution du champ à la pointe.

6.3.2. Deux modélisations de l'arborescence.

a-Le modèle proposé par J.L.CHEN.

A partir de la courbe de densité relative présentée Fig. 9, J.L.CHEN a proposé un calcul du champ [13] dans l'arborescence et en dehors de celle-ci. Il modélise la variation de la densité d'eau par une fonction affine et la configuration des électrodes et de la région de l'arborescence par des sphères concentriques. Ce modèle prédit effectivement la décroissance du champ sur la pointe pour les faibles longueurs de l'arborescence d'eau. Le renforcement de champ est maximum pour la plus courte longueur d'arborescence envisagée dans le modèle. La décroissance du champ sur la pointe diminue au fur et à mesure que l'arborescence croît. La décroissance du champ s'annule pour une longueur d'arborescence égale à 49 fois le rayon de la sphère centrale.

Ce modèle n'a pas d'équivalent à notre connaissance. Il paraît toutefois d'une exploitation difficile en raison de la complexité des calculs proposés. D'autre part, on peut se demander si la géométrie adoptée pour les équipotentielles est bien adaptée, le choix habituel pour modéliser la configuration pointe-plan est plutôt celui d'hyperboloïdes de révolution.

b-Une autre modélisation.

Pour notre part, nous avons proposé un calcul du champ basé sur les résultats expérimentaux de CHEN, mais en remplaçant:

1- La fonction affine par une fonction en escalier (cf fig. 10).

2-La géométrie sphérique des équipotentielles par une géométrie hyperboloïde, comme il est d'usage courant de le faire.

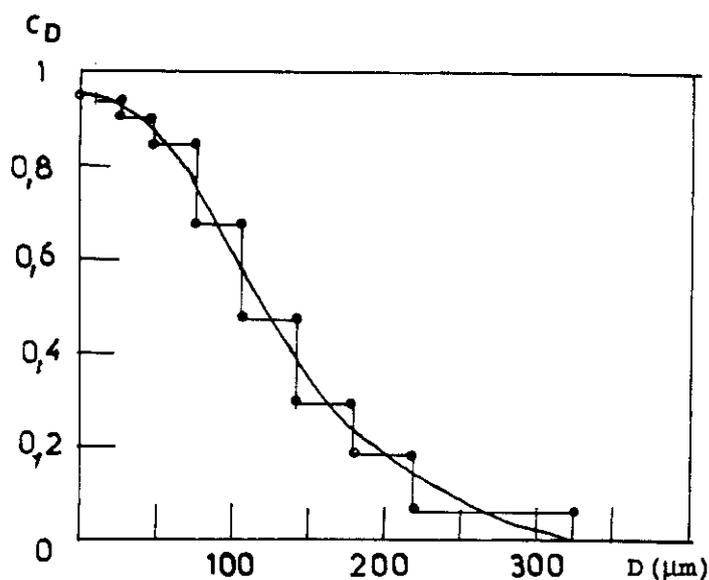


Figure 10: Approximation de la courbe expérimentale de Chen par une fonction en escalier.

Sans entrer dans le détail du calcul de la répartition des potentiels en configuration pointe-plan qui est présenté en annexe, les résultats qui nous intéressent ici sont les suivants:

1-L'arborescence entraîne une diminution du champ sur la pointe.

2-Cette diminution est fonction essentiellement de la concentration en cavités C_0 à l'extrémité de la pointe d'eau.

3- La longueur de l'arborescence intervient mais elle a moins d'importance que la concentration maximale à l'extrémité de la pointe d'eau. Comme dans le modèle de CHEN, à concentration fixée, les arborescences les plus courtes entraînent la plus forte diminution du champ.

Ce dernier point qui paraît surprenant et même paradoxal peut se comprendre à partir d'un cas limite: celui d'un diélectrique homogène occupant tout l'espace inter-électrode. Dans ce cas précis, il n'y a aucune modification dans la répartition des potentiels, et par suite, aucune atténuation du champ sur la pointe.

A titre d'illustration, voici quelques valeurs calculées de diminution du champ pour différentes valeurs de la concentration de l'eau à la pointe et trois longueurs d'arborescences.

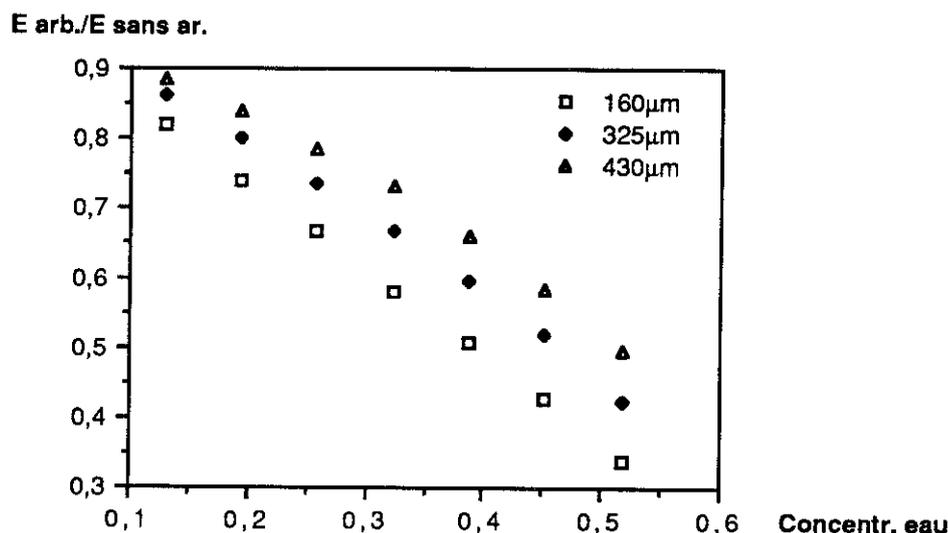


Fig.11: Diminution calculée du champ à la pointe en fonction de la concentration en eau à la pointe et pour trois longueurs d'arborescences.

Sur la base de ce modèle, il est possible de calculer la tension de claquage moyenne attendue, sous réserve que le claquage soit commandé par la pointe, et que le champ seuil de claquage reste inchangé par l'arborescence.

$$V_{\text{calc.}} = \frac{V_{\text{réf}}}{k}$$

avec $V_{\text{réf}} = 26,9\text{kV}$ et k coefficient d'atténuation du champ calculé.

Les tensions de rupture calculées sont présentées sous forme d'un tableau à deux entrées: la concentration à la pointe et la longueur des arborescences limitée à 3 valeurs, les valeurs sont données en kV.

Concentr. eau:	0,52	0,45	0,39	0,32	0,26	0,19	0,13
Longueur:							
L1 = 160µm				46,5	40,4	34,2	32,9
L2 = 325µm	63,7	51,9	45,1	40,8	36,5	33,7	31,2
L3 = 430µm	54,6	46,1	40,7	36,8	34,2	32,1	30,5

Dans ce tableau, les valeurs de tension, correspondant à des concentrations supérieures à 0,32 n'ont pas été calculées pour la longueur de $160\mu\text{m}$. Ces valeurs de concentration n'apparaissent en effet pas réalistes pour une arborescence de cette taille, les arborescences de faible longueur étant généralement peu denses.

Dans ces conditions les valeurs de tensions calculées pour des concentrations inférieures à 0,45 donnent des valeurs compatibles aux valeurs expérimentales comprises entre 18 et 46kV.

L'incidence calculée de la longueur de l'arborescence sur la tension de rupture est proche de celle constatée expérimentalement: entre 160 et $430\mu\text{m}$, la tension de rupture décroît légèrement quand la longueur d'arborescence croît.

6.4. Conséquence de l'atténuation du champ dans l'arborescence d'eau.

Si le champ est atténué au sein de l'arborescence, cette atténuation a nécessairement une contrepartie que nous avons ignorée jusque là. En supposant que la différence de potentiel entre les électrodes soit maintenue constante en présence et en l'absence d'arborescence d'eau, le champ moyen, rapport de la ddp à la distance inter-électrode, reste le même, qu'il y ait une arborescence d'eau ou non. Cela signifie que si le champ est diminué dans la région de l'arborescence par cette dernière, il est nécessairement accru à l'extérieur de l'arborescence d'eau.

Ce constat soulève aussitôt une nouvelle question: Comment se fait-il que cet accroissement du champ n'ait pas été perçu dans l'expérimentation précédente. Ce renforcement du champ aurait du logiquement conduire à un affaiblissement de la tenue diélectrique des éprouvettes dans la région du plan conducteur.

La réponse à cette question réside premièrement dans la comparaison des valeurs du champ sur la pointe et sur le plan, et deuxièmement dans la topologie des électrodes qui détermine précisément le rapport de ces deux valeurs.

En effet le champ sur le plan ne peut avoir d'incidence sur la rupture que s'il représente un maximum local du champ, car il est admis que la rupture s'amorce généralement là où le champ est le plus élevé. Or la géométrie des électrodes fait du champ sur le plan est non pas un maximum mais un minimum.

6.4.1. En l'absence d'arborescence d'eau le champ sur le plan est très inférieur au champ sur la pointe.

Le graphique suivant représente la valeur du champ sur l'axe, relativement à sa valeur à l'extrémité de la pointe, en fonction de la distance d à la pointe. Le calcul est fait en ignorant la charge injectée d'après E.DURAND [11].

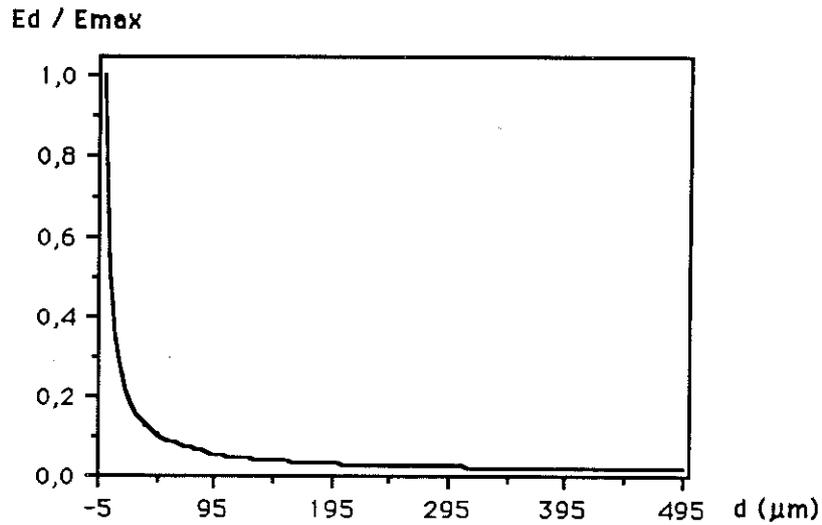


Figure 12: Valeur du champ sur l'axe par rapport à sa valeur maximale sur la pointe, en fonction de la distance d à la pointe. Le calcul est fait pour une pointe d'un rayon de $10 \mu\text{m}$ et une distance inter-électrode de $495 \mu\text{m}$.

Le champ à proximité du plan est dans ces conditions 50 fois plus faible que sur la pointe en l'absence d'arborescence d'eau.

6.4.2. La situation, en présence d'une arborescence d'eau.

La présence d'une arborescence d'eau atténuant le champ sur la pointe et renforçant le champ à proximité du plan modifie un peu le rapport de ces deux valeurs, mais on imagine facilement qu'il sera difficile de combler totalement l'écart initial qui les sépare.

Les valeurs maximales de tensions de rupture obtenues en présence d'une arborescence d'eau sont de 46kV pour une tension moyenne de référence de 27kV . Le rapport de ces deux tensions, $1,7$ nous donne une estimation de la valeur de l'atténuation du champ sur la pointe, dû à l'arborescence d'eau. Si nous supposons en faisant une évaluation grossière que le champ sur le plan est accru dans la même proportion, nous obtenons un facteur correctif de $3,4$ dans le rapport initial, en faveur du champ sur le plan. Cette correction bien insuffisante pour mettre en cause la hiérarchie établie par la géométrie entre les valeurs respectives du champ sur les électrodes, correspond au cas le plus fréquent.

Il est difficile de faire une estimation de la modification qui se produit lorsque la région entourant la pointe devient conductrice, cette situation revient

à modifier la forme d'une des électrodes et la courbure de la nouvelle équipotentielle est inconnue. Il n'est pas certain, cependant même dans ce cas, que le champ sur le plan soit supérieur à celui qui régnait à la frontière de la région conductrice.

En conclusion le champ sur le plan même accru par la présence d'une arborescence d'eau reste dans la quasi-totalité des cas, un minimum local du champ. Il en résulte que le renforcement du champ dans la région du plan n'a aucune conséquence pratique sur la rupture toujours contrôlée par la valeur du champ sur la pointe ou dans sa région. Le phénomène de renforcement de champ, pourtant bien réel, est donc complètement masqué par la dissymétrie dans la répartition spatiale du champ introduite par la géométrie des électrodes.

Les considérations précédentes conduisent naturellement à l'idée suivante: si l'on supprime la dissymétrie pointe-plan, en remplaçant le plan par une deuxième pointe, la dissymétrie entre les valeurs du champ sera supprimée également. On peut s'attendre à ce que, dans ces nouvelles conditions, le renforcement du champ sur l'électrode opposée à l'arborescence d'eau ait des conséquences sur la tenue diélectrique de l'échantillon et se traduise par un affaiblissement de la tension de rupture.

7. CONCLUSION.

Nous avons vu qu'en géométrie pointe-plan la présence d'une arborescence d'eau accroît significativement la tension de rupture. Mais l'interprétation que nous avons proposée de cet élèvement de la tenue diélectrique nous conduit à anticiper que la situation pourrait s'inverser complètement dans une géométrie différente.

Cette réflexion nous conduit à mettre en place une nouvelle procédure expérimentale en géométrie pointe-pointe qui modélise la situation dans laquelle un défaut renforçant le champ se trouve à l'extérieur d'une arborescence d'eau.

Cette procédure sera une occasion nouvelle de tester la validité de l'hypothèse d'un déplacement des potentiels électriques au sein de l'espace inter-électrode par l'arborescence d'eau.

Cette question fera l'objet du chapitre suivant.

REFERENCES DU CHAPITRE TROIS

- [1] A. BULINSKI, R.J. DENSLEY, IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-16 N° 4, August 1981 p. 319.
- [2] R.M. EICHORN, IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-12 N° 1, February 1976, 2.
- [3] M. MOREAU et A. MATHIEU,
Statistiques appliquées à l'expérimentation. Eyrolles. Paris 1979.
- [4] R. BOUZZERARA, Thèse de l'Université Joseph Fourier . Grenoble 1989.
- [5] G. BAHDER, G.S. EAGER, LUKAC,
1974 Ann. Rep. CEIDP, NAS, Whashington D. C. 1975, p.289.
- [6] J.Y. KOO, J.D. CROSS, M. EL-KAHEL, C.T. MEYER, J.C. FILIPINI,
Annual Report of the 1983 CEIDP, (NAS, Whashington), p. 301.
- [7] B.S. BERNSTEIN, N. SRINIVAS, P.N. LEE ,
Annual Report of the 1975 CEIDP, (NAS, Whashington), p. 296.
- [8] B.S. BERNSTEIN, Conference Record of 1984 IEEE International Syposium on
Electrical Insulation, Montreal, June, 1984,11.
- [9] R.D. NAYBOUR, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 6, N°5, Sept/Oct. 1990.
- [10] J.C. DEVINS and S.J. RZAD, 1975 Ann. Rep. CEIDP, NAS, Whashington D. C. 1975,
p.344.
- [11] R.PATSCH, 1975 Ann. Rep. CEIDP, NAS, Whashington D. C. 1975, p.323.
- [12] J.L. CHEN, J.C. FILIPINI, Y. POGGI, Conf. Record of the 1985 ICPADM, Xi'an, p.
366.
- [13] J.L. CHEN, J.C. FILIPINI, Y. POGGI, Conf. Record of the 1988 ICPADM, Beijing,
p.507.

[14] J.L.CHEN, Rapport de recherche non publié.

[15] A.T. BULINSKI, S.S. BAMJI, R.J. DENSLEY, Conference Record of the 1988 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA, June, p. 327.

CHAPITRE QUATRE

**ETUDE DE L'INCIDENCE D'UNE
ARBORESCENCE D'EAU SUR LA TENUE DIELECTRIQUE
D'EPROUVETTES DE POLYETHYLENE EN PRESENCE D'UN
DEFAUT EXTERIEUR A L'ARBORESCENCE.**

(Configuration pointe-pointe)

1.INTRODUCTION.

1.1.Le renforcement du champ en configuration pointe-pointe.

Nous avons vu à la fin du chapitre précédent que le remplacement du plan par une pointe métallique rétablissait l'équilibre entre les valeurs du champ sur les deux électrodes. Cette situation est illustrée sur la figure suivante qui donne les valeurs calculées du champ sur l'axe dans une configuration parfaitement symétrique.

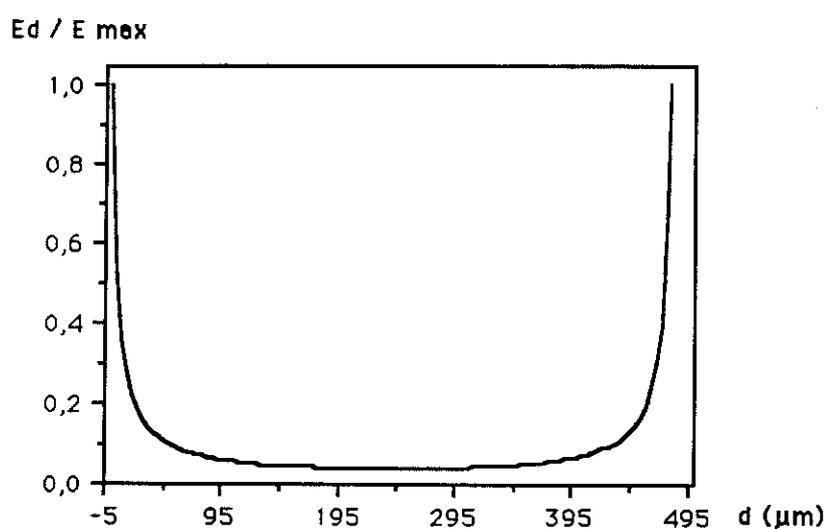


Figure 2: Valeur du champ sur l'axe par rapport à sa valeur maximale, en fonction de la distance d à l'une des pointes. Le calcul est fait pour deux pointes d'un rayon de $10 \mu m$ séparées de $480 \mu m$.

Dans ces conditions, si l'hypothèse de la perturbation de la répartition spatiale des potentiels par l'arborescence d'eau est vérifiée, nous aurons à nouveau un accroissement du champ en face de l'arborescence d'eau, accompagnant une réduction du champ dans la région de l'arborescence d'eau.

Mais à la différence de la situation précédente en géométrie pointe-plan, le champ de référence, sur la pointe métallique en l'absence d'arborescence d'eau, est un maximum local du champ.

Par suite le renforcement du champ en face de l'arborescence d'eau se traduit cette fois-ci par un accroissement du champ maximum existant en l'absence d'arborescence d'eau, au sein de l'espace inter-électrode.

Si l'arborescence était entièrement conductrice, le potentiel du plan médian serait porté de $V/2$ à V et le champ sur la pointe métallique doublé. Ce n'est pas l'hypothèse que nous avons envisagée, du moins dans le cas le plus fréquent.

Supposons alors que la différence de potentiel entre la pointe d'eau ne soit pas annulée mais seulement divisée par deux en raison de l'accroissement de la permittivité dans l'arborescence d'eau, le potentiel du plan médian sera dans ce cas porté de $V/2$ à $3V/4$ et l'accroissement du champ sur la pointe métallique sera dans ce cas de 50%. Un tel accroissement de champ devrait pouvoir être détecté.

Nous présentons maintenant les tentatives expérimentales entreprises pour vérifier, l'hypothèse précédente d'un effet de renforcement du champ électrique en face de l'arborescence d'eau.

Cette vérification expérimentale s'est avérée plus délicate que prévue et a nécessité pour aboutir deux essais qui sont décrits successivement.

2. LA PROCEDURE EXPERIMENTALE.

Il s'agit d'une procédure différentielle comme en géométrie pointe-plan. Un premier lot d'éprouvettes ne contenant pas d'arborescence d'eau est soumis à un test de tenue diélectrique, les valeurs de tension de rupture obtenues fourniront la référence. Un deuxième lot d'éprouvettes identiques sert à la production d'arborescences d'eau. Les éprouvettes contenant des arborescences d'eau sont ensuite soumises au même test de tenue diélectrique que les précédentes. Les valeurs des tensions de rupture obtenues sont ensuite comparées entre elles.

Le remplacement du plan par une pointe introduit un nouveau degré de liberté: le rayon de courbure de la deuxième électrode.

2.1. Le choix du rayon de courbure de la pointe métallique.

Le raisonnement qui a guidé le choix du rayon de courbure de la pointe métallique a été le suivant: plus le champ sera élevé sur la pointe métallique, plus l'effet de renforcement de champ attribué à l'arborescence d'eau sera manifeste. L'idée est que le renforcement de champ se traduisant par un coefficient multiplicatif, plus la valeur absolue du champ sera importante au départ et plus le renforcement de champ entraînera un accroissement important et donc facile à détecter. Ce raisonnement a priori se révélera en partie inexact par la suite.

D'un autre côté, il ne faut pas que le champ soit trop élevé. Dans ce cas, il pourrait entraîner l'apparition d'arborescence électrique pendant la croissance des arborescences d'eau. En définitive une valeur de compromis de $5\mu\text{m}$ a été initialement retenue. Cette valeur s'est trouvée involontairement modifiée, la valeur annoncée par le fabricant de $5\mu\text{m}$ correspondant en fait à une valeur de $3,5\mu\text{m}$. Par la suite une nouvelle valeur de $6,5\mu\text{m}$ a été choisie se rapprochant du choix initial, il en est résulté l'emploi de deux valeurs distinctes de rayon de courbure pour les tests de tenue diélectrique.

La distance de $500\mu\text{m}$ pour l'espace inter-électrode utilisée en géométrie pointe-plan a été conservée dans la nouvelle géométrie.

La production des arborescences d'eau dans les conditions nouvelles créées par la géométrie pointe-pointe a suscité des difficultés qu'il semble nécessaire de rappeler ici dans la mesure où elle peuvent mettre en cause la validité des résultats obtenus.

2.2.L'obtention des arborescences d'eau avec des pointes de $3,5\mu\text{m}$ de courbure.

La procédure initiale est celle suivie en géométrie pointe-plan. Des éprouvettes contiennent une pointe d'eau d'un rayon de courbure de $10\mu\text{m}$ et une électrode métallique d'un rayon de courbure nominal de $3,5\mu\text{m}$. Une tension alternative de fréquence 1500Hz , d'une amplitude crête de 8kV est ensuite appliquée entre la pointe d'eau et l'aiguille métallique qui lui fait face. L'application de cette tension est maintenue pendant une durée suffisante, plusieurs centaines d'heures, pour obtenir des arborescences de grandes dimensions relativement à l'espace inter-électrode c'est à dire de 250 à $450\mu\text{m}$.

La tension de 8kV s'est toutefois rapidement révélée excessive car elle entraînait l'apparition d'une arborescence électrique sur l'extrémité de l'électrode métallique, pendant la croissance des arborescences d'eau. Cette tension a donc été réduite à 6kV .

Il était indispensable de trouver une solution pour empêcher l'apparition d'une arborescence électrique pendant la croissance des arborescences d'eau tout en utilisant les éprouvettes déjà fabriquées. Cette solution a consisté à remplacer l'électrode métallique pendant la croissance des arborescences d'eau par une autre électrode métallique d'un rayon de courbure de $20\mu\text{m}$. L'opération inverse, le remplacement de l'électrode de $20\mu\text{m}$ de rayon de courbure par l'électrode

originelle, était effectuée ensuite avant le test de tenue diélectrique, suivi d'un contrôle de l'état de l'interface.

3.RESULTATS EXPERIMENTAUX

3.1.Résultats expérimentaux obtenus avec des électrodes d'un rayon de courbure de $3,5\mu\text{m}$.

Comme précédemment nous présentons d'abord les résultats des mesures de tenue diélectrique de référence obtenus avec des éprouvettes sans arborescences d'eau, puis les tensions de rupture en présence d'arborescences.

3.1.1. Mesures de référence.

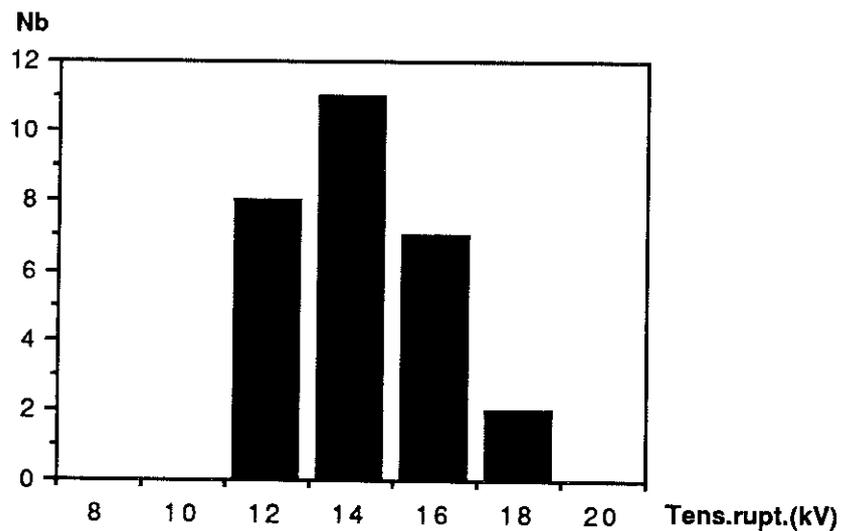


Figure 6: Histogramme des tensions de rupture. 28 échantillons de référence, contenant une pointe d'eau de $10\mu\text{m}$ et une pointe métallique de $3,5\mu\text{m}$.

La valeur moyenne estimée est de $14,2\text{kV}$, l'écart type estimée de $1,8\text{kV}$, la valeur moyenne est connue avec une probabilité de 95% avec une incertitude de $0,7\text{kV}$.

3.1.2. Mesures de la tension de rupture d'éprouvettes contenant des arborescences.

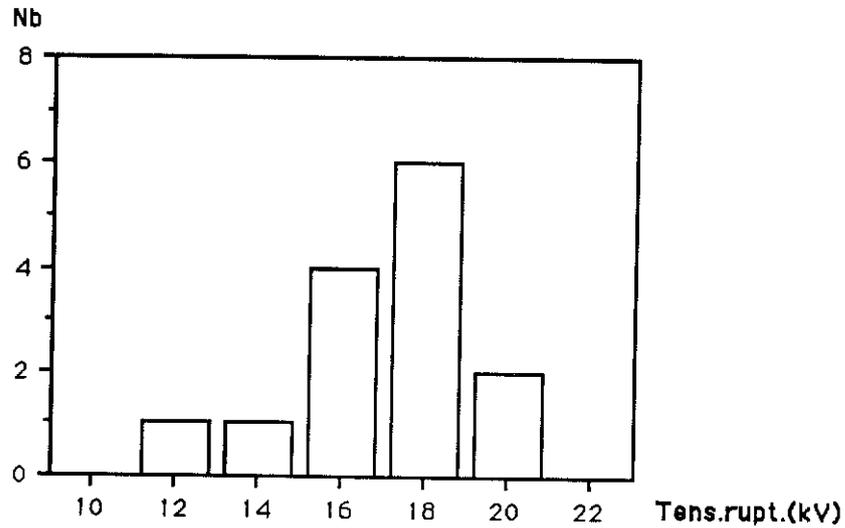


Figure 7: Histogramme des tensions de rupture. 14 échantillons contenant une arborescence d'eau et une pointe métallique de $3,5 \mu\text{m}$.

La moyenne estimée est de $17,4\text{kV}$, l'écart type estimé de $2,4\text{kV}$. La moyenne est connue avec une incertitude de $1,3\text{kV}$, avec une probabilité de 95%.

3.1.3. Comparaison des tensions de rupture des éprouvettes contenant des arborescences aux tensions de référence.

Sur un même graphe sont réunis les distributions en fréquence des tensions de rupture des deux groupes d'éprouvettes.

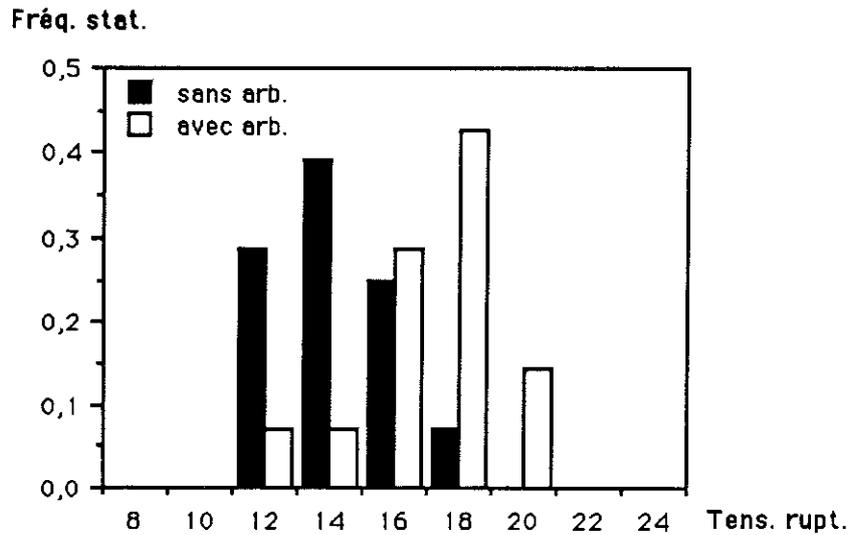


Figure 8: Fréquences statistiques des tensions de rupture. 28 échantillons de référence et 14 échantillons contenant une arborescence d'eau .

Les intervalles de confiance à 95% sont respectivement de [13,5kV;14,9kV] pour la population de référence et de [16,1kV;18,7kV] pour la population contenant des arborescences d'eau. Les deux intervalles sont séparés. La présence d'une arborescence d'eau accroît dans ce cas la tension de rupture de 22%.

3.2. Résultats obtenus avec des électrodes de 6 μ m de rayon de courbure.

La procédure d'obtention des arborescences d'eau est différente de celle adoptée pour les électrodes de 3,5 μ m de rayon de courbure. La pointe métallique de 6 μ m est laissée à demeure pendant toute la croissance de l'arborescence d'eau soit environ 300 heures, et la procédure d'établissement de la référence doit en tenir compte. En effet à priori il ne semble pas logique de comparer d'une part des échantillons vierges qui n'ont jamais subi le champ électrique et d'autre part des échantillons qui pendant trois cents heures ont subi le champ électrique présent à l'extrémité de la pointe métallique de 6 μ m.

Pour vérifier l'existence d'un éventuel vieillissement, nous avons soumis une partie de la population de référence à un champ équivalent pendant une durée équivalente à celle de la croissance des arborescences d'eau, avant les tests de tenue diélectrique. L'autre partie a subi le test immédiatement après fabrication. Les résultats des tests ont ensuite été comparés.

Pour ce faire, et afin d'éviter de développement d'arborescences d'eau, la pointe d'eau est remplacé dans toutes les éprouvettes de référence par un pointe métallique de même rayon de courbure, $10\mu\text{m}$.

3.2.1. Mesures de référence.

En premier lieu voici les résultats obtenu avec des éprouvettes ayant été soumises au champ électrique pendant plusieurs centaines d'heures:

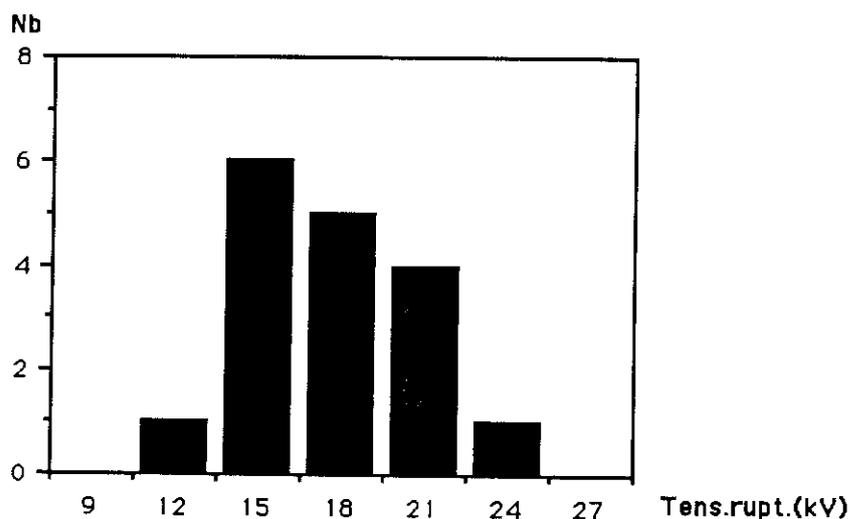


Figure 9: Histogramme des tensions de rupture. 17 éprouvettes soumises au champ électrique pendant 270 heures, contenant une pointe métallique de $10\mu\text{m}$ et une pointe métallique de $6\mu\text{m}$.

La valeur moyenne de la tension de rupture est de 18kV. L'intervalle de confiance à 95% pour cette valeur moyenne est de [16,5kV, 19,5kV].

Un deuxième groupe d'éprouvettes vierge est soumis au même test.

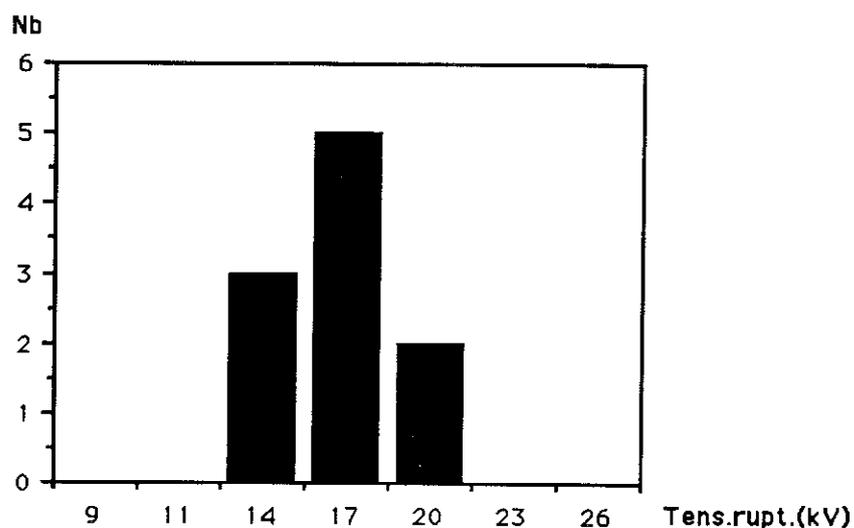


Figure 10: Tensions de rupture de 10 échantillons, non soumis au champ électrique, contenant une pointe métallique de $10\mu\text{m}$ et une autre de $6\mu\text{m}$ de rayon de courbure.

La valeur moyenne estimée de la tension de rupture est de $16,6\text{kV}$. L'écart type estimé est de $2,3\text{ kV}$. Il n'y a donc pas de différence significative entre les deux distributions du point de vue de leurs valeurs moyennes. La seconde est seulement moins dispersée. Ces mesures ne font pas apparaître un phénomène de vieillissement.

3.2.2. Mesures de la tension de rupture d'éprouvettes contenant des arborescences.

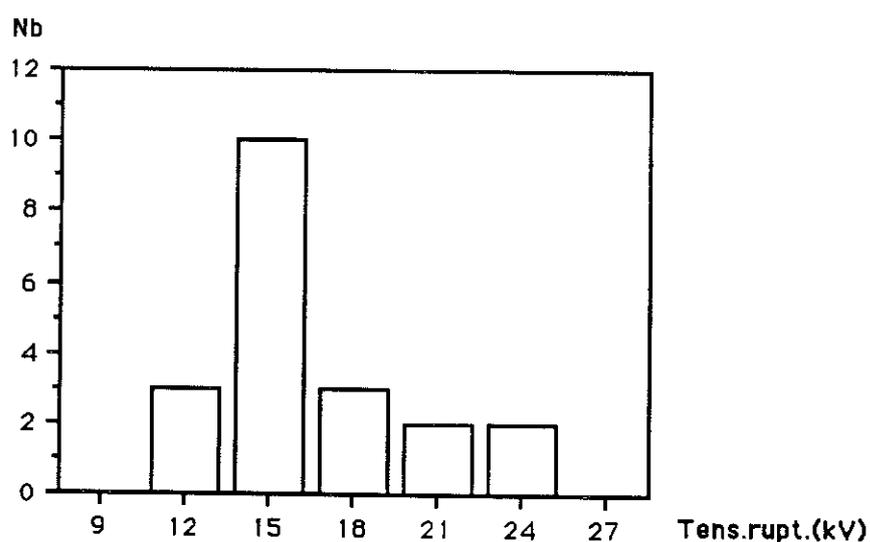


Figure 11: Histogramme des tensions de rupture. 20 échantillons contenant une arborescence d'eau et une pointe métallique de $6\mu\text{m}$ de rayon de courbure.

La tension moyenne de rupture estimée est de 17kV. L'écart type est de 3,58kV. L'intervalle de confiance à 95% pour la valeur moyenne est de [15,4kV,18,6kV].

3.2.3. Comparaison des tensions de rupture des éprouvettes contenant des arborescences aux tensions de référence.

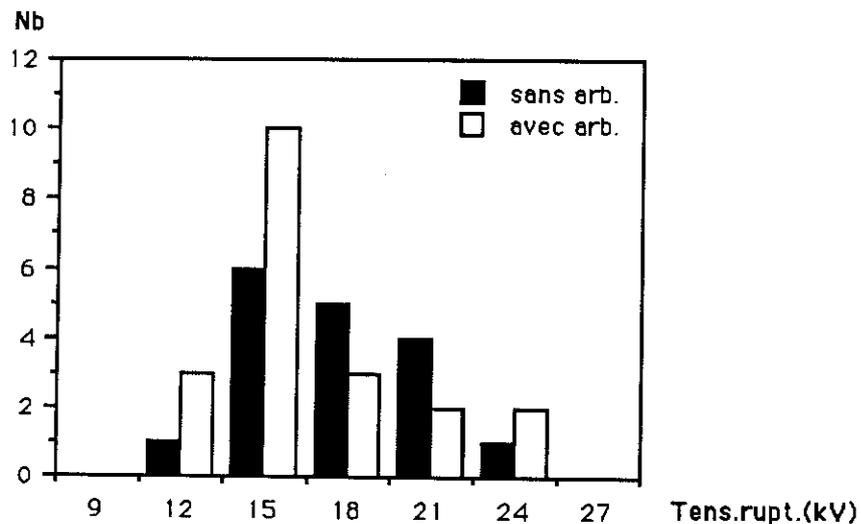


Figure 12: Tensions de rupture de 17 éprouvettes de référence et de 20 éprouvettes avec arborescence, comportant toutes une contre-électrode de $6\mu\text{m}$ de rayon de courbure.

La comparaison de l'intervalle de confiance de la moyenne des tensions avec arborescence [15,4kV;18,6kV] avec celui de la moyenne des tensions de référence: [16,5kV; 19,5kV] montrent qu'il y a recouvrement entre les deux intervalles. La distribution des tension de rupture en présence d'arborescences d'eau ne présente donc pas d'écart significatif avec celle des tensions de référence.

S'il y peu de différence entre les tensions de rupture, par contre les arborescences électriques obtenues à l'amorçage de la rupture, diffèrent sensiblement suivant qu'il existe une arborescence d'eau ou non.

4. DISCUSSION DES RESULTATS.

En premier lieu, les mesures de tenue diélectriques n'ont pas permis de constater une réduction de la tenue diélectrique du fait de l'arborescence d'eau. Ces mesures, en elles-mêmes, ne permettent pas de confirmer l'hypothèse d'un renforcement du champ sur l'électrode opposée à l'arborescence d'eau. En effet les tensions de rupture constatées avec ou sans arborescences d'eau sont très proches dans un cas de la référence (électrode de $6\mu\text{m}$) ou supérieures de 20% en présence d'une arborescence d'eau (électrode de $3,5\mu\text{m}$).

Toutefois deux autres caractéristiques doivent également être pris en compte: la forme de l'arborescence électrique et la cinétique de propagation de cette arborescence.

4.1. Signification de la forme de l'arborescence électrique.

Plusieurs auteurs [13 à 16] ont montré que l'on pouvait relier la forme de l'arborescence électrique obtenue à l'extrémité d'une pointe métallique dans du polyéthylène à la tension appliquée pendant un temps donné.

Il apparaît nettement que la densité de canaux dans l'arborescence électrique, croît avec la tension appliquée [14]. En particulier le buisson le plus dense et le plus branché est obtenu pour 17kV soit près du double de la tension associée à l'arborescence la moins branchée de même longueur qui est de 9kV. Ce fait remarquable est rapporté également par les autres auteurs cités. C.LAURENT a étudié en particulier en détail cette relation entre la forme des arborescences électriques et la tension appliquée [15]. Ses résultats confirment la relation précédente entre la tension appliquée et l'aspect de l'arborescence électrique.

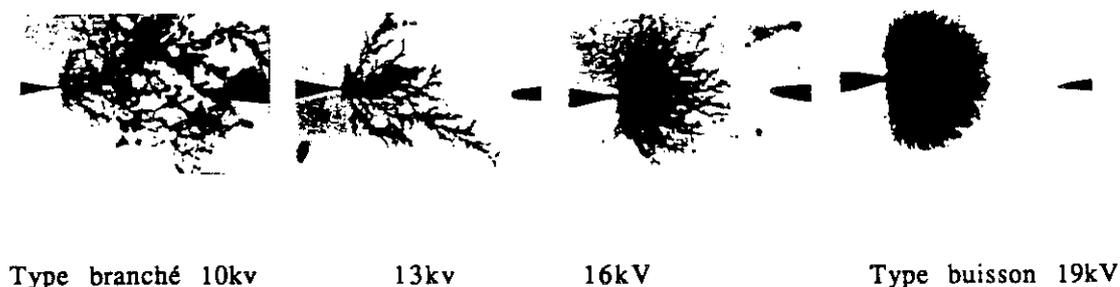


Figure 13: Relation entre tension appliquée et aspect de l'arborescence électrique obtenue d'après[15]. .

4.2. Relation entre la cinétique de l'arborescence électrique et la tension appliquée.

Plusieurs auteurs [15,17] ont signalé que la vitesse de propagation de l'arborescence électrique variait, dans certains cas, de façon inattendue avec la tension appliquée: elle décroît quand la tension augmente. C.LAURENT illustre ce fait[15] par une de ses conséquence spectaculaire: la durée de vie à quelques dizaines d'heures, d'échantillons de polyéthylène testés en géométrie pointe-pointe et en régime de propagation d'arborescence, n'est pas une fonction monotone de la tension appliquée. Cette durée de vie est une fonction décroissante de la tension selon une loi connue dans la région des faibles tensions (0-14kV) puis la pente de la courbe représentative s'inverse pour des tensions plus élevées (14-19kV) et elle redevient décroissante à nouveau ensuite.

Durée de vie
(heures)

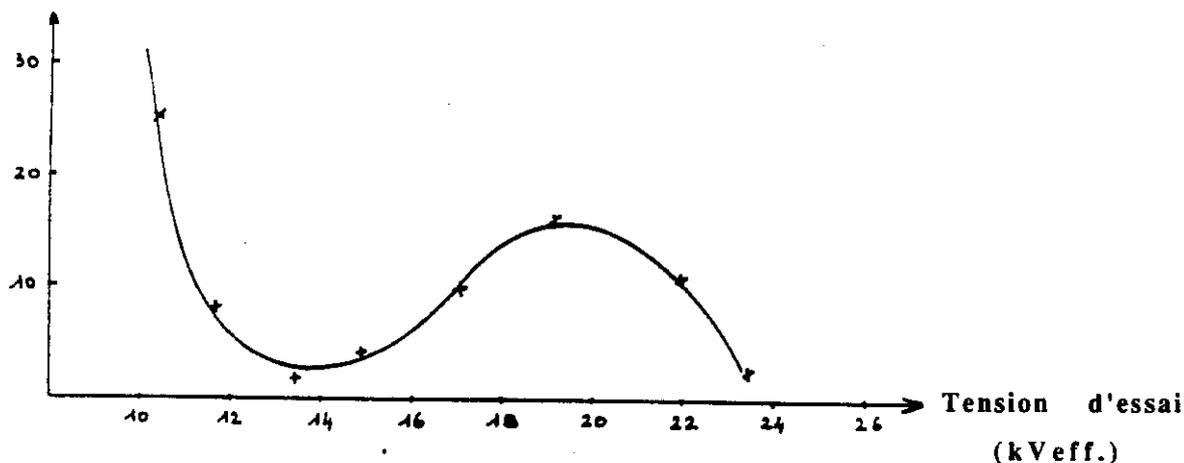


Figure 14: Durée de vie obtenue selon la tension appliquée d'après [15]

4.3. Conclusion.

S'il existe diverses interprétations du phénomène précédent [15,18,19], il semble acquis cependant que la forme en buisson de l'arborescence électrique et la réduction de sa vitesse de croissance soient à mettre en relation avec un accroissement du champ appliqué [15 à 17]. Dans les exemples empruntés à la littérature, l'accroissement du champ résulte tout simplement de l'accroissement de la différence de potentiel inter-électrode. Dans notre cas, la différence de

potentiel restant constante ou presque, un accroissement du champ pourrait être attribué à la présence d'une arborescence d'eau en face de la pointe métallique. En conclusion la forme de l'arborescence électrique et sa faible vitesse de propagation que nous avons observées pourraient bien être des indicateurs d'un accroissement du champ électrique bien que la tension de rupture soit restée constante.

Il est clair que dans l'état actuel de notre étude, il est difficile de conclure. Cette discussion aura eu au moins le mérite de montrer, nous le pensons du moins, que si l'idée d'un renforcement du champ électrique par l'arborescence d'eau est une idée suffisamment simple pour être facilement acceptée dans son principe à titre d'hypothèse, sa mise en oeuvre expérimentale l'est beaucoup moins. La procédure utilisée jusqu'à maintenant de la mesure de la tension de rupture n'a pas permis de tester la validité de l'hypothèse d'un renforcement du champ, il est donc nécessaire de choisir un autre paramètre et de construire une autre situation expérimentale.

5. DEUXIEME TENTATIVE DE VERIFICATION EXPERIMENTALE DE L'HYPOTHESE D'UN ACCROISSEMENT DU CHAMP ELECTRIQUE.

La procédure expérimentale est toujours une procédure différentielle qui compare des mesures faites en l'absence d'arborescences d'eau et en présence d'arborescences d'eau. Mais le paramètre retenu comme indicateur du champ sur la pointe métallique n'est plus désormais, comme la tension de rupture, associé à la fin du processus de développement de l'arborescence électrique, mais à son amorçage. Ce paramètre est la tension d'apparition de l'arborescence électrique. De cette façon, nous pouvons espérer nous affranchir des perturbations introduites par la transformation de l'arborescence électrique au cours de son développement.

Les tests ont consisté à mesurer la tension d'apparition d'une arborescence électrique, dans le plus grand nombre de cas, ou du claquage dans les cas où cette arborescence électrique se propageant trop rapidement n'a pu être observée avant la rupture diélectrique. Elles ont été réalisées sur un type d'éprouvettes contenant des pointes métalliques d'un rayon de courbure de $10\mu\text{m}$. Le choix de cette nouvelle valeur n'a pas été délibéré mais a résulté de contraintes d'approvisionnement, cette valeur a été conservée par la suite pour toutes les autres expérimentations.

Les éprouvettes soumises au test se divisent en trois groupes:

1-Celles du premier groupe contiennent une pointe métallique et une pointe d'eau de $10\mu\text{m}$ de rayon de courbure, sans arborescence d'eau

2-Celles du deuxième groupe contiennent deux pointes métalliques de $10\mu\text{m}$ de rayon de courbure.

Les deux premiers groupes pourront constituer la référence. Aucune de ces éprouvettes n'a été soumise au champ électrique avant le test.

3-Celle du troisième contiennent une pointe métallique et une pointe d'eau de $10\mu\text{m}$ de rayon de courbure, et des arborescences d'eau.

5.1.Mesures de référence

a-Eprouvettes contenant une pointe d'eau et une pointe métallique.

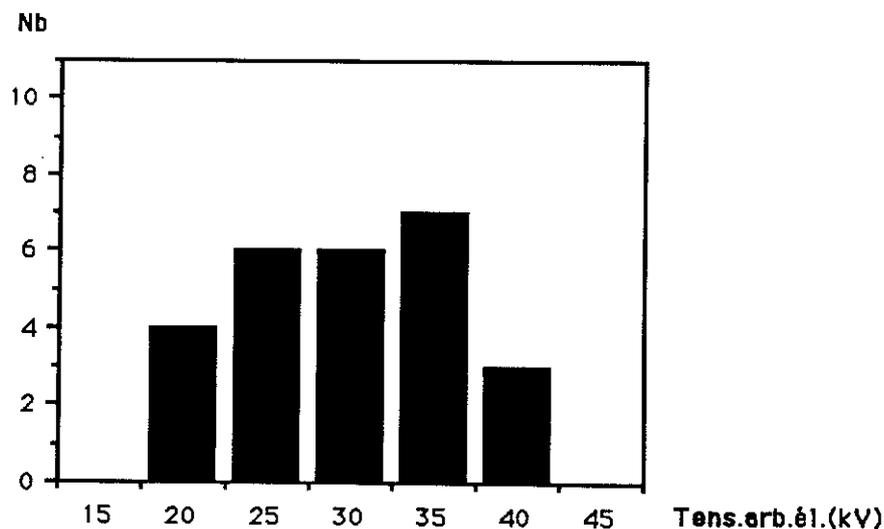


Figure 15: Histogramme des tensions d'apparition de l'arborescence électrique. 26 échantillons de référence contenant une pointe d'eau et une pointe métallique de $10\mu\text{m}$ de rayon de courbure, chacune.

La valeur moyenne estimée des tensions d'apparition de l'arborescence électrique pour ce groupe est de 30kV, l'écart-type estimé de 6,5kV. L'intervalle de confiance à 95% est de [27,4kV, 32,6kV].

b-Eprouvettes contenant deux pointes métalliques.

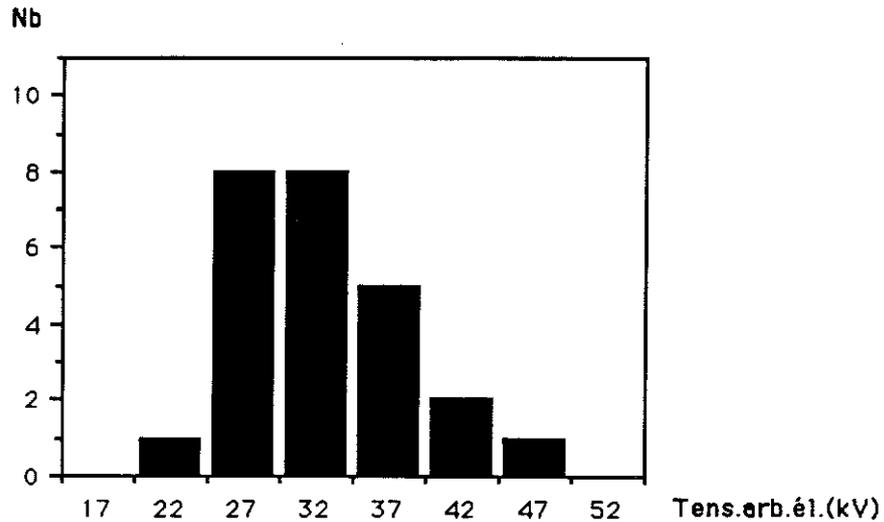


Figure 16: Tensions d'apparition de l'arborescence électrique. 26 éprouvettes de référence à 2 pointes métalliques de $10\mu\text{m}$ de rayon de courbure, chacune.

La valeur moyenne estimée des tensions d'apparition de l'arborescence électrique pour ce groupe est de 32,8kV. L'écart-type estimé de 6,2kV. L'incertitude sur la valeur moyenne avec une probabilité de 95% de 2,4kV. L'intervalle de confiance est de [30,4kV,35,2kV]. Cet intervalle recouvre en partie l'intervalle de confiance relatif à la valeur moyenne des tensions obtenues avec le lot d'éprouvettes précédent. L'écart entre les valeurs moyennes n'est donc pas significatif. La comparaison des écarts types et des valeurs moyennes fait apparaître que ces deux groupes appartiennent du point de vue statistique à la même population. Il est donc possible de les réunir en un même groupe de référence, que représente l'histogramme de la figure 17.

sont inférieures à 22,5kV alors que 92% des tensions de référence sont supérieures à cette valeur.

Autrement dit la situation est exactement l'inverse de celle que nous avons constatée au chapitre trois en géométrie pointe-plan. La présence d'une arborescence d'eau se traduit par une réduction de la tension à laquelle apparaît une arborescence électrique sur la pointe métallique qui fait face à cette arborescence.

6. INTERPRETATION DES RESULTATS.

Ce résultat peut s'interpréter comme la conséquence d'un renforcement du champ électrique sur la pointe métallique du fait de l'arborescence d'eau: pour une même tension inter-électrode qu'en l'absence d'arborescence d'eau, le champ électrique est atténué dans la région de l'arborescence d'eau et accru sur la pointe métallique. En faisant l'hypothèse que le champ critique, intrinsèque au matériau, auquel apparaît une arborescence électrique reste inchangé, une arborescence électrique sera obtenue pour une tension inférieure en présence d'une arborescence d'eau.

Il est intéressant de comparer cette interprétation à une autre récemment proposée d'incidents se produisant dans les câbles par R.D. NAYBOUR [20].

Pour répondre à la question:«Comment l'arborescence d'eau réduit-elle la tension de rupture des Câbles?», l'auteur part de l'observation suivante :« Le trait significatif "...» est la position de l'arborescence électrique. Dans tous les cas l'arborescence électrique se forme à la fin de l'arborescence d'eau.». L'observation n'est pas originale [21]. Mais l'explication proposée l'est davantage. R.D. NAYBOUR propose explicitement :« L'idée d'un renforcement du champ causé par l'arborescence d'eau...»[20]. De plus ce renforcement est attribué comme nous l'avons fait à une atténuation du champ dans l'arborescence d'eau. Enfin cette atténuation explique les cas d'accroissement de la tenue diélectrique due à une arborescence d'eau, constatés lors de l'existence de défauts artificiels pratiqués dans les câbles et ayant donné naissance à une arborescence d'eau;

En revanche, l'auteur ne mentionne pas explicitement l'existence de défauts en face d'une arborescence d'eau mais l'examen de photographies d'arborescences électriques survenues en face d'arborescence d'eau dans un câble [21] révèlent à plusieurs reprises la présence de tels défauts.

Il est facile de constater que la démarche explicative suivie par cet auteur est très proche, aussi bien au niveau de la formulation que du contenu, de celle

que nous venons d'exposer au cours de ce chapitre et du précédent. Cette similitude tendrait à prouver que nos résultats obtenus sur des modèles de laboratoire sont transposables, au moins pour l'essentiel, à la situation rencontrée dans les câbles.

7.CONCLUSION.

En réponse à la question posée au début de ce chapitre, les résultats précédents confirment qu'il existe bien une situation dans laquelle une arborescence d'eau peut affaiblir la tenue diélectrique d'un modèle expérimental. Ce modèle simule l'existence de deux défauts dans une isolation. Un premier défaut permet la naissance de l'arborescence d'eau en renforçant localement le champ. Un second défaut qui fait face au premier sera à l'origine d'une arborescence électrique pour une tension plus faible, en présence d'une arborescence d'eau. L'arborescence d'eau n'est donc pas à elle seule et intrinsèquement à l'origine d'une réduction de tenue diélectrique mais elle peut l'être indirectement en présence d'un défaut de l'isolant. La conjonction d'une arborescence d'eau et d'un défaut extérieur à l'arborescence d'eau peut affaiblir la tenue diélectrique. Dans ce cas le danger représenté par le défaut est accru par la présence de l'arborescence d'eau même si par ailleurs l'arborescence, en l'absence de défaut extérieur, ne représente pas de danger particulier.

Ce résultat apporte un nouvel argument en faveur de l'hypothèse d'une modification de la répartition des potentiels électriques dans l'espace inter-électrode par l'arborescence d'eau. Le renforcement de la tenue diélectrique en géométrie pointe-plan et la diminution de la tension d'initiation d'une arborescence électrique sur un défaut opposé à l'arborescence apparaissent ainsi comme deux manifestations distinctes d'un phénomène unique. La perturbation apportée par l'arborescence d'eau dans la répartition spatiale du champ électrique semble désormais bien établie, elle n'est pas comprise pour autant. Elle ne pourra l'être vraiment qu'en reliant cette perturbation aux autres caractéristiques physiques de l'arborescence d'eau.

La détermination des paramètres qui contrôlent les propriétés diélectriques de l'arborescence d'eau et le déplacement du champ, permettra aussi de constituer des classes d'arborescences plus homogènes que la population utilisée pour le test de tenue diélectrique rapporté dans ce chapitre.

Ces points feront l'objet du prochain chapitre.

REFERENCES DU CHAPITRE QUATRE

- [1] T. MIYASHITA, IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-6 N° 3, September 1971.
- [2] G. BAHDER, T. W. DAKIN, J.H. LAWSON, CIGRE 1974 15-05.
- [3] B.S. BERNSTEIN, N. SRINIVAS, P.N. LEE ,
Annual Report of the 1975 CEIDP, (NAS, Whashington), p. 296.
- [4] A. BULINSKI, R.J. DENSLEY,
IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-16 N° 4, August 1981 p. 319.
- [5] L.A. DISSADO, J.C. FOTHERGILL, S.V. WOLFE,
Annual Report of the 1981 CEIDP, (NAS, Whashington), p. 264.
- [6] A. BULINSKI, S. BAMJI, J. DENSLEY, N. SHIMIZU,
Annual Report of the 1983 CEIDP, (NAS, Whashington), p. 294.
- [7] D. A. SILVER, R.G. LUKAC,
Intern. Conf. on Polymer Insulated Power Cables Jicable, Mars 1984.
- [8] W. KALKNER, U. MULLER, E. PESCHKE, H.J. HENKEL, R. VON OLSHAUSEN,
CIGRE 1982, 21-07.
- [9] C. KATZ, G.S. EAGER, E.R. LEBER, F.E. FISHER,
Intern. Conf. on Polymer Insulated Power Cables Jicable, Mars 1984.
- [10] S. PELISSOU, Proceedings of the Third International Conference on
Conduction and Breakdown in Solid Dielect., Trondheim, Norway 1989, p.433.
- [11] E. DURAND,
Electrostatique. Tome II. Problèmes généraux , Conducteurs. Masson 1966.
- [12] M. MOREAU et A. MATHIEU,
Statistiques appliquées à l'expérimentation. Eyrolles. Paris 1979.

- [13] M. MORITA, M. HANAI, AND H. SHIMANUKI,
Annual Report of the 1973 CEIDP, (NAS, Whashington), p. 299.
- [14] E.J. MCMAHON, IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-13 N° 4, August 1978, 286.
- [15] C. LAURENT, Thèse de Docteur-Ingénieur. Toulouse 1979.
- [16] P. FISCHER, Dielectric Breakdown Phenomena in solids.
- [17] R.PATSCH, 1975 Ann. Rep. CEIDP, NAS, Whashington D. C. 1975, p.323.
- [18] R.M. EICHORN, Annual Report of the 1973 CEIDP, (NAS, Whashington), p. 289.
- [19] R. PATCH, Conference Record of the 1978 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Philadelphia, 130.
- [20] R.D. NAYBOUR, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 6, N°5, Sept/Oct. 1990.
- [21] A.T. BULINSKI, S.S. BAMJI, R.J. DENSLEY, Conference Record of the 1988 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA, June, p. 327.

INTRODUCTION.

Le renforcement de champ électrique induit par l'arborescence d'eau sur l'électrode métallique qui lui fait face met en évidence les propriétés diélectriques spécifiques de l'arborescence d'eau.

Le problème qui se pose désormais est celui de l'évaluation des relations existant entre ces propriétés diélectriques et les autres paramètres physiques de l'arborescence d'eau accessibles directement ou indirectement à la mesure.

La recherche de cet objectif sera décomposée en trois parties:

1-L'inventaire des paramètres qui contrôlent les propriétés diélectriques de l'arborescence d'eau, et l'étude expérimentale de la relation existante entre ces propriétés diélectriques, et l'un des paramètres précédents: la densité d'eau dans l'arborescence.

2-La proposition d'une modélisation permettant de prédire la valeur du renforcement du champ à partir d'une mesure des paramètres caractéristiques et la comparaison des valeurs ainsi calculées aux résultats expérimentaux.

3-L'étude de la relation entre la fraction de l'espace inter-électrode occupé par l'arborescence d'eau et le renforcement du champ causé par l'arborescence (ce point, en raison des difficultés qu'il suscite, nécessite d'être étudié en dernier).

1. INVENTAIRE DES PARAMETRES CARACTERISANT LES PROPRIETES DIELECTRIQUES D'UNE ARBORESCENCE D'EAU, ETUDE EXPERIMENTALE DE L'INCIDENCE D'UN DE CES PARAMETRES, LA DENSITE D'EAU, SUR CES PROPRIETES.

Un premier paramètre s'impose immédiatement, c'est également le plus communément cité dans la littérature: la longueur L de l'arborescence. C'est en effet la seule dimension caractéristique étant donnée leur forme, approximativement sphériques, $L \approx \text{Diamètre}$.

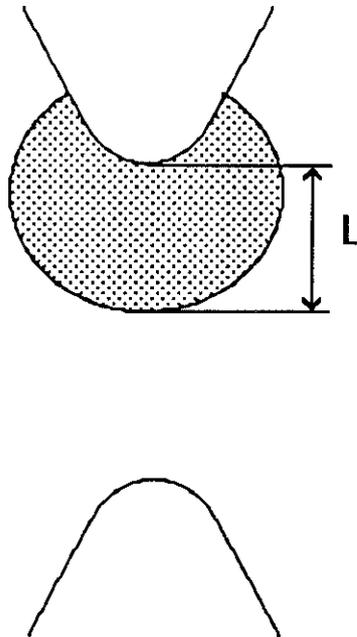


Figure 1: La longueur de l'arborescence d'eau constitue le paramètre le plus communément mentionné.

1.1. Effet de la longueur de l'arborescence d'eau sur la valeur du champ sur la deuxième électrode.

Un calcul de l'effet de la longueur sur le renforcement de champ sera proposé ultérieurement mais dans un premier temps nous nous contenterons de constater l'existence de cet effet en nous plaçant dans une situation plus simple.

Nous nous plaçons dans le cas d'un modèle à une dimension. Les deux électrodes sont alors deux plans conducteurs. Un troisième plan intermédiaire

sépare l'espace inter-électrode en une région I constituée de polyéthylène vierge et une autre II entièrement occupée par l'arborescence. La permittivité du polyéthylène est ϵ_1 . Nous supposons que l'arborescence est constituée d'une région de permittivité homogène [1] ϵ_2 , avec $\epsilon_2 / \epsilon_1 > 1$.

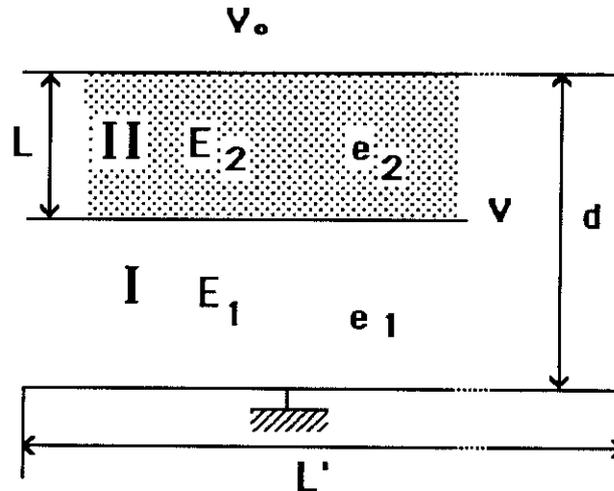


Figure 2: Effet de la longueur de l'arborescence d'eau en géométrie plane sur le champ électrique à l'extérieur de l'arborescence.

Si la longueur L' des électrodes est suffisamment grande devant d , un calcul simple nous donne l'expression du champ E_1 dans la région I, en fonction de d , L et du rapport des permittivités des 2 régions:

$$E_1 = \frac{V_0}{1 - k(L/d)} \quad (1)$$

avec $k = 1 - (\epsilon_1 / \epsilon_2) > 0$

Ce résultat, la croissance du champ moyen E_1 avec le coefficient de remplissage L/d de l'espace inter-électrode par l'arborescence d'eau, s'accompagne d'un accroissement du potentiel dans la région I, au voisinage de l'électrode métallique. Cette élévation du potentiel se traduira aussi par un accroissement du champ sur l'électrode métallique si le plan conducteur comporte un défaut ou est remplacé par une pointe métallique.

Si la fraction L/d de l'espace inter-électrode occupé a une incidence déterminante sur le renforcement du champ électrique à l'extérieur de

l'arborescence d'eau, ce paramètre n'est pas le seul à influencer sur le renforcement de champ.

1.2. Le paramètre géométrique ne permet pas à lui seul de caractériser les propriétés diélectriques de l'arborescence d'eau.

En effet, deux arguments expérimentaux nous incitent à le penser:

1.2.1. Premier argument.

Trente huit éprouvettes provenant des 43 testées au chapitre précédent ont été réparties en trois classes en fonction de la longueur des arborescences d'eau qu'elle contiennent. La longueur est connue à $\pm 5\mu\text{m}$. La répartition est présentée sur le tableau suivant:

	Effectif	Intervalle de longueur	L moyenne	Tens. moyenne d'arb. él.
I	12	$260\mu\text{m} \leq L \leq 315\mu\text{m}$	$L_1=280\mu\text{m}$	21kV
II	10	$330\mu\text{m} \leq L \leq 350\mu\text{m}$	$L_2=340\mu\text{m}$	19,3kV
III	16	$360\mu\text{m} \leq L \leq 410\mu\text{m}$	$L_3=380\mu\text{m}$	19kV

On peut remarquer à la lecture du tableau, qu'en passant de la classe I à III, l'écart des tensions est très inférieur à celui des longueurs:

$$\begin{array}{lclcl}
 L_1=280\mu\text{m} & \text{--->} & L_3=380\mu\text{m} & & +36\% \\
 V_1= 21\text{kV} & \text{--->} & V_3 = 19\text{kV} & & - 10\%
 \end{array}$$

De plus, étant donné la dispersion, l'écart de 10% entre les tensions, n'est pas significatif .

Nous présentons par ailleurs sur un même graphe, pour chacune des classes précédentes, la distribution des fréquences statistiques des tensions d'apparition d'une arborescence électrique .

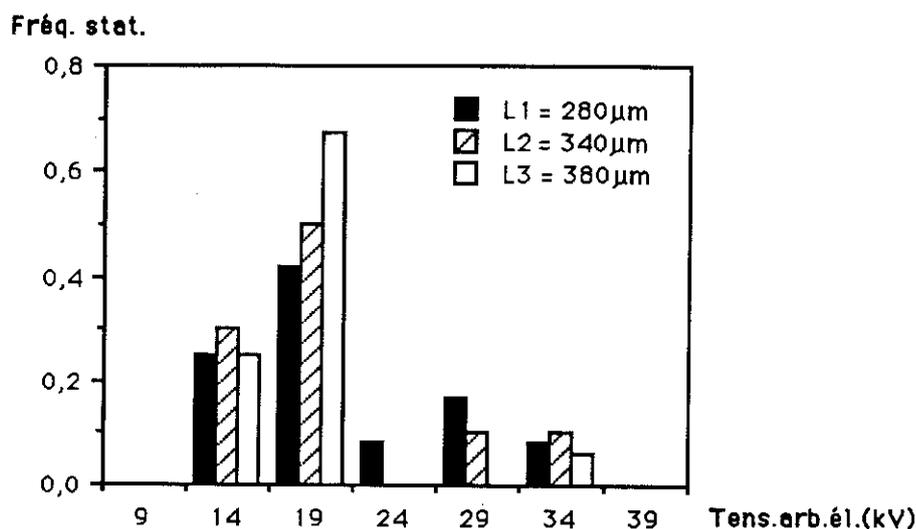


Figure 3: Fréquences statistiques des tensions d'apparition de l'arborescence électrique pour 3 classes d'arborescences d'eau de longueurs différentes.

L'observation du graphe fait apparaître que la longueur n'a pas d'incidence sur la forme de la distribution. Ainsi, malgré les différences de longueur, les trois distributions ont en commun une très forte dissymétrie par rapport au centre de l'intervalle de tension. Pour les 3 classes d'arborescences, 67% des effectifs au moins sont situés dans les deux classes de tension centrées sur 14 et 19kV.

Ainsi des arborescences d'eau de longueurs très différentes peuvent conduire à des tensions d'apparition d'une arborescence électrique, très proches les unes des autres, à la fois par la forme de la distribution statistique de ces tensions et par la valeur moyenne de ces distribution.

Il semble donc légitime de penser qu'un autre paramètre vient compenser l'effet attendu de la longueur de l'arborescence d'eau sur le renforcement de champ.

1.2.2. Deuxième argument.

Nous avons cette fois isolé dans la même population que précédemment deux classes d'arborescences d'eau de longueurs très voisines.

	Effectif	Intervalle de longueur	L moyenne	Tens. moy. d'ar. él.
I	13	$260\mu\text{m} \leq L \leq 365\mu\text{m}$	$L^*1=340\mu\text{m}$	17,2kV
II	10	$315\mu\text{m} \leq L \leq 395\mu\text{m}$	$L^*2=330\mu\text{m}$	22,5kV

Les distributions des tensions obtenues pour chacun des groupes sont les suivantes.

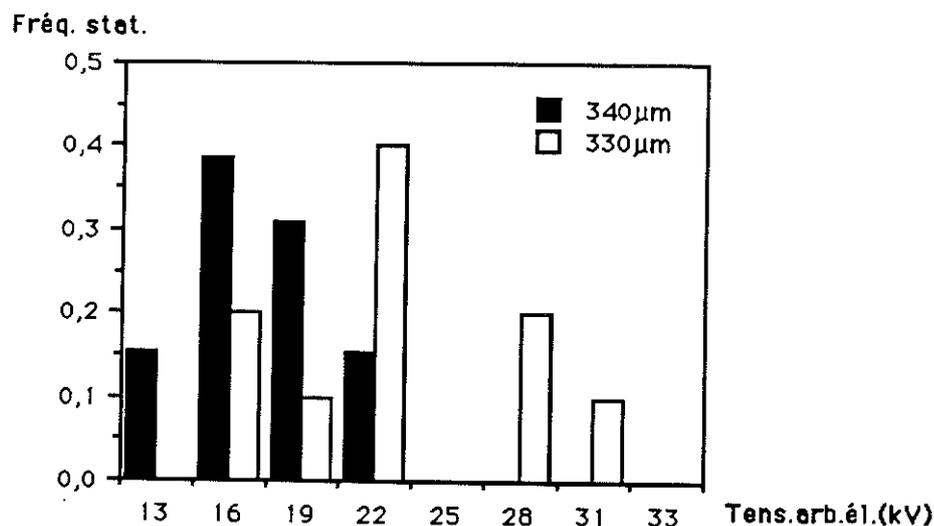


Figure 4: Fréquences statistiques des tensions d'apparition de l'arborescence électrique pour 2 classes d'arborescences d'eau de même longueur moyenne.

L'observation de ces distributions est intéressante à plus d'un titre: la forme des distributions diffère fortement des précédentes. Elles témoignent de populations plus homogènes du point de vue des propriétés diélectriques.

De plus les valeurs moyennes des tensions sont significativement séparées.

Tension moyenne	Ecart-type	Intervalle de confiance à 95%	Ecart
V1*= 17,2kV	2,5kV	[15,8kV,18,6kV]	
V2*= 22,5kV	3,4kV	19,1kV,25,9kV]	+ 31%

L'écart entre les longueurs moyennes n'est que de 3%, alors que l'écart entre les tensions moyennes est de 31%. Ce dernier écart ne peut donc pas être attribué à la longueur des arborescences d'eau. Il est donc nécessaire de faire intervenir un autre paramètre pour caractériser les propriétés diélectriques des arborescences d'eau.

1.3. Outre le rapport L/d , la permittivité de l'arborescence d'eau, détermine le renforcement du champ à l'extérieur de l'arborescence.

Dans l'expression (1) du champ en géométrie plane en dehors de l'arborescence d'eau (cf 1.2.1)

$$E = \frac{V_0}{1 - kL/d}$$

le terme k traduit l'influence de la permittivité de l'arborescence d'eau, en effet

$$k = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_1} \quad (\text{cf 1.1})$$

En ne prenant en compte que L/d dans l'évaluation du renforcement de champ, nous avons implicitement considéré la permittivité comme une constante mais rien ne dit qu'il en soit ainsi.

En effet, on peut considérer l'arborescence d'eau comme un milieu hétérogène à deux constituants; le polyéthylène et l'eau présente dans les micro-cavités au sein du polyéthylène. Et tous les calculs relatifs à la permittivité de substances hétérogènes à deux constituants [2,3] font intervenir le rapport des volumes des deux constituants. La permittivité d'une arborescence d'eau est donc reliée à la fraction volumique d'eau qu'elle contient, et cette concentration peut varier d'une arborescence à l'autre.

La concentration en eau apparaît donc comme un deuxième paramètre caractéristique des propriétés diélectriques de l'arborescence d'eau. Il est donc nécessaire de déterminer cette concentration.

1.4. Mesure de la concentration en eau dans l'arborescence.

Jusqu'à maintenant la seule technique permettant d'estimer la quantité d'eau contenue dans une arborescence a consisté à dénombrer les cavités contenues dans l'arborescence et à déterminer leurs dimensions [4,5,6]. La technique du comptage des cavités, outre sa lourdeur qui interdit son utilisation au delà de quelques exemples présente en plus l'inconvénient d'être destructive. Elle suppose en effet d'effectuer des coupes transverses par rapport à l'axe de symétrie de l'arborescence d'eau pour analyser ensuite ces coupes au microscope.

Une autre technique de mesure été proposée au laboratoire par C.MEYER [7], elle consiste à chauffer les échantillons pour en extraire l'eau qu'ils contiennent. Cette technique est également destructive, de plus, en raison de sa sensibilité insuffisante, elle ne peut s'appliquer qu'à un lot de plusieurs échantillons.

Toutes ces raisons nous ont conduit à proposer un autre paramètre pour caractériser l'arborescence d'eau, sa transmittance:

$$T = I / I_{inc},$$

avec I = Intensité lumineuse transmise,

et I_{inc} = Intensité lumineuse incidente.

La transmittance permet en effet une évaluation de la concentration en eau.

1.4.1. La transmittance est facilement mesurable; elle permet aussi d'accéder à la concentration en eau.

La facilité avec laquelle une arborescence d'eau peut être observée par transparence à l'aide d'un simple microscope optique malgré la faible quantité d'eau qu'elle contient (quelques pour-cent) tient à deux causes : le fait que l'eau soit concentrée dans des cavités et d'autre part la taille de ces cavités.

L'arborescence d'eau se présente localement comme un nuage de cavités de l'ordre du micron [8,9,10], remplies d'un milieu d'un indice, $n_{Eau} = 1,33$ à $1,34$ selon la longueur d'onde [11], au sein d'une matrice d'un autre indice légèrement différent, $n_{PE} = 1,51$ [12]. La différence d'absorption, entre l'eau et le PE est faible puisque le rapport des indices est de 1,1 et ne peut suffire à distinguer les arborescences d'eau du PE. Mais le faible écart d'indice, ajouté au fait que le

diamètre des cavités est proche de la longueur d'onde de la lumière visible incidente, fait que les cavités d'eau diffusent très fortement cette lumière. Il en résulte que dans un échantillon observé par transparence, l'arborescence apparaît comme une tache sombre se distinguant nettement du reste du matériau.

La quantité de lumière diffusée en dehors de la direction d'incidence se traduit par une perte de lumière transmise sous cette incidence. Elle croît avec la densité de cavités.

La mesure de la transmittance permet donc de remonter à la concentration en eau dans le matériau si la dimension des cavités est uniforme et connue.

Cependant la grandeur la plus couramment utilisée est l'absorbance

$$A = - \text{Log } T = \text{Log } I_{\text{inc}}/I$$

dans la mesure où cette quantité est, directement proportionnelle à la concentration, moyennant certaines approximations.

Ainsi d'après [13], lorsque le diamètre des particules est compris entre $0,05\mu\text{m}$ et $2\mu\text{m}$, (pour une longueur d'onde de $0,5\mu\text{m}$), et lorsque le rapport des indices est inférieur à 1,3 [13],

$$A \approx t C L. \quad (2)$$

avec $C =$ concentration de la phase dispersée,

$L =$ chemin optique,

et $t =$ turbidité soit la propension du milieu à diffuser la lumière [14].

Cette expression linéaire de l'absorbance, en fonction de la concentration, n'est exacte qu'au premier ordre et pour de faibles valeurs de la concentration, sinon,

$$A \approx t C (1-C)L.$$

Cette condition d'une faible concentration est approximativement respectée dans la mesure où nous ne mesurons que des concentrations moyennes.

Pour une longueur d'onde déterminée, un chemin optique donné, et une concentration donnée, t dépend essentiellement de la dimension des particules et du rapport des indices de la phase dispersée diffusante et du milieu principal. Les valeurs de la turbidité ont été tabulées en fonction de ces paramètres [15], cependant nous n'avons pas cherché à déterminer la valeur effective de la

turbidité. Nous avons seulement supposé que la turbidité était constante pour les différentes concentrations et trajet optiques rencontrés cette hypothèse nous a permis de faire des mesures relatives du produit $C L$, pour différentes valeurs de transmittance. Ensuite la détermination de L , à partir de l'observation de l'arborescence au microscope a permis de faire des comparaisons entre les concentrations.

La mise en oeuvre pratique de cette méthode soulève cependant deux difficultés relatives aux choix des grandeurs significatives que nous allons examiner, mais il est nécessaire au préalable de préciser la procédure expérimentale suivie.

1.4.2. Mise en oeuvre pratique d'une mesure de transmittance.

a-La procédure utilisée.

L'éprouvette qui contient une arborescence d'eau est observée par transparence sur un microscope optique munie d'une caméra CCD. La région de l'arborescence est éclairée par une lampe à incandescence placée sous le microscope. L'image vidéo est ensuite enregistrée dans la mémoire d'un dispositif de traitement d'image piloté par un microprocesseur.

Le dispositif de traitement d'image possède une fonction qui permet d'établir un niveau des gris selon une section de l'image choisie par l'opérateur. Cette opération revient à mesurer en chaque point de l'image, sur la droite choisie (par exemple la droite ox ou $o'y'$ de la figure 5), le niveau de l'intensité lumineuse transmise. Cette valeur est connue à un coefficient multiplicatif près lié à la chaîne de mesure. Il est donc possible d'établir ainsi, ligne par ligne, une cartographie de l'intensité lumineuse de l'image de l'arborescence d'eau et de son environnement immédiat, en unités arbitraires.

Le système de traitement d'image produit ensuite un graphe du niveau de gris obtenu en fonction de la position du point sur l'image. Comme l'analyse est faite ligne par ligne cela revient à établir un graphe de l'intensité transmise en fonction de l'abscisse du point de mesure sur la droite de référence choisie.

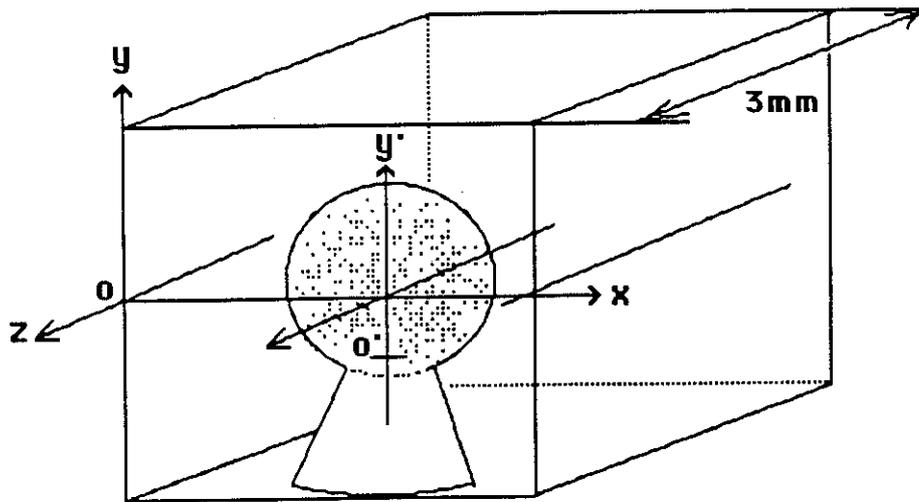


Figure 5: Le système mesure l'intensité lumineuse transmise en chaque point de la droite ox ou $o'y$ selon la direction d'observation oz , et traduit cette mesure en unités arbitraires.

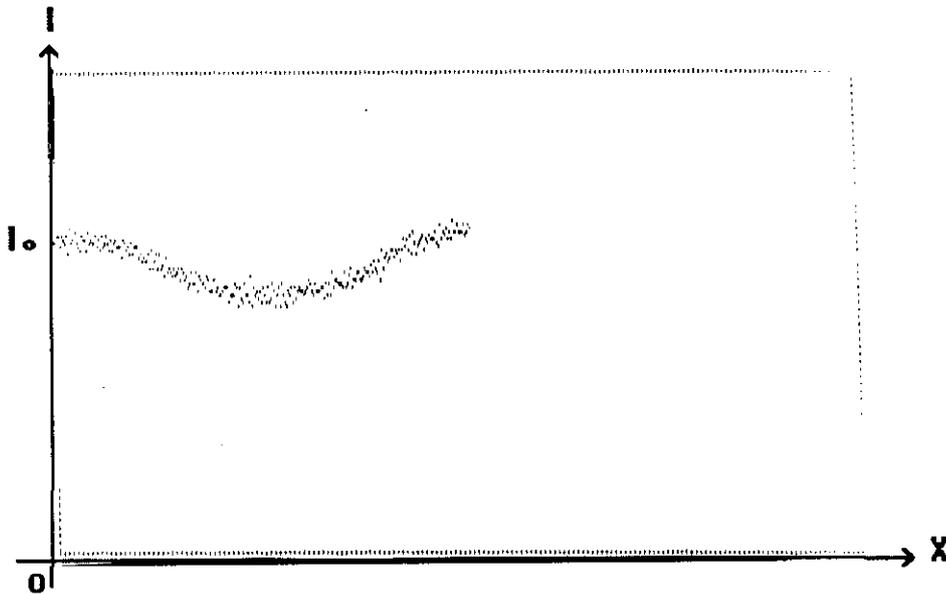


Figure 6: Valeurs de l'intensité lumineuse en unités arbitraires, à y donné, en fonction de l'abscisse x du point de mesure .

b-Une première difficulté provient de l'abondance des valeurs de transmittance disponibles. D'où la question: quelle valeur de transmittance choisir pour caractériser l'arborescence d'eau? La solution adoptée a consisté à prendre comme valeur caractéristique le minimum de transmittance. L'absorbance est

proportionnelle à la concentration et au trajet optique, cf (5), et cette propriété associée aux caractéristiques de l'arborescence entraîne bien l'existence d'un minimum de transmittance.

Sur le graphe de la figure 6, on voit que l'intensité lumineuse passe par un minimum. Ce minimum qui n'est pour l'arborescence d'eau qu'un minimum relatif a une origine double. Une première origine est due à la géométrie: l'arborescence est approximativement un ellipsoïde de révolution. Par suite, lorsqu'on se déplace vers l'axe de révolution, le trajet optique à l'intérieur de la zone de l'arborescence croît jusqu'à cet axe. Une deuxième raison tient à l'hétérogénéité de l'arborescence [4]: lorsqu'on se rapproche de la pointe d'eau, la densité de cavités augmente. Ces deux effets s'ajoutent dans le cas d'un tracé des niveaux de gris selon la droite ox de la figure 5, puisqu'en se rapprochant de l'axe, on se rapproche toujours également de la pointe. Le minimum de lumière transmise est donc logiquement situé sur l'axe de symétrie de l'arborescence.

Lors d'un déplacement selon une direction parallèle à l'axe de révolution (droite $o'y'$ de la figure 5), les deux effets ne se renforcent pas toujours: en s'écartant de la pointe, la densité de cavités diminue mais on se rapproche du centre et le trajet optique dans l'arborescence augmente. Le résultat est qu'il existe un point ou une plage de l'image où la lumière transmise est minimale.

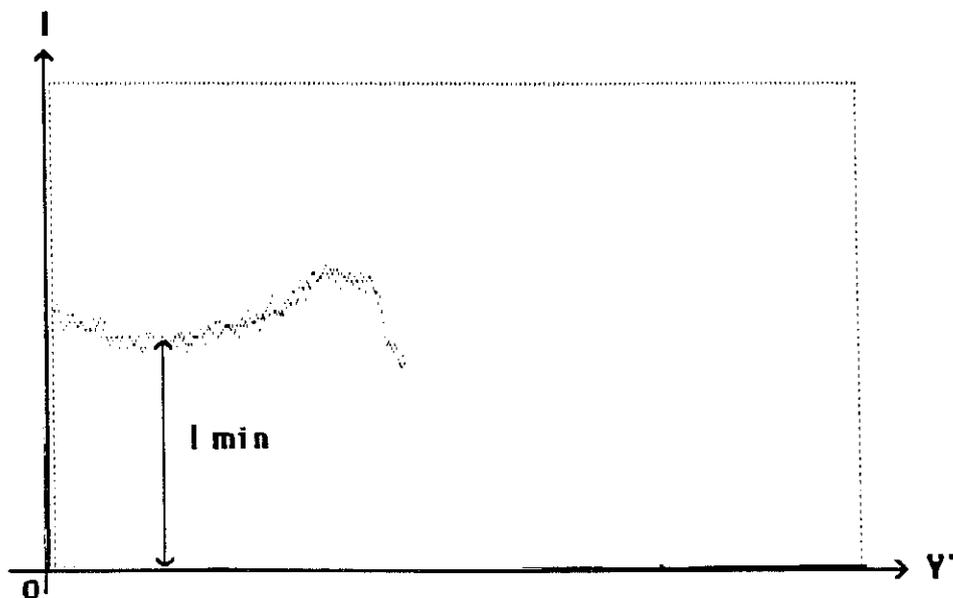


Figure 7: Niveaux de gris entre les deux pointes, $x = x^0$ abscisse de l'axe, y' variable. Vers le milieu une plage horizontale représente, le minimum de lumière transmise par l'arborescence I_{min} . La chute brutale d'intensité à gauche correspond à la pointe métallique.

Cette plage s'étend approximativement entre le centre de l'arborescence d'eau et une position intermédiaire entre le sommet de la pointe d'eau et le centre. I_{\min} sera l'une des valeurs caractérisant la transmittance d'une arborescence.

c- Une deuxième difficulté provient du fait que les micro-cavités d'eau ne sont pas immédiatement accessibles.

D'une part, en effet, l'arborescence est insérée dans une épaisseur de polyéthylène dont elle ne représente qu'une faible partie, quelques centaines de microns pour une épaisseur de polyéthylène de 3mm, cf la figure suivante.

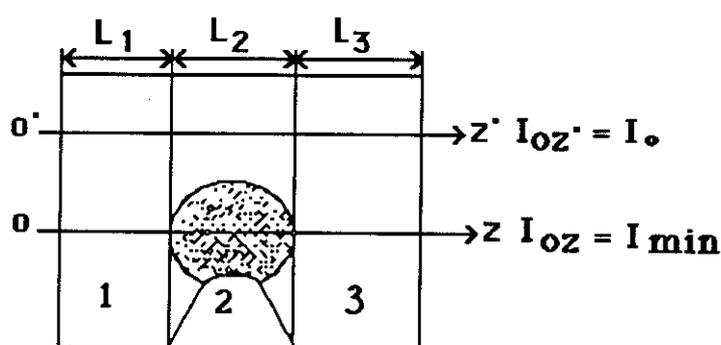


Figure 8: La lumière transmise à travers l'arborescence d'eau traverse trois régions, dont deux constituées par du polyéthylène pur, une autre par du polyéthylène et des cavités d'eau.

D'autre part au sein de l'arborescence, les cavités sont insérées dans du P.E.

Le terme que nous cherchons à mesurer est l'absorbance due aux cavités d'eau seules:

$$A_E = t_E C_E L_2 \quad (3)$$

A_E , nous permet, connaissant le trajet dans l'arborescence L_2 et la turbidité due à l'eau t_E d'accéder à la concentration en eau C_E .

Mais dans l'arborescence il y a aussi du PE en concentration $C_{PE} = (1 - C_E)$. Si,

$$A_{2PE} = t_{PE} L_2 \quad (4)$$

(t_{PE} = turbidité du PE)

est l'absorbance de la région 2 en dehors de l'arborescence où $C_{PE} = 1$, le terme d'absorbance dû au PE, dans l'arborescence d'eau, sera A_{2PE} , multiplié par la concentration en polyéthylène dans l'arborescence: $(1-C_E)$ soit $(1-C_E)A_{2PE}$.

Les absorbances sont additives par suite l'absorbance totale selon oz, cf fig.8, sera:

$$A_{Oz} = A_{1PE} + (1-C_E)A_{2PE} + A_E + A_{3PE} \quad (5)$$

Mais l'absorbance totale selon oz', c'est à dire en dehors de l'arborescence d'eau est:

$$A_{Oz'} = A_{3PE} + A_{2PE} + A_{3PE} \quad (6)$$

Les relations (8) et (9) nous donnent:

$$A_E = A_{Oz'} - A_{Oz} + C_E A_{2PE} \quad (7)$$

$0,1 \leq C_E \leq 0,3$ [7], aussi le dernier terme de (10), $C_E A_{2PE}$, représente une fraction seulement de l'absorbance due au PE dans l'arborescence d'eau. Cette absorbance est en elle-même sensiblement inférieure à celle de l'eau. C'est en effet l'écart entre ces deux absorbances qui rend l'arborescence d'eau visible, malgré sa faible concentration en eau. Nous ferons donc le choix de négliger le terme $C_E A_{2PE}$. Dans ce cas, A s'exprime simplement en fonction des intensités transmises selon oz et oz', I_{Oz} et $I_{Oz'}$.

$$A_E \approx A_{Oz'} - A_{Oz} = \text{Log } I_{Oz'} / I_{Oz} \quad (8)$$

Cette écriture revient à faire de $I_{Oz'}$ l'intensité transmise à travers une épaisseur de polyéthylène équivalente à l'épaisseur de la région qui contient l'arborescence, une référence: I_0 .

En définitive chaque arborescence sera caractérisée par le nombre:

$$I_0 / I_{\text{min}} = 1 / T$$

ou encore par un nombre équivalent, le pourcentage maximum de lumière absorbée.

$$\Delta I / I_0 = (I_0 - I_{\text{min}}) / I_0$$

et nous prendrons pour AE la valeur:

$$AE = \text{Log } I_0/I \text{ min} \quad (12)$$

La mesure du rapport I_0/I est faite directement sur le graphe ce qui entraîne une incertitude d'environ 5%.

1.5. Vérification expérimentale de la validité du nouveau critère.

Il s'agit de vérifier s'il existe une relation entre la transmittance d'une arborescence d'eau et le renforcement de champ induit par cette arborescence, qui est mesuré par la diminution de la tension d'obtention d'une arborescence électrique sur la pointe métallique.

Toutefois, pour mesurer l'incidence effective de la transmittance des arborescences d'eau sur le renforcement de champ, il est nécessaire de s'affranchir au préalable de l'influence du premier paramètre, la longueur des arborescences. Or il est malheureusement difficile de produire en grand nombre des arborescences d'eau de longueurs rigoureusement égales et de différentes transmittances.

1.5.1. Difficulté à produire des arborescences d'eau de longueurs égales.

L'objectif que nous nous étions fixé était d'obtenir des arborescences d'une longueur de $300\mu\text{m}$, présentant des transmittances les plus éloignées les unes des autres. Le résultat a été, pour la longueur, une distribution centrée sur $320\mu\text{m}$ mais présentant une certaine dispersion comme on peut le voir sur l'histogramme suivant:

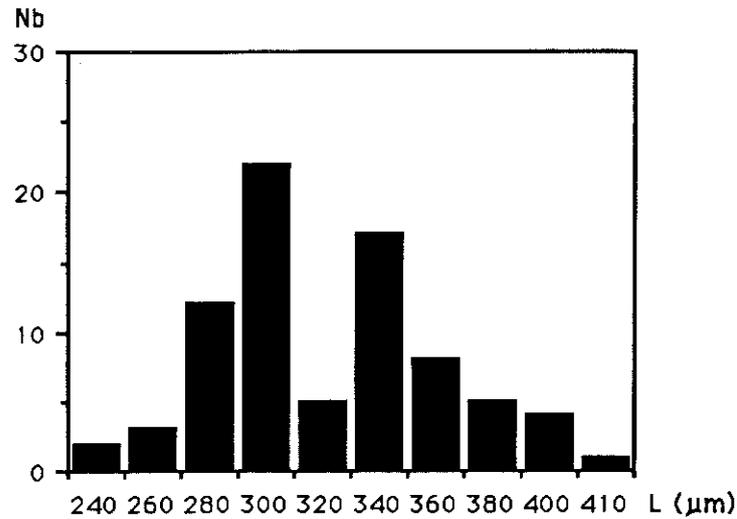


Figure 9: Histogramme des longueurs d'arborescence d'eau soumises au test de tenue diélectrique pour évaluer l'effet de la transmittance.

En ce qui concerne les absorptions, elles se répartissent entre 10 et 35%.

Ce résultat n'est cependant pas aussi catastrophique que l'on pourrait le craindre. Le graphe de la figure 10 montre en effet qu'un écart de longueur moyenne de 20% entre deux classes d'arborescences d'eau présentant par ailleurs une même absorption moyenne de 29% n'entraîne pas d'écart significatifs entre les distributions de tensions obtenues.

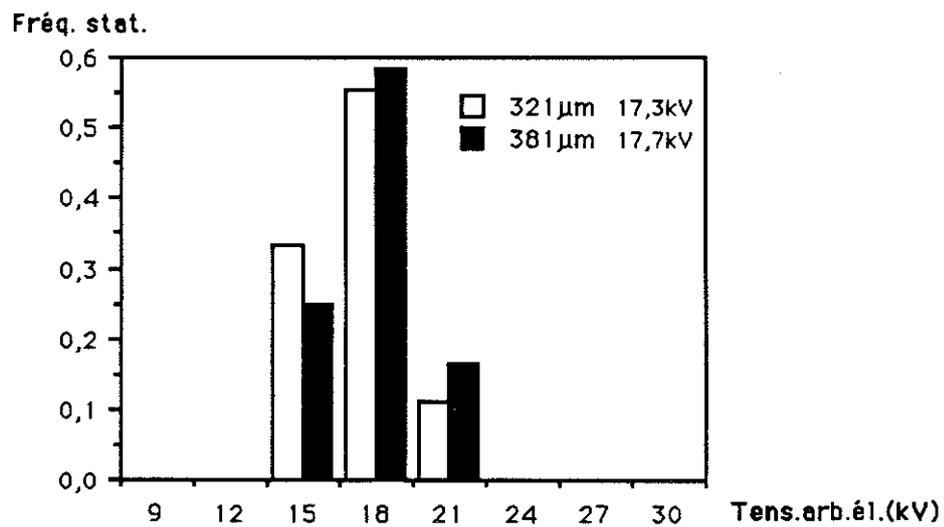


Figure 10: Fréquences statistiques des tensions d'apparition d'une arborescence électrique de 2 classes d'arborescences d'eau de même transmittance, mais de longueurs moyennes différant de 19%. On a indiqué à côté de la longueur et la tension moyenne.

Ce résultat nous conduit à penser que l'incidence de la transmittance ne sera pas sensiblement masquée par la dispersion des longueurs d'arborescences. Les résultats sont d'abord présentés globalement. Les arborescences seront ensuite réparties en trois classes selon leur transmittance.

1.5.2. Présentation globale des résultats bruts.

Sur un même graphe sont représentées les valeurs de tensions d'obtention d'une arborescence électrique en fonction du pourcentage de lumière absorbée ($\Delta I/I_0$) pour 79 éprouvettes contenant une arborescence d'eau et 52 éprouvettes de référence sans arborescence d'eau ($\Delta I/I_0 = 0$).

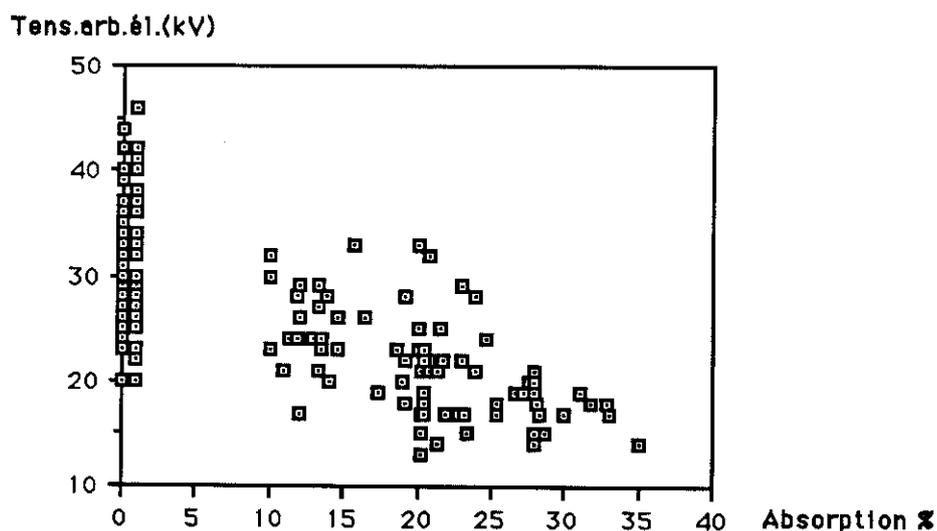


Figure 11: Relation entre la tension d'obtention d'une arborescence électrique pour une éprouvette et le pourcentage de lumière absorbée par l'arborescence d'eau qu'elle contient. Les valeurs associées à une absorption nulle sont les tensions de référence.

Ce graphe fait apparaître globalement une tendance à la décroissance des tensions lorsque le pourcentage de lumière absorbé s'accroît. On peut noter également une réduction de la dispersion de ces mêmes tensions avec l'augmentation de l'absorption. La tendance précédente est soulignée par une répartition des éprouvettes en trois classes

1.5.3. Répartitions des arborescences en trois classes de transmittance.

Les 79 arborescences précédentes sont maintenant réparties en 3 classes de transmittance. Les principales caractéristiques de chaque classe sont rassemblées dans un tableau.

	Effectif	L moyen	$\Delta I/I_0$ moyen	Tens.ar.él.moyen.	Ecart-type
I	23	$290 \pm 10 \mu\text{m}$	$12,8 \pm 0,7\%$	$25,3 \pm 1,6 \text{ kV}$	3,9kV
II	35	$320 \pm 12 \mu\text{m}$	$21 \pm 0,6\%$	$21,3 \pm 1,6 \text{ kV}$	4,8kV
III	21	$355 \pm 16 \mu\text{m}$	$28,9 \pm 1,1\%$	$17,6 \pm 0,9 \text{ kV}$	2kV

Ces trois classes sont maintenant présentées sous forme d'histogramme.

a-Première classe: $\Delta I/I_0$ moyen = 13%, 23 arborescences, .

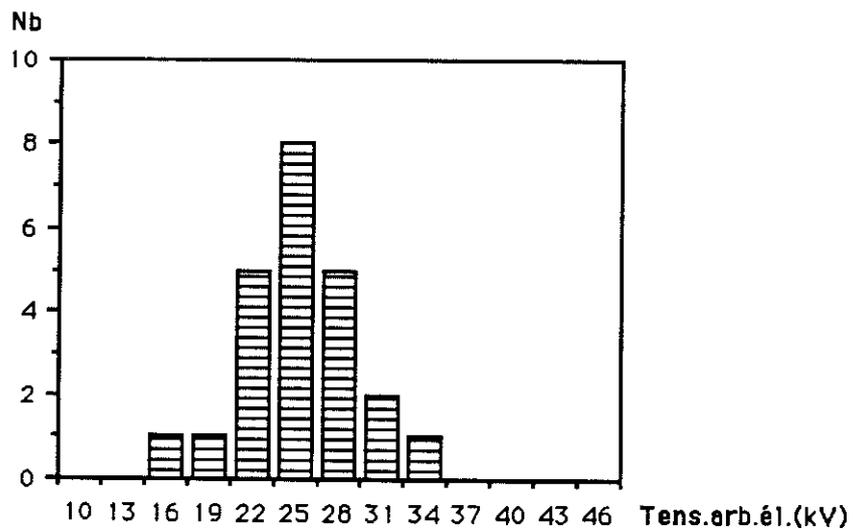


Figure 12: Tensions d'apparition d'une arborescence électrique de la première classe. 23 éprouvettes, $\Delta I/I_0$ moyen=13%, L moyen = $290 \mu\text{m}$.

b-Deuxième classe: $\Delta I/I_0$ moyen 21%, 35 arborescences.

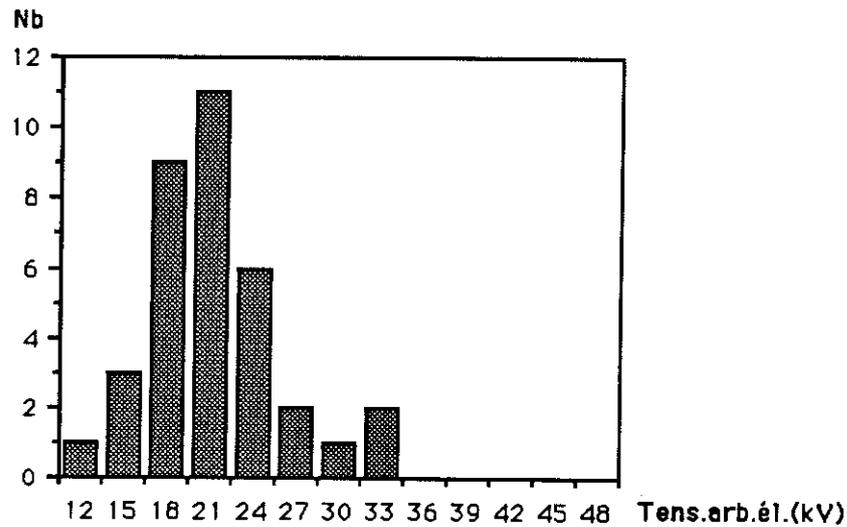


Figure 13: Tensions d'apparition d'une arborescence électrique de la deuxième classe. 35 éprouvettes, ΔIII° moyen = 21%, L moyen = $318\mu m$.

c-Troisième classe: $\Delta I/I_0$ moyen 29%, 21 arborescences.

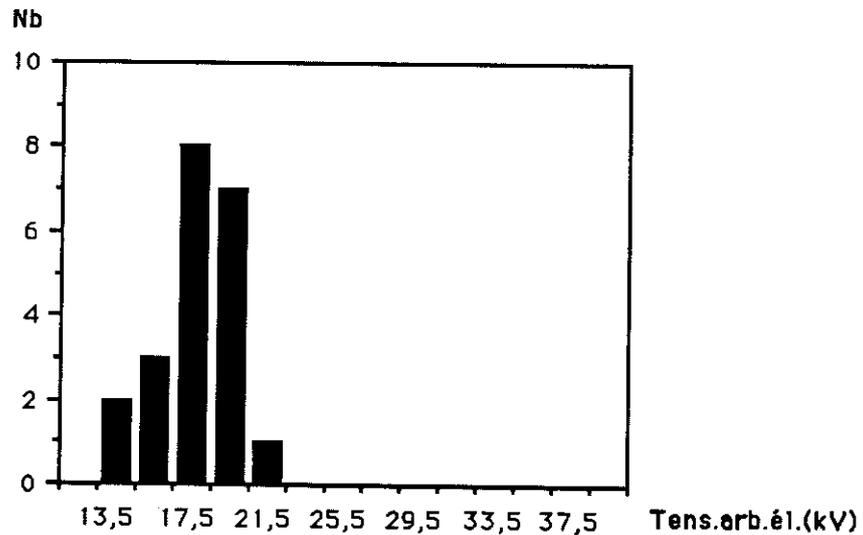


Figure 14: Tensions d'apparition d'une arborescence électrique de la troisième classe. 21 éprouvettes, ΔIII° moyen = 29%, L moyen = $354\mu m$.

La figure suivante réunissant les trois distributions et la référence sur un même graphe permet de les comparer.

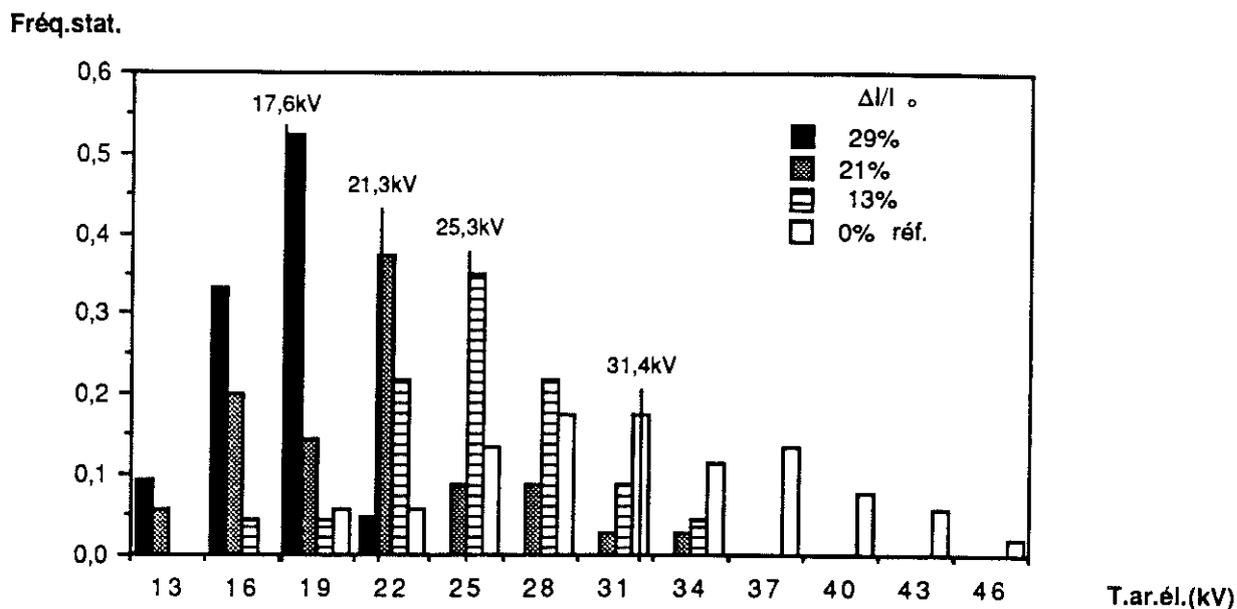


Figure 15: Fréquences statistiques des tensions d'apparition d'une arborescence électrique pour les trois classes d'arborescences et la référence.

Les intervalles de confiance à 95% des tensions moyennes obtenues pour les trois classes: [23,7kV; 26,9kV], [19,7kV; 22,9kV], [16,7kV; 18,4kV] sont séparés. Il est donc possible d'établir une relation entre ces tensions et la transmittance.

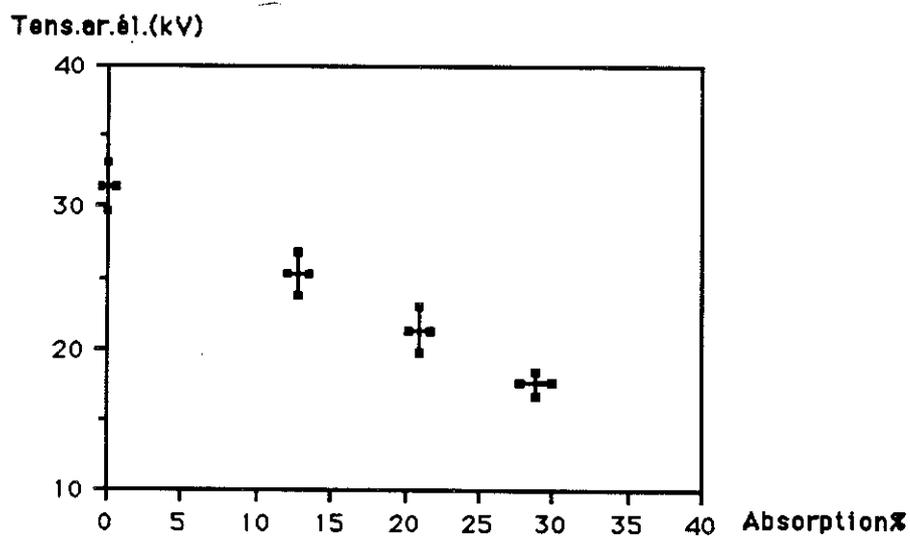


Figure 16: Relation entre les tensions moyennes d'obtention d'une arborescence électrique en face de l'arborescence d'eau et les pourcentages moyens de lumière absorbée pour trois classes d'arborescences d'eau. La valeur 0% correspond aux éprouvettes sans arborescences.

La diminution de la tension d'obtention d'une arborescence électrique, par rapport à la tension de référence, traduit un accroissement de la valeur du champ électrique sur la pointe métallique par l'arborescence d'eau. Ce renforcement de champ croît avec le pourcentage de lumière absorbée.

2. MODELISATION DE L'INFLUENCE DE L'ARBORESCENCE D'EAU SUR LE RENFORCEMENT DU CHAMP ELECTRIQUE.

Nous abordons la deuxième question de ce chapitre: est-il possible de prédire la valeur du renforcement du champ induit par une arborescence d'eau connaissant sa longueur et sa concentration en eau.

Le problème se pose dans les termes suivants: la répartition des potentiels et du champ électrique entre deux pointes dans un milieu homogène est connue depuis longtemps au moyen d'une approximation qui assimile les deux pointes à des hyperboloïdes de révolution [16]. Nous connaissons donc ainsi la valeur des potentiels en chaque point de l'espace inter-électrode et du champ sur la pointe métallique qui en découle, en l'absence d'arborescence d'eau. La présence d'une arborescence d'eau se traduit par une modification de la valeur des potentiels précédents aux mêmes points. Notre projet consiste donc à évaluer cette modification des potentiels et à en déduire une nouvelle valeur pour le champ électrique sur la pointe métallique.

Nous rappelons d'abord le calcul du champ et du potentiel en milieu homogène, nous proposerons ensuite une modélisation de l'arborescence d'eau et de la perturbation qu'elle apporte.

2.1. Valeurs du champ et du potentiel entre 2 pointes, en milieu homogène.

E. DURAND a montré [16], que si les deux électrodes sont des hyperboloïdes de révolution, les équipotentiels de l'espace inter-électrode sont également des hyperboloïdes de révolution homofocales aux premières. L'approximation consiste alors premièrement à assimiler les cônes des deux pointes à deux hyperboloïdes de révolution et deuxièmement à supposer que le milieu est infini, afin d'ignorer les effets de bord. Le réseau de courbes s'exprime alors analytiquement de façon très simple sous forme paramétrée. Les coordonnées cartésiennes d'un point quelconque d'une équipotentielle ont pour expression:

$$x = c \cdot \sin a \operatorname{ch} b \quad y = c \cdot \cos a \operatorname{sh} b$$

Dans ces expressions, c est une constante qui désigne l'abscisse d'un des foyers commun. Le paramètre a détermine l'appartenance à une équipotentielle déterminée. a étant fixé, la valeur de b détermine un point sur l'équipotentielle. L'origine des coordonnées coïncide avec le centre de symétrie de la figure.

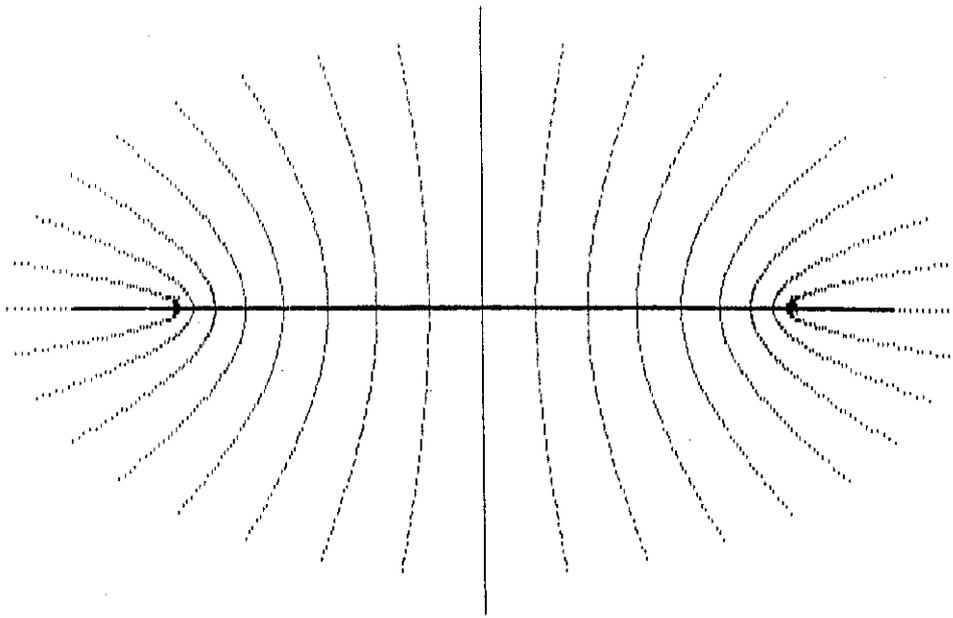


Figure 17: Réseau d'hyperboles représentant la trace des équipotentiellles.

Si l'on se limite aux valeurs du champ et du potentiel sur l'axe ce qui sera notre cas, les choses sont encore plus simples. Les points de l'axe sont ceux pour lesquels y donc $b=0$. La seule variable angulaire a , dont dépend le champ et le potentiel en un point, s'exprime très simplement en fonction de l'abscisse du point et de celle du foyer commun des hyperboloïdes c :

$$a = \sin^{-1} x/c.$$

L'angle a étant ainsi défini, le champ sur l'axe a pour expression [15]:

$$E_{axe} = k/(c \cdot \cos^2 a) \quad (10)$$

soit

$$E_{axe} = k/[c \cdot \cos^2 (\sin^{-1} x/c)] \quad (11)$$

Le rayon de courbure R de l'équipotentielle s'exprime aussi en fonction de x et de c

$$R = \frac{c \cos^2 (\sin^{-1} x/c)}{\sin^{-1} x/c} \quad (12)$$

Cette expression de R permet de retrouver une expression connue du champ sur l'axe loin du plan de symétrie, en effet, quand $x/c \approx 1$,

$$E_{\text{axe}} \approx k / R$$

L'expression (15) permet également de déterminer c si l'on connaît le rayon de courbure d'une équipotentielle et l'abscisse de son intersection avec l'axe. C'est le cas pour les deux électrodes. Leur rayon de courbure et leur position sont définis, c est donc connu.

La constante k , peut être déterminée, par la donnée du potentiel en deux points de l'axe, en intégrant l'expression (13)[15].

$$V_1 - V_2 = k \{ [\text{Log tg}(a_2/2 + \pi/4)] - [\text{Log tg}(a_1/2 + \pi/4)] \} \quad (13)$$

Nous choisirons comme référence le potentiel de la pointe métallique en posant $V_{\text{pte}} = 0$, l'expression (16) devient:

$$kV_a = V_a / \{ [\text{Log tg}(a_{\text{pte}}/2 + \pi/4)] - [\text{Log tg}(a/2 + \pi/4)] \} \quad (14)$$

k et par là même, la valeur du champ en un point de l'axe, est donc fixé, par la position du point et la valeur du potentiel V_a en un point A quelconque de l'axe, de coordonnée $x_A = c \sin a$.

En conclusion le champ sur l'axe et en particulier sur la pointe métallique est proportionnel au potentiel en un point quelconque de l'axe.

2.2. Première modélisation de l'arborescence d'eau et du renforcement de champ apporté; l'arborescence est supposée homogène.

Puisque le champ sur la pointe métallique est proportionnel au potentiel en un point quelconque de l'axe, le coefficient de renforcement du champ sur la pointe métallique,

$$C_r = E'_{pte} / E_{pte}$$

avec E'_{pte} = champ en présence d'une arborescence
 et E_{pte} = champ en l'absence d'arborescence
 est donc égal au rapport des potentiels:

$$C_r = V'_a / V_a \quad (15)$$

avec V_a , potentiel en un point A à proximité de la pointe métallique en l'absence d'arborescence d'eau

et V'_a , potentiel au même point en présence d'une arborescence d'eau. Il nous reste désormais à choisir la position du point A la plus judicieuse, et à calculer V'_a .

Nous choisirons comme emplacement pour le point A, l'intersection entre la frontière de l'arborescence d'eau et l'axe de symétrie de notre système. Comme en l'absence d'arborescence d'eau nous ignorons les effets de bord en supposant que le polyéthylène et l'arborescence s'étendent à l'infini. Mais nous faisons en plus deux nouvelles hypothèses afin de rendre le calcul possible.

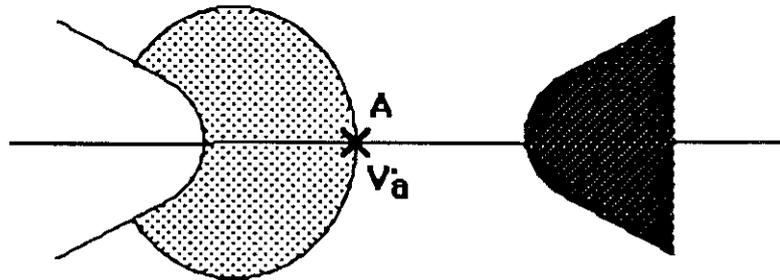


Figure 18: Le point A est situé à la frontière de l'arborescence d'eau.

2.2.1. Hypothèses de modélisation.

Nous faisons deux nouvelles hypothèses:

1-La région située entre le point A et la pointe d'eau, dans l'arborescence est une région de permittivité homogène. Cette hypothèse a déjà été faite au laboratoire à l'occasion de mesures de courants capacitifs entre les électrodes. La permittivité estimée d'après ces mesures et d'autres sources [1, 17, 18], était de 2 à 2,8 fois celle du polyéthylène.

2-La frontière de l'arborescence d'eau est une équipotentielle du système, en ignorant les déviations qui séparent cette surface d'une hyperboloïde. La figure suivante explicite cette approximation.

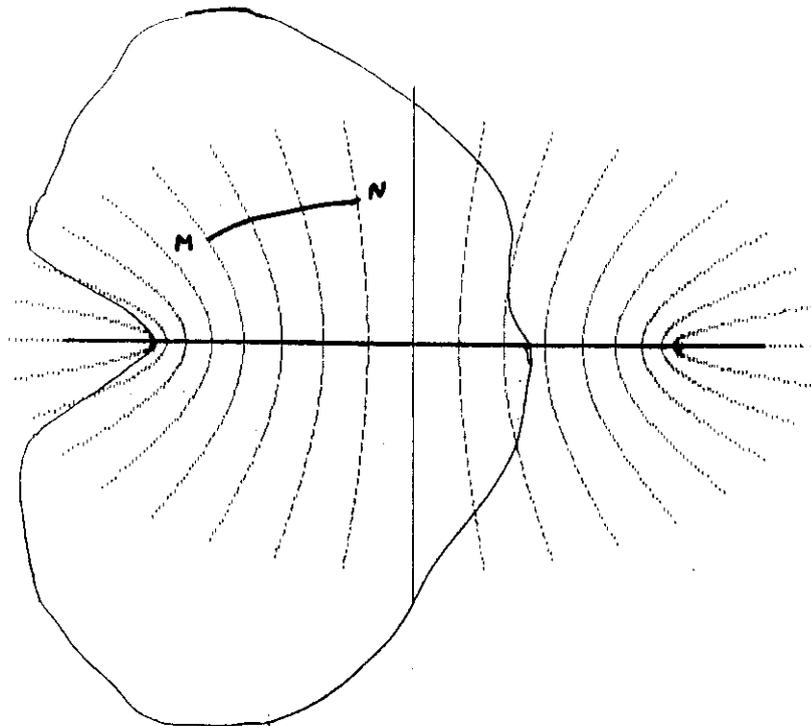


Figure 19: Superposition de l'enveloppe d'une arborescence d'eau relevée sur l'écran vidéo du microscope et du réseau d'équipotentiels de l'espace inter-électrode en l'absence d'arborescence d'eau.

2.2.2. Conséquences de la première hypothèse.

Avec l'hypothèse de l'arborescence d'eau homogène et d'une permittivité constante dans l'arborescence d'eau la relation entre champ électrique et induction dans le polyéthylène,

$$D = \epsilon_0 \cdot \epsilon_p \cdot E.$$

devient,

$$D' = \epsilon_0 \cdot \epsilon_p \cdot \epsilon_r \cdot E'$$

dans l'arborescence d'eau. Dans ces relations, ϵ_p désigne la permittivité relative du polyéthylène et ϵ_r la permittivité relative de l'arborescence d'eau par rapport au polyéthylène.

Par ailleurs le champ E en l'absence d'arborescence d'eau, a pour expression [16]:

$$E = k [f(a,b)]^{-1} \quad (16)$$

expression dans laquelle a et b sont les paramètres définis au § 2.1, dans l'arborescence,

$$E' = k' [f(a,b)]^{-1} \quad (17)$$

Par application du théorème de Gauss à une surface fermée enveloppant la pointe d'eau, on obtient en l'absence d'arborescence d'eau:

$$\iint D \cdot dS = Q = k \epsilon_0 \epsilon_p \iint [f(a,b)]^{-1} dS \quad (18)$$

et en présence d'une arborescence d'eau:

$$\iint D' \cdot dS = Q' = k' \epsilon_0 \epsilon_p \epsilon_r \iint [f(a,b)]^{-1} dS \quad (19)$$

Q étant la charge initiale sur l'électrode, Q' la nouvelle charge.

Il apparaît d'après (16), (17), (18), (19) que le champ est conservé à un facteur multiplicatif près:

$$E'/E = k' / k = Q'/\epsilon_r Q \quad (20)$$

Cette propriété se traduit par la conservation de la topologie des équipotentiels. En effet, le calcul de la nouvelle différence de potentiel en présence d'une arborescence d'eau entre deux points, situés sur deux surfaces qui étaient des équipotentiels en l'absence d'arborescence, cf figure 19, nous donne d'après (20):

$$V_m - V_n = \int_{NM} E' dl = Q'/\epsilon_r \int_{NM} E dl = Q'/\epsilon_r Q (V_m - V_n)$$

On passe des anciennes différences de potentiel aux nouvelles en multipliant les premières par un même facteur. Deux points qui étaient situés sur des équipotentiels en l'absence d'arborescence d'eau le sont donc aussi en présence d'une arborescence, seule la valeur numérique du potentiel a changée.

2.2.3. Conséquences de la deuxième hypothèse.

Si la frontière de l'arborescence d'eau a la forme d'une équipotentielle du réseau initial sans arborescence d'eau, elle est aussi une équipotentielle du système avec arborescence.

La conséquence pratique est que le système pointe-pointe avec ou sans arborescence d'eau peut être modélisé simplement par deux condensateurs en série entre les électrodes.

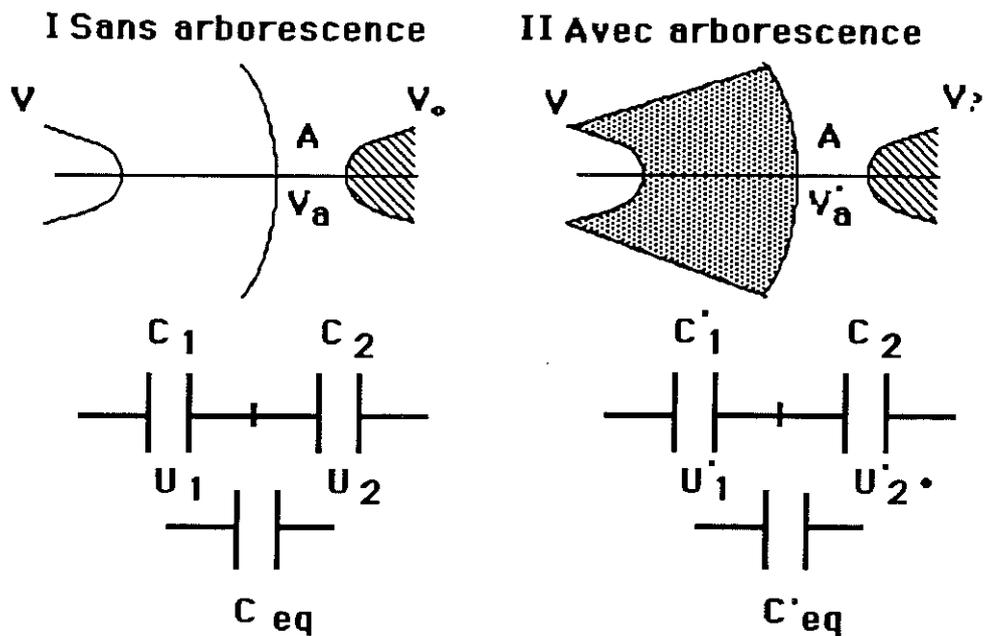


Figure 20: Le système pointe-pointe peut désormais être modélisé par deux condensateurs en série.

Entre C_1 et C'_1 , nous avons la relation $C_1 = \epsilon_r C'_1$.

Le système I fournit les relations :

$$C_1 \cdot U_1 = C_2 \cdot U_2 \quad (21) \quad \text{et} \quad C_2 \cdot U_2 = C_{eq} \cdot V \quad (22)$$

(C_{eq} condensateur équivalent à C_1 et C_2)

qui en posant $u_i = U_i/V$ deviennent, avec $u_1 + u_2 = 1$:

$$C_1 \cdot u_1 = C_2 \cdot u_2 \quad (23) \quad \text{et} \quad C_2 \cdot u_2 = C_{eq} \quad (24)$$

Le système II fournit les relations équivalentes :

$$C'_1 \cdot u'_1 = C_2 \cdot u'_2 \quad (25) \quad \text{et} \quad C_2 \cdot u'_2 = C'_{eq} \quad (26)$$

Le coefficient de renforcement de champ recherché C_r est égal à (18) :

$$V'_a / V_a = u'_2 / u_2$$

les relations (24) et (26) fournissent:

$$C'_{eq}/C_{eq} = u_2 / u_1 = C_r \quad (27)$$

ce qui donne avec (26):

$$d'où \quad C_r = \left\{ \frac{(u_1 + u_2)}{e_r} \right\}^{-1} \quad (28)$$

2.2.3. Comparaison des résultats fournis par le modèle aux résultats expérimentaux et conclusion.

En nous plaçant dans une configuration proche de celle que nous avons rencontrée expérimentalement, soit $d = 500\mu\text{m}$, $R = 10\mu\text{m}$, $L = 355\mu\text{m}$, la relation (16) nous donne:

$$\begin{aligned} u_2 &= 0,41; \\ u_1 &= 0,59 \end{aligned}$$

La relation (31) donne alors avec $e_r = 2$:

$$C_r \text{ calc.} = 1,42$$

correspondant à un accroissement de champ de 42%

Dans la même configuration le coefficient expérimental de renforcement du champ, rapport de la tension de référence à la tension d'obtention d'une arborescence électrique en présence d'arborescence d'eau, est(cf 1.5.3):

$$C_r \text{ exp.} = 31,4\text{kV}/17,6\text{kV} = 1,78$$

correspondant à un accroissement de champ de 78%.

Nous retiendrons de cette première modélisation que l'hypothèse d'homogénéité de l'arborescence d'eau présente l'avantage de permettre la mise en oeuvre d'un calcul relativement simple de la modification des potentiels et du champ par l'arborescence d'eau. Elle ne permet pas cependant de rendre compte de la totalité du renforcement de champ constaté expérimentalement.

De plus, dans cette hypothèse d'une arborescence homogène, la valeur de permittivité relative $\epsilon_r = 2$, utilisée, à la suite de KOO et al.[1], dans notre dernier calcul semble difficilement compatible avec des mesures de concentration en eau réalisées au laboratoire. Ces mesures concluent en effet à une concentration moyenne maximale de 15%[7] dans l'arborescence d'eau. Une valeur de permittivité relative de 2 par rapport au polyéthylène requerrait plutôt une concentration moyenne en eau de 30%[3].

2.3.Un nouveau modèle de l'arborescence d'eau, considérée comme un milieu hétérogène.

Plutôt que de mettre en cause la validité de l'un ou l'autre des résultats expérimentaux précédents, nous proposons une autre interprétation de la relation entre la concentration moyenne en eau d'une part et la permittivité de l'arborescence d'autre part qui permette de concilier les deux résultats précédents [1,7]. Cette interprétation suppose l'introduction d'un nouveau paramètre caractéristique de l'arborescence d'eau contrôlant ses propriétés diélectriques.

En effet, si l'hypothèse de l'homogénéité de l'arborescence d'eau débouche sur une contradiction, c'est qu'elle ignore un élément de la "réalité physique" décisif pour les propriétés l'arborescence d'eau. Cet élément est celui mis en évidence par le travail expérimental de CHEN [4], à savoir l'existence d'une structure de l'arborescence d'eau et d'une hétérogénéité dans la répartition spatiale des micro-cavités d'eau au sein de l'arborescence.

Les conclusions précédentes nous conduisent à proposer un nouveau modèle de l'arborescence d'eau dont nous précisons les principales hypothèses.

2.3.1.Enoncé et justification des hypothèses du modèle.

Nous supposons que:

1-Toutes les arborescences d'eau ont pratiquement la même structure de répartition de l'eau, quelle que soit leur longueur et quelle que soit leur densité maximale en eau. Elles sont "homothétiques" du point de vue de la répartition spatiale de l'eau.

2-Les arborescences d'eau sont isotropes dans un demi-espace. La concentration en eau dans l'arborescence d'eau ne dépend que de la distance D à la pointe d'eau et pas de la direction, pourvu que l'on soit en avant de la pointe d'eau.

3-La concentration en eau dans une région de l'arborescence est donnée en fonction de la concentration à la pointe d'eau, C_0 , et de D/L , (D = distance au sommet de la pointe d'eau, L = longueur de l'arborescence). La relation entre la concentration et D/L est donnée par une fonction en escalier dont les valeurs sont fixées d'après les données expérimentales fournies par [4] (cf fig.21).

Les deux premières hypothèses sont purement théoriques, elles ne s'appuient pas sur des données expérimentales particulières. Mais simplement leur choix ne paraît pas contradictoire avec la connaissance générale que l'on a des arborescences d'eau.

La première repose sur l'idée que si un même processus physique est à l'origine du développement des arborescences d'eau, on peut légitimement s'attendre à ce que ce processus entraîne une identité de structure entre les arborescences, indépendamment de leur taille et de leur concentration maximale en eau. Cette supposition paraît raisonnable du moins dans la plage de variation effective de la longueur (de 100 à 500 μm) et de la concentration maximale (de 0,3 à 0,6). La validité de cette hypothèse sera vérifiée a posteriori par la conformité ou non des valeurs calculées avec les données expérimentales du renforcement de champ.

La seconde repose sur l'idée suivante: le matériau de départ est isotrope, à l'échelle de l'arborescence d'eau, et le champ électrique également, au moins au voisinage de l'axe, là où il est le plus intense. On doit, par ailleurs, retrouver dans la répartition de l'eau la symétrie des facteurs qui influent sur sa propagation ou la conditionnent. Il n'y a donc aucune raison a priori, que la répartition de l'eau ne soit pas isotrope.

La troisième hypothèse répond essentiellement à des considérations pratiques. Elle présente l'intérêt de conserver la simplicité du premier modèle en divisant l'arborescence d'eau en régions dans lesquelles la densité d'eau est homogène, tout en intégrant la complexité due à l'hétérogénéité du milieu.

Le fait que la concentration dépende de D/L et non pas de L traduit la condition de l'hypothèse 1 selon laquelle la structure de répartition de l'eau est indépendante de la longueur de l'arborescence, que les arborescences sont homothétiques.

2.3.2. Mise en oeuvre pratique des hypothèses précédentes.

a- Un découpage de l'arborescence en régions.

Pratiquement, ces hypothèses reviennent à découper toute arborescence d'eau en régions distinctes, contiguës, délimitées par des hémisphères concentriques à la pointe d'eau (cf fig 15). Dans chacune de ces régions la concentration en eau est constante ainsi que la permittivité. La concentration en eau décroît lorsqu'on passe d'une région à l'autre en s'éloignant de la pointe d'eau.

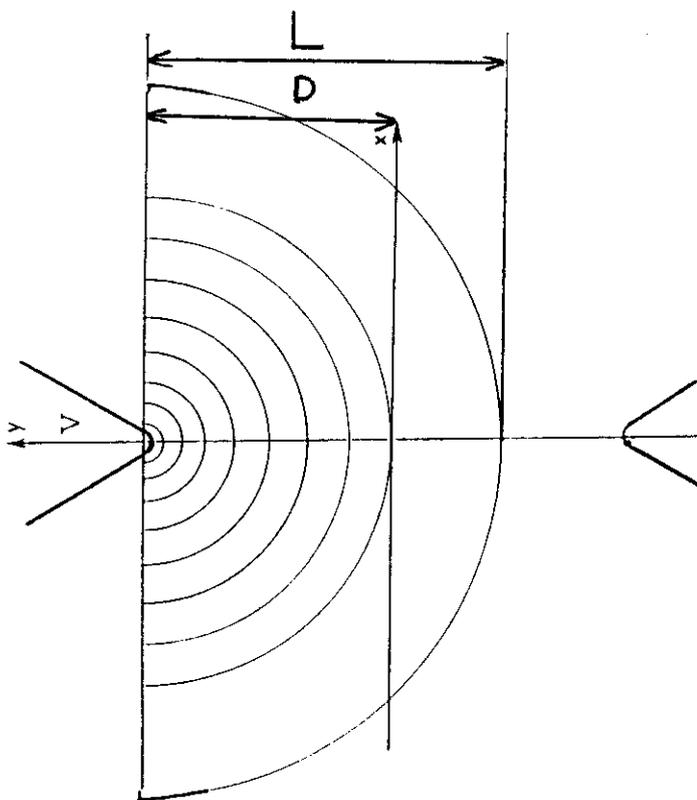


Figure 15: Modélisation de l'arborescence d'eau par une série de demi-sphères concentriques.

Le découpage en neuf régions, les valeurs des intervalles entre les sphères comportent évidemment une part d'arbitraire. Nous nous sommes efforcés de réduire cet arbitraire, en effectuant le découpage et en fixant les valeurs des

concentrations de façon à approcher une répartition en eau connue expérimentalement [4] .

b-La valeur des concentrations dans chaque régions.

La concentration en eau dans chaque région d'une arborescence déterminée dépend du paramètre, C_0 , la concentration à proximité immédiate de la pointe d'eau. Mais la structure de la répartition, définie par les rapports entre les concentrations de chaque région, est la même quelle que soit C_0 , cf hypothèse 1. Les concentrations seront donc exprimées en valeur relative $C_{rel} = C / C_0$ pour toutes les familles d'arborescences quelles que soit leur concentration à la pointe d'eau.

L'appartenance à une région déterminée est fixée par la valeur du rapport D/L .

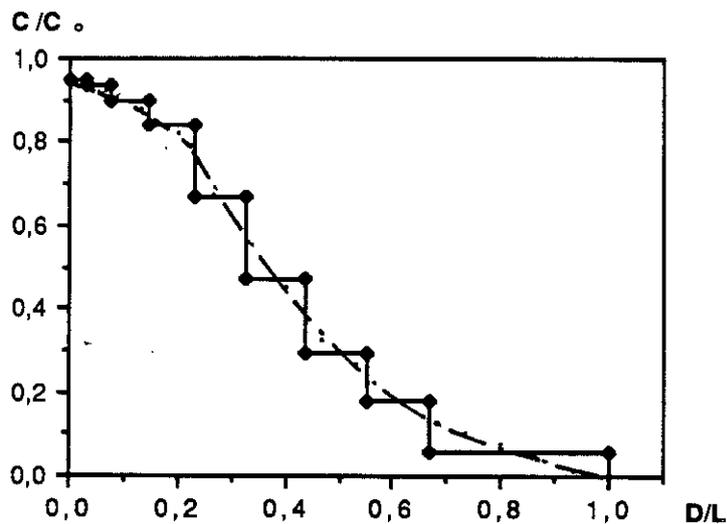


Figure 21 : Valeur de la concentration en eau exprimée en valeur relative par rapport à C_0 au sein de l'arborescence d'eau en fonction de D/L . Les dimensions des marches ont été choisies pour encadrer la distribution expérimentale de [4] rappelée en trait discontinu sur la figure.

c-Définition de la fonction en escalier par un ensemble de valeurs numériques.

La fonction en escalier de la figure 21 est décrite par la donnée conjointe des différentes concentrations relatives et des l'intervalles de valeurs de D/L dans lequel cette concentration est constante. Ceci revient à fixer 20 valeurs

numériques, 10 pour les concentrations et 10 pour les intervalles correspondants. Soit c_i ces valeurs de C_{rel} et a_i ces valeurs de D/L ,

$$C_{rel} = c_i \text{ pour } a_{i-1} \leq D/L < a_i ; \quad (29)$$

$$0 \leq i \leq 9 .$$

L'ensemble des valeurs numériques est présenté sous forme de tableau:

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a_i	0	0,03	0,08	0,14	0,2	0,03	0,44	0,55	0,67	1
c_i	1	0,95	0,93	0,89	0,84	0,67	0,47	0,29	0,18	0,06

Les rayons des demi-sphères de séparation entre les régions s'expriment aussi en fonction des a_i et de la longueur L de l'arborescence. En effet par définition les demi-sphères étant concentriques:

$$R_i = D_i + R_0 ; \quad (30)$$

$$0 \leq i \leq 9$$

où D_i est la distance à la pointe associée à R_i et R_0 le rayon de courbure de la pointe d'eau d'où:

$$R_i = a_i \cdot L + R_0 ; \quad (31)$$

$$1 \leq i \leq 9$$

Si l'on suppose résolu le choix de la concentration maximale, problème que nous aborderons plus tard, la concentration eau en chaque point de l'arborescence est désormais théoriquement connue. Le problème à résoudre désormais pour aller plus loin est celui du calcul de la permittivité en fonction de la teneur en eau.

2.3.3. Calcul de la permittivité en fonction de la teneur en eau.

Il existe de nombreux modes de calcul de la permittivité d'un milieu hétérogène [3,20], il est donc nécessaire d'effectuer un choix parmi ces possibilités.

Pour effectuer ce choix, il est nécessaire de déterminer les différences qui séparent les différentes théories.

Parmi toutes ces théories, on peut d'abord distinguer celles qui négligent les interactions entre les charges et celles qui les prennent en compte.

Parmi les théories qui négligent toutes les interactions, la plus connue est la théorie de MAXWELL-WAGNER [21], qui permet de calculer la permittivité d'un milieu à deux constituants. L'approximation sur laquelle repose cette théorie définit les limites de son domaine de validité. Elle suppose que la concentration de la phase dispersée est faible relativement au milieu initial. Il est clair que dans notre cas cette condition n'est pas satisfaite puisque la concentration en eau peut atteindre localement 60 % du volume de l'arborescence d'eau [22]. Il est donc indispensable de prendre en compte les interactions entre les charges électriques.

Parmi les théories qui prennent en compte les interactions dipolaires ou multipolaires, on peut faire encore une autre distinction importante entre les théories qui prennent en compte ces interactions indirectement et implicitement et les théories qui prennent en compte directement et explicitement ces interactions.

Les premières, sont principalement, celles de BRUGGEMAN [23] ou de LANDAU [24]. Ces théories supposent «que la portée des interactions est infinie.»[20]. L'effet des interactions n'est pas calculé explicitement mais se traduit par la valeur du champ moyen qui règne dans le milieu. Le résultat est généralement une surestimation des interactions.

Les secondes s'efforcent de calculer complètement les interactions ou du moins les plus importantes d'entre elles en tenant compte de leur portée. Mais, du fait de la difficulté du problème, elles font l'hypothèse que les particules sont situées sur un réseau régulier. Toutefois la régularité et la forme du réseau ne constituent pas une hypothèse intrinsèque de la théorie, seule la fraction volumique apparaît explicitement dans l'expression de la permittivité moyenne du milieu hétérogène. Le premier calcul de ce genre est dû à RAYLEIGH [25]. RAYLEIGH a calculé la permittivité relative d'un milieu constitué de sphères disposées sur un réseau cubique et plongées dans un autre diélectrique. Quand les sphères sont parfaitement conductrices la permittivité relative a pour expression en fonction de la fraction v du volume occupé par les sphères [25] :

$$\epsilon_r = 1 + \frac{3v}{1 - v - 1,65 v^{10/3}} \quad (32)$$

L'intérêt de ce calcul est qu'il est indépendant de la taille des sphères. Sa validité a été testée expérimentalement et les valeurs théoriques calculées se sont trouvées en très bon accord avec l'expérience jusqu'à une fraction volumique de 0,523 [26]. C'est la raison pour laquelle nous avons utilisé l'expression (35) pour déterminer la permittivité de chacune des régions de l'arborescence.

Nous faisons donc l'hypothèse que les cavités au sein de l'arborescence sont remplies d'eau très conductrice. Cette hypothèse est en accord avec des résultats de mesure de la concentration en ions dans les arborescences d'eau. Cette concentration peut atteindre celles de la pointe d'eau [26] et nous avons utilisée des concentrations de 0,1 mole/litre à 1 mole/litre de NaCl, fortement conductrices, pour alimenter la pointe d'eau.

Pour aller plus avant dans le calcul des permittivités dans les différentes régions de l'arborescence d'eau, il reste désormais à fixer la concentration C_0 à proximité de la pointe d'eau. Nous cherchons d'abord à déterminer la valeur maximale C_{max} de C_0 .

2.3.4. Valeur de la concentration maximale à la pointe d'eau.

Il y a nécessairement une part d'arbitraire dans le choix de cette concentration puisque la concentration ne peut être mesurée directement. Néanmoins notre choix sera guidé par les considérations suivantes:

La première est d'ordre expérimentale: d'après [22], la densité maximale rencontrée, dans le voisinage immédiat de la pointe, est d'environ 1 cavité par μm^3 .

Par ailleurs si l'on range des cavités sphériques sur un réseau régulier, le nombre maximal de cavités contiguës que l'on peut disposer dans un espace donné dépend du type de réseau. Voici, d'après [20], les fractions volumiques de remplissage de trois réseaux réguliers:

	Cubique simple	Cubique face centrée	Diamant
Fraction vol. de remplissage	0,523	0,68	0,74
Nb de cavités de $\phi = 1 \mu\text{m}$ par mm^3 .	10^9	$1,28 \cdot 10^9$	$1,41 \cdot 10^9$

Enfin dans le modèle de RAYLEIGH, la permittivité diverge pour une fraction volumique de 0,636 .

En conséquence nous choisirons pour C_{max} , la valeur 0,68 qui semble la plus cohérente avec le mode de calcul de la permittivité que nous avons choisi. Cette valeur nous permet désormais de calculer les fractions volumiques de chaque région de l'arborescence et par suite les permittivités associées et la concentration moyenne en eau dans l'arborescence.

2.3.5. Valeurs des permittivités relatives et concentration moyenne pour $C_0 = 0,68$.

Les valeurs des c_i , indiquées § 3.1.2, permettent de calculer les fractions volumiques v_i d'eau contenue dans chaque région de l'arborescence. La relation (35) permet de calculer les permittivités relatives ϵ_i correspondantes. Ces valeurs sont rassemblées dans le tableau suivant:

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
v_i	0,65	0,64	0,60	0,57	0,46	0,32	0,20	0,12	0,41	
ϵ_i			24,4	10,8	4,22	2,49	0,17	1,42	1,13	

Il est intéressant par ailleurs de voir à quelle concentration moyenne d'eau, dans l'arborescence nous sommes conduits par la répartition précédente et avec une concentration maximale de 0,68.

Cette concentration moyenne est calculée en pondérant la fraction volumique en eau de chaque région v_i par le poids du volume V_i de cette région dans le volume total de l'arborescence:

$$C_{moyen} = \frac{\sum v_i V_i}{V_{tot}}$$

Pour une arborescence d'eau d'une longueur de $300\mu m$:

$$C_{moyen} = 10,7\%$$

Cette valeur est en bon accord avec des résultats expérimentaux concluant à des valeurs moyennes de concentration en eau de 10 à 15%[7].

Le nouveau modèle de l'arborescence d'eau permet donc de concilier des valeurs de concentration locales très élevées, avec des teneurs moyennes en eau qui restent modérées.

2.3.6. Une nouvelle modélisation de la distribution des potentiels dans l'espace inter-électrode avec une arborescence hétérogène.

Nous admettrons, comme au § 2.1, que les équipotentiels en l'absence d'arborescence d'eau sont des hyperboloïdes de révolution. Cette approximation nous permet de connaître les valeurs des potentiels et du champ en tous points de l'espace inter-électrode.

Si maintenant nous introduisons entre les électrodes différentes régions de permittivités décroissantes, délimitées par des sphères, la répartition des potentiels au sein de l'espace inter-électrode sera évidemment modifiée. L'approximation des hyperboloïdes de révolution ne nous sera plus d'aucun secours pour estimer les valeurs du potentiel et du champ et le calcul de la valeur du renforcement de champ deviendra d'une grande complexité. Ce constat nous conduit à proposer une simplification de la nouvelle situation qui facilite le calcul du champ.

a- Une nouvelle hypothèse et ses conséquences.

Nous faisons l'approximation que chacune des régions de l'arborescence d'eau est délimitée par l'une des hyperboloïdes du réseau.

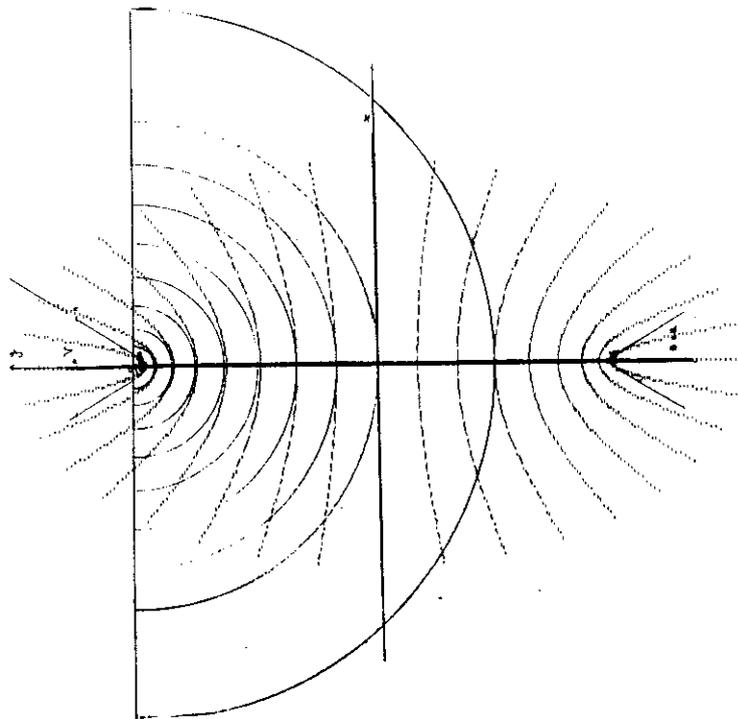


Figure 22: Superposition du réseau d'équipotentiels et des neufs régions de l'arborescence d'eau.

Les demi-sphères ne coïncident en fait avec les hyperboloïdes que dans une seule région limitée au voisinage de l'axe. Cette région est également celle dans laquelle le champ est le plus élevé. L'approximation revient donc à supposer que la région au voisinage de l'axe dans laquelle les deux familles de courbes se rapprochent et coïncident est prépondérante pour le calcul du renforcement de champ.

Nous avons supposé par ailleurs, que dans l'arborescence d'eau, la concentration en eau et par suite la permittivité était homogène, à l'intérieur de chaque région. Il en résulte que la modification des valeurs de la permittivité, dans chaque région, par l'arborescence d'eau conserve la topologie des potentiels et cela, pour les mêmes raisons que celles développées au § 2.2.2. Par suite, les emplacements des frontières entre les différentes régions d'une arborescence d'eau, qui sont par l'hypothèse précédente, des équipotentiels en l'absence d'arborescence d'eau, restent donc des équipotentiels au sein d'une arborescence d'eau. Le résultat est qu'aussi bien en présence qu'en l'absence d'arborescence d'eau le système pointe-pointe peut être modélisé par un ensemble de condensateurs en série.

b-Calcul du coefficient C_r de renforcement du champ, sur la pointe métallique.

Si A est le point de l'axe de révolution, séparant l'arborescence d'eau du polyéthylène vierge, et V_a le potentiel au point A sans arborescence, V'_a le potentiel au même point avec arborescence, nous avons (15):

$$C_r^* = V'_a/V_a$$

Nous allons, pour le calcul de ce rapport utiliser le réseau des condensateurs simulant l'arborescence au sein de l'espace inter-électrode.

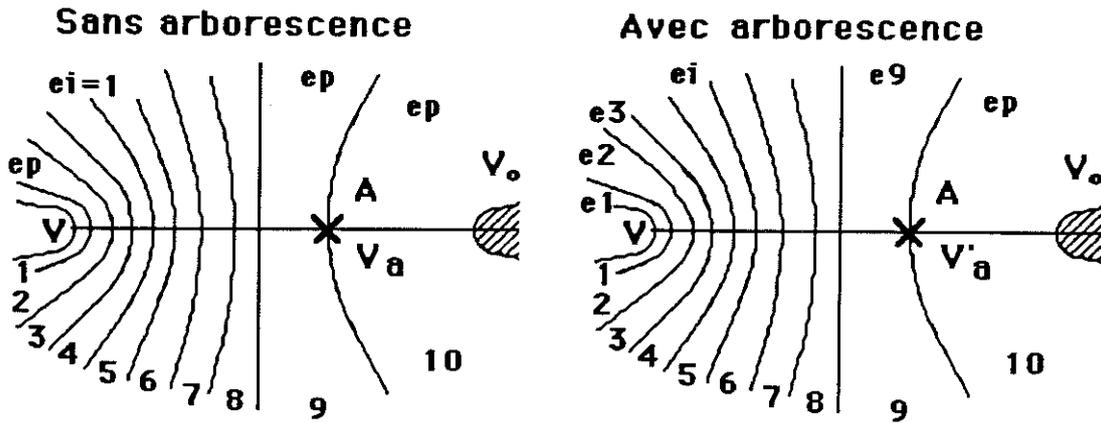


Figure 23: La situation est caractérisée, sans arborescence, par une permittivité homogène ϵ_p , avec arborescence par diverses permittivités, ϵ_i selon les régions, données en valeurs relatives par rapport à ϵ_p .

La situation précédente est modélisée par dix condensateurs en série. Le 10ème condensateur, situé dans une région extérieure à l'arborescence a la même valeur, avec ou sans arborescence.

Les neuf premiers condensateurs sont ensuite remplacés par un condensateur équivalent pour se ramener au problème déjà traité dans le cas de l'arborescence homogène.

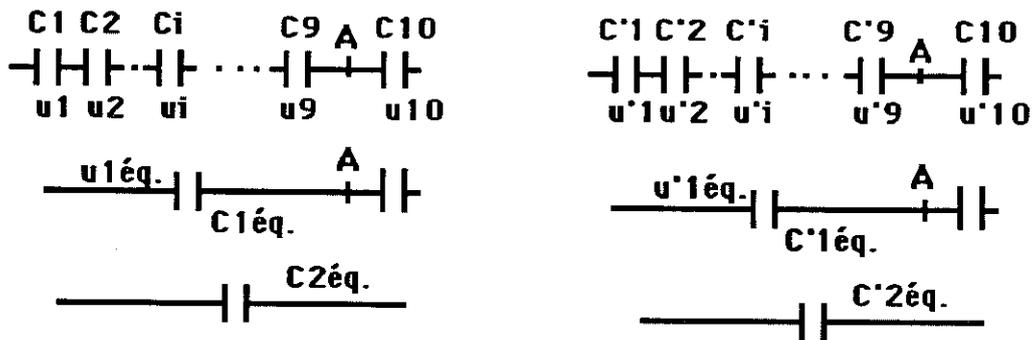


Figure 24: On se ramène au problème à deux condensateurs déjà traité (§2.2.3) en remplaçant les 9 premiers condensateurs par un condensateur équivalent.

Les u_j et u'_j sont les tensions aux bornes des condensateurs rapportées au potentiel V de la pointe d'eau, $u_j = U_j/V$ avec U_j ddp aux bornes du condensateur C_j . Les u_j sont fonction de la position dans l'espace inter-électrode et sont connus par (13).

Entre les nouveaux condensateurs et les anciens nous avons la relation:

$$C'_i = e_i \cdot C_i \quad (33).$$

Par ailleurs, le système de condensateurs sans arborescence fournit les relations:

$$C_i \cdot u_i = C_{10} \cdot u_{10} = Q, \quad 1 \leq i \leq 9 \quad (34)$$

où Q est la charge totale sur les électrode.

D'après (27) :

$$C^*_r = u'_{10}/u_{10} = C'_{2eq}/C_{2eq} \quad (35)$$

avec C_{2eq} capacité totale entre les électrodes sans arborescence et C'_{2eq} capacité totale entre électrodes avec arborescence (cf figure 24).

Avec (34) nous obtenons:

$$\frac{1}{C_{2eq}} = \sum \frac{1}{C_i} + \frac{1}{C_{10}} = \frac{\sum u_i}{C_{10} \cdot u_{10}} + \frac{1}{C_{10}}$$

d'où, en notant que $\sum u_i = 1, 1 \leq i \leq 10$

$$C_{2eq} = C_{10} u_{10} \quad (36)$$

De même avec (33) nous obtenons:

$$\frac{1}{C'_{2eq}} = \sum \frac{1}{C'_i} + \frac{1}{C_{10}} = \sum \frac{1}{e_i \cdot C_i} + \frac{1}{C_{10}}$$

(34) nous donne :

$$\frac{1}{C'_{2eq}} = \sum \frac{u_i / e_i}{C_{10} \cdot u_{10}} + \frac{1}{C_{10}} = \sum \frac{u_i / e_i + u_{10}}{C_{10} \cdot u_{10}}$$

d'où avec (35) et (36):

$$C^*_r = (\sum u_i / e_i + u_{10})^{-1} \quad (37)$$

2.3.7. Comparaison des résultats fournis par le modèle aux résultats expérimentaux.

Les u_i sont donnés par (13) de plus, avec l'hypothèse $C_o = 0,68$, nous connaissons également les e_i . L'ensemble de ces valeurs permet de calculer C^*r .

a-Valeur du renforcement obtenu dans le cas ou $C_o = 0,68$.

Les u_i sont calculés pour une arborescence d'une longueur moyenne de $355\mu\text{m}$ correspondant à la classe n°III. Le tableau suivant donne le calcul de C^*r_3 pour ces valeurs:

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
u_i	0,119	0,087	0,066	0,054	0,045	0,043	0,037	0,036	0,106	0,406
e_i	-	-	24,4	10,8	4,22	2,49	1,74	1,42	1,13	
u_i/e_i	0	0	0,003	0,005	0,011	0,017	0,022	0,025	0,097	

$$\sum_{i=1}^9 u_i/e_i = 0,176, \quad 1 \leq i \leq 9$$

$$\sum_{i=1}^9 u_i/e_i + u_{10} = 0,582, \quad 1 \leq i \leq 9$$

$$C^*r = (0,582)^{-1}$$

$$C^*r_3 \text{ théor.} = 1,72$$

Dans le cas des arborescences de la classe de transmittance n°III du §1.5.3. ($\Delta I/I_o = 29\%$), nous avons obtenu un intervalle de confiance de [16,7kV;18,4kV] pour la tension moyenne d'apparition d'une arborescence électrique. L'intervalle de confiance de la tension moyenne de référence, sans arborescence, est de [29,6kV;33,2kV]. Les valeurs d'encadrement de C^*r_3 sont donc :

$$1,6 \leq C^*r_3 \text{ exp.} \leq 1,99$$

Le milieu de l'intervalle est :

$$C^*r_3 \text{ exp.} = 1,79$$

Les valeurs de C^*r , expérimentales et théoriques, sont cette fois en bon accord, pour la classe de transmittance d'arborescence n°III du §1.5.3. L'écart entre les deux valeurs est beaucoup plus faible que dans le cas de l'arborescence homogène. Toutefois, pour tester la validité du modèle, il est souhaitable de disposer d'autres valeurs théoriques pour les comparer aux résultats expérimentaux obtenus pour les classes de transmittance d'arborescence I et II du §1.5.3. Le calcul du renforcement de champ ne peut être fait qu'à partir de la concentration à la pointe C_0 . Le problème qui se pose est donc de déterminer les concentrations à la pointe qui permettront de calculer les C^*r pour ces deux classes d'arborescences.

b-Fixation des C_0 pour les deux autres classes d'arborescences.

Nous venons de comparer le C^*r calculé sur la base de C_0 , fixée par hypothèse à 0,68, au C^*r expérimental de la classe d'arborescences n°III, d'un $\Delta I/I_0$ de 29%. En procédant ainsi, nous avons admis implicitement que la concentration à la pointe de la troisième classe d'arborescence C_{03} dont nous ignorions jusque là la valeur, était de 0,68. Mais si nous fixons ainsi C_{03} , nous attribuons implicitement aussi une valeur à C_{02} , et C_{01} , les concentrations correspondantes pour les classes II et I d'arborescence d'eau qui ont respectivement une absorption $\Delta I/I_0$ de 21 et 13%. En effet l'expression (5),

$$A = \text{Log } I_0/I = t C L$$

établit une relation entre les valeurs des concentrations de chaque classe d'arborescence et leurs absorbances respectives.

L'absorbance associée aux $\Delta I/I_0$ mesurés ne correspond pas aux concentrations à la pointe mais à une moyenne de différentes concentrations, dans chaque région, puisque la direction d'observation traverse plusieurs régions d'arborescence. Cet effet de moyenne permet de conserver une certaine validité à l'expression(2) :

$$A = t C L$$

qui ne pourrait être employée pour les très fortes concentrations, à proximité de la pointe d'eau.

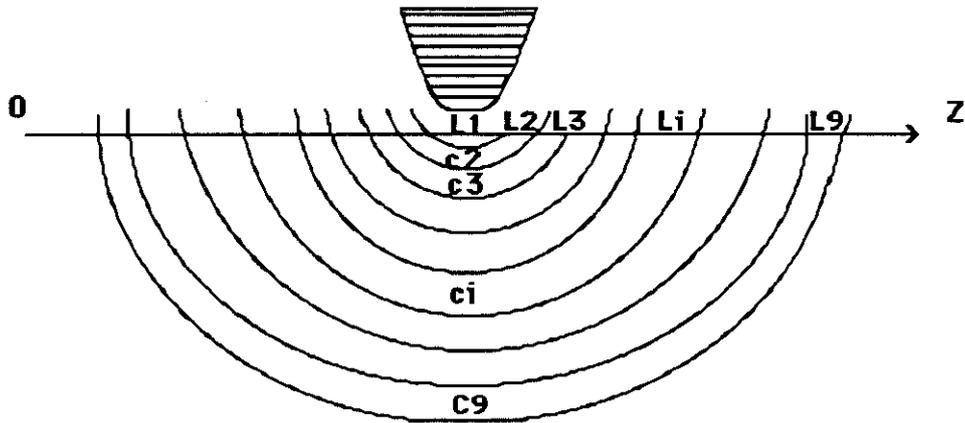


Figure 25 : La concentration rencontrée par la lumière incidente est une moyenne sur plusieurs régions traversées.

Toutefois cette concentration moyenne est proportionnelle à C_0 . Si toutes les régions sont traversées, cf figure 25,

$$C_{\text{moy.}} = L^{-1} 2 \sum_{1 \leq i \leq 9} C_i L_i ; \quad (38)$$

avec C_i , concentration dans chaque région, L_i demi-trajet optique dans chaque région, $L = 2 \sum L_i$, trajet optique total dans l'arborescence égal à la longueur de l'arborescence. Mais $C_i = c_i C_0$ par suite :

$$C_{\text{moy.}} = C_0 L^{-1} 2 \sum_{1 \leq i \leq 9} c_i L_i ; \quad (39)$$

Nous avons donc les relations:

$$A_1 = \text{Log } I_0/I_1 = t C_{\text{moy } 1} L_1 = t C_{01} \sum_{1 \leq i \leq 9} c_i L_{i1} ; \quad 1 \leq i \leq 9.$$

$$A_2 = \text{Log } I_0/I_2 = t C_{\text{moy } 2} L_2 = t C_{02} \sum_{1 \leq i \leq 9} c_i L_{i2} ; \quad 1 \leq i \leq 9.$$

$$A_3 = \text{Log } I_0/I_3 = t C_{\text{moy } 3} L_3 = t C_{03} \sum_{1 \leq i \leq 9} c_i L_{i3} ; \quad 1 \leq i \leq 9.$$

$\sum c_i L_{i1}$ a la dimension d'une longueur que nous supposons proportionnelle à la longueur moyenne de la classe d'arborescence soit L_1 et de même pour les autres classes, d'où les relations:

$$C_{o1}L1 / C_{o3}L3 = A1/A3 \quad (40)$$

$$C_{o2}L2 / C_{o3}L3 = A2/A3 \quad (41)$$

Les valeurs des absorbances des longueurs et des concentrations sont rassemblées dans le tableau suivant:

i	$\Delta I/I_o$	A_i	L_i	C_{oi}
1	0,13	$\text{Log } 1/0,87 = 0,137$	290 μm	0,33
2	0,21	$\text{Log } 1/0,79 = 0,235$	320 μm	0,52
3	0,29	$\text{Log } 1/0,71 = 0,341$	355 μm	0,68

c-Valeurs théoriques des coefficients C^*r , pour les classes I et II d'arborescences et comparaison avec l'expérience.

Les valeurs de C_{o1} et C_{o2} nous permettent désormais de calculer les valeurs théoriques de C^*r_1 et C^*r_2 comme nous l'avons fait pour C^*r_3 .

Classe n°I: La longueur moyenne de 290 μm permet avec (16) d'obtenir les u_j . Les e_j sont calculés à partir de C_{o1} .

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
u_j	0,11	0,08	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,08	0,46
e_j	2,46	2,42	2,33	2,21	1,87	1,56	1,32	1,19	1,06	

$$C^*r1 \text{ théor.} = 1,3$$

Pour la classe n°I ($\Delta I/I_o$ 13%), nous avons obtenu, un intervalle de confiance de [23,7kV;26,9kV], pour la tension moyenne d'apparition d'une arborescence électrique. L'intervalle de confiance de la tension moyenne de référence, sans arborescence, est de [29,6kV;33,2kV]. Les valeurs d'encadrement de C^*r1 sont donc:

$$1,1 \leq C^*r1 \text{ exp.} \leq 1,40$$

Le milieu de l'intervalle est :

$$C^*r_1 \text{ exp.} = 1,25$$

Classe n°II: La longueur moyenne de 320 μ m permet avec (16) d'obtenir les u_j . Les e_j sont calculés à partir de C_02 .

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
u_j	0,11	0,08	0,06	0,05	0,44	0,04	0,03	0,03	0,09	0,44
e_j	5,28	5,02	4,45	3,86	2,74	1,99	1,53	1,3	1,09	

$$C^*r_2 \text{ théor.} = 1,47$$

Pour la classe n°II ($\Delta I/I_0$ 21%), nous avons obtenu, un intervalle de confiance de [19,7kV;22,9kV], pour la tension moyenne d'apparition d'une arborescence électrique. L'intervalle de confiance de la tension moyenne de référence, sans arborescence, est de [29,6kV;33,2kV]. Les valeurs d'encadrement de C^*r_2 sont donc:

$$1,29 \leq C^*r_2 \text{ exp.} \leq 1,68$$

Le milieu de l'intervalle est :

$$C^*r_3 \text{ exp.} = 1,48$$

Il est possible à partir, des C^*r théoriques précédents et de la tension de référence [29,6kV;33,2kV], de calculer les bornes attendues de la tension d'obtention d'une arborescence électrique. Ces valeurs ainsi calculées peuvent être comparées aux tensions mesurées, pour les 3 classes d'arborescences:

$$V_{\text{inf. ref}} / C^*r \leq V. \text{ théor.} \leq V_{\text{sup. ref}} / C^*r$$

	C^*r théor.	$V_{\text{inf. ref}} / C^*r$	$V_{\text{sup. ref}} / C^*r$	Valeurs expérimentales
I	1,3	22,8kV	25,5kV	24,1kV
II	1,47	20,1" "	22,6" "	21,3" "
III	1,72	17,2" "	19,3" "	18,2" "

Nous présentons sur un même graphe les valeurs expérimentales et les valeurs théoriques de tension d'obtention d'une arborescence électrique.

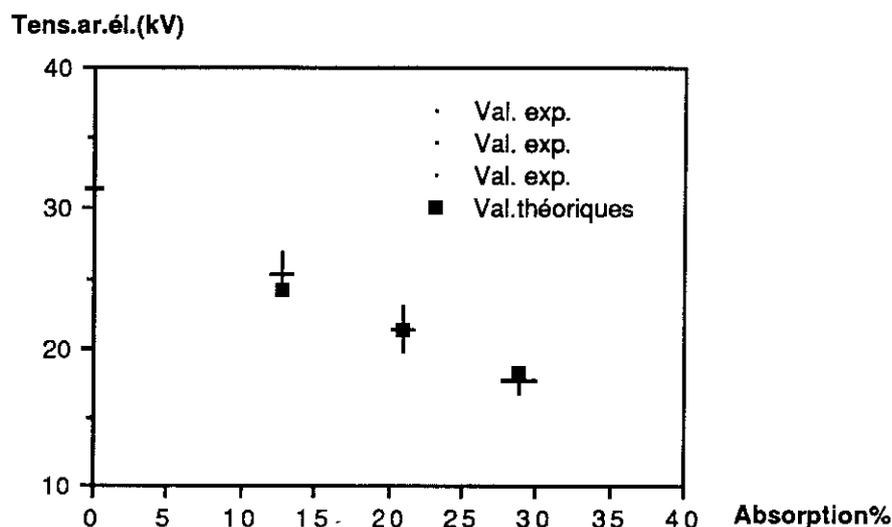


Figure 26: Sur ce graphe sont indiqués les intervalles de confiance, (représentés par une croix) des valeurs expérimentales de tension d'apparition d'une arborescence électrique et le centre de l'intervalle pour les valeurs théoriques calculées de ces tensions.

Les hypothèses de modélisation que nous avons faites et la valeur de 0,68 choisie pour la concentration en eau à la pointe d'eau des arborescences les plus denses, donnent des valeurs calculées en accord avec les valeurs expérimentales. Toutefois la décroissance calculée de la tension avec l'absorption de lumière est légèrement inférieure à celle que l'on peut constater expérimentalement.

Conclusion.

Le modèle de l'arborescence hétérogène permet d'obtenir un renforcement de champ élevé avec une concentration moyenne en eau modérée. Il permet de concilier différents résultats expérimentaux antérieurs comme une permittivité moyenne d'arborescence d'eau importante de l'ordre de 2 à 3 fois celle du PE[1,17] avec une concentration moyenne en eau ne dépassant pas 15%[7]. Ces résultats étaient difficilement conciliables dans la conception d'une arborescence homogène, une permittivité élevée requérant une densité moyenne d'eau importante.

En résumé dans cette répartition hétérogène des cavités, l'eau a une efficacité dans l'atténuation du champ électrique, bien supérieure à celle d'une répartition homogène. Si l'on se demande quelle est l'origine physique de cet effet, on peut remarquer que la densité d'eau, et la permittivité dans l'arborescence, sont grandes, là où le champ électrique est intense et faibles là où le champ électrique est faible. De ce fait l'atténuation du champ électrique au sein de l'arborescence et son renforcement à l'extérieur, seront en moyenne beaucoup plus importantes qu'avec une répartition homogène qui traiterait de la même manière les régions où le champ électrique est très faible et les régions où il est très élevé. L'arborescence d'eau constitue de ce point de vue un effet régulateur qui écrête le champ et particulièrement là où il est le plus intense.

Jusqu'à maintenant nous nous sommes intéressés essentiellement à l'incidence sur le renforcement de champ de deux paramètres de l'arborescence d'eau, la concentration et la répartition de l'eau. Nous avons laissé de côté, en travaillant à longueur d'arborescence constante, l'incidence sur le renforcement de champ de la taille de l'espace occupé entre les deux électrodes par l'arborescence d'eau. Ce point fait l'objet du paragraphe suivant.

3. INCIDENCE DE LA FRACTION D'ESPACE INTER-ELECTRODE OCCUPEE PAR L'ARBORESCENCE D'EAU SUR LE RENFORCEMENT DE CHAMP.

Introduction.

En géométrie pointe-plan le champ à l'extérieur de l'arborescence d'eau croît avec L/d , L longueur de l'arborescence, d distance inter-électrode (4).

Nous nous proposons d'étudier, en géométrie pointe-pointe, le renforcement de champ obtenu pour trois classes d'arborescences correspondant à 3 valeurs de L/d .

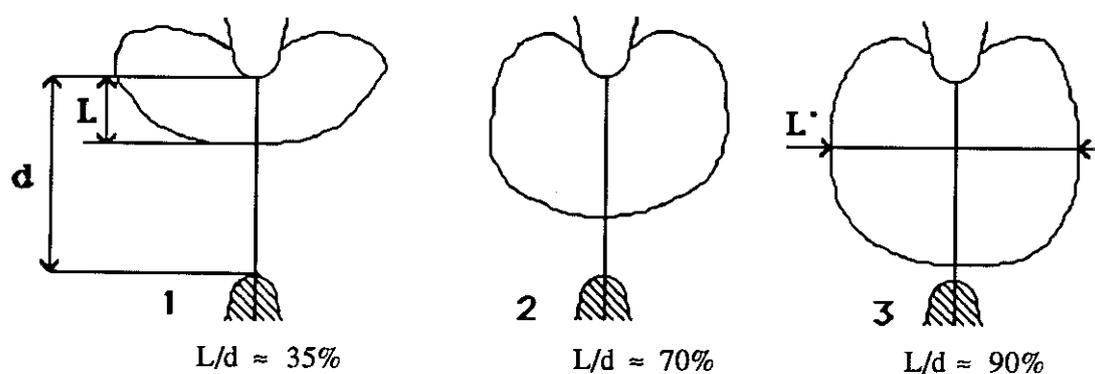


Figure 27: Trois types d'arborescences correspondant à trois valeurs de L/d .

Pour apprécier significativement l'effet du facteur L/d , il faut s'affranchir de l'incidence de la concentration en eau, c'est à dire à d constant produire des arborescences d'eau de concentration équivalente mais de longueurs variées. Le critère choisi, pour déterminer cette concentration commune, sera la concentration à la pointe d'eau C_0 .

C_0 sera évaluée, comme précédemment, en tenant compte de la longueur des arborescences et de leur transmittance.

Nous disposons déjà de données sur 21 arborescences de $C_0 = 0,68$, d'une longueur de $355\mu\text{m}$, soit $L/d = 70\%$. Il est donc nécessaire de produire des arborescences de plus faible et de plus grande dimension.

3.1. Première classe, $L/d \approx 35\%$, arborescences de petites dimensions.

3.1.1. Une difficulté expérimentale.

Nous souhaitons avoir dans ce cas des arborescences de petites tailles avec une concentration en eau importante. Dans les conditions expérimentales habituelles cet objectif est pratiquement irréalisable. En effet une forte concentration en eau exige un champ électrique élevé [7] pendant une durée importante. Et un champ élevé entraîne une grande vitesse de croissance [27], qui avec la durée précédente, se traduit par des arborescences de grandes tailles.

Une méthode appropriée pour concilier les deux paramètres antagonistes consiste à faire pousser les arborescences d'eau à 65°C [28]. Cette technique a soulevé cependant de très grandes difficultés expérimentales qui nous ont empêché de produire des échantillons en nombre important. Il en résulte que nos résultats ne portent que sur 9 échantillons, ce qui ne permet pas de fixer pour la moyenne un intervalle de confiance inférieur à l'éventail des valeurs mesurées.

3.1.2. Caractéristiques de la classe d'arborescences obtenues à 65°C .

Effectif	Intervalle de L	L moy.	$\Delta I/I_0$	Intervalle de tens.
9	$100 \leq L \leq 200\mu\text{m}$	$L_1 = 160 \pm 20\mu\text{m}$	$17,3 \pm 3\%$	$20\text{kV} \leq V_1 \leq 32\text{kV}$

Distribution des tensions:

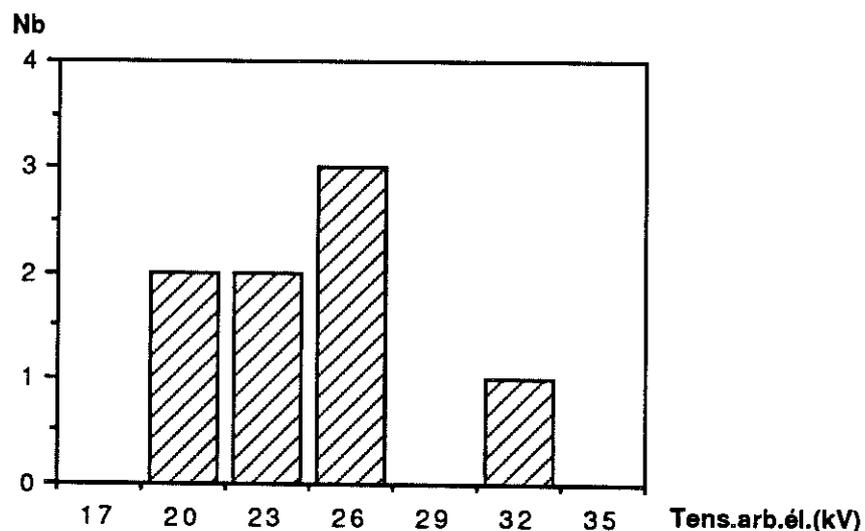


Figure 28: Histogramme des tensions d'apparition d'une arborescence électrique pour 9 éprouvettes contenant des arborescences obtenues à 65°C ;

3.2. Deuxième classe d'arborescences, $L/d \approx 70\%$

C'est la classe de transmittance n°III du § 1.5.3. Nous rappelons ses caractéristiques:

Effectif	L moyen	$\Delta I/I_0$ moyen	Tens.ar.él.moyen	Ecart-type
21	$L_2 = 355 \pm 16 \mu\text{m}$	$29 \pm 1\%$	$V_2 = 17,6 \pm 0,9 \text{ kV}$	2kV

3.3. Comparaison des résultats obtenus pour les deux premières classes.

3.3.1. Comparaison de C_{o1} et C_{o2} , concentration en eau à la pointe des deux premières classes de L/d .

La relation (43) donne la relation entre deux C_o en fonction des longueurs et des transmittances:

$$C_{o1}L_2 / C_{o2}L_1 = A_1/A_2$$

La longueur à prendre en considération ici est le trajet optique dans l'arborescence. Les arborescences obtenues à 65°C ont une forme très aplatie et la longueur transverse L'_1 , est supérieure à la longueur axiale L_1 et vaut $215 \mu\text{m}$.

Cette valeur nous permet de comparer maintenant C_{o1} à la concentration de la deuxième classe d'arborescence correspondant à $L/d \approx 70\%$. Cette classe a pour longueur moyenne $L_2 = 355 \mu\text{m}$ et $C_{o2} = 0,68$.

$$C_{o1} / C_{o2} = (354 / 214) * (\text{Log}1/0,827) / (\text{Log}1/0,711) = 0,92$$

Les deux C_o ne sont pas égales mais très proches l'une de l'autre. La comparaison des tensions d'obtention d'une arborescence électrique de ces 2 classes a donc un sens.

3.3.2. Comparaison des valeurs de tensions obtenues pour les deux premières classes de L/d .

Valeurs expérimentales: Nous présentons sur le graphe suivant les valeurs de tensions d'obtention d'une arborescence électrique en fonction de L/d pour les deux premières classes et la référence.

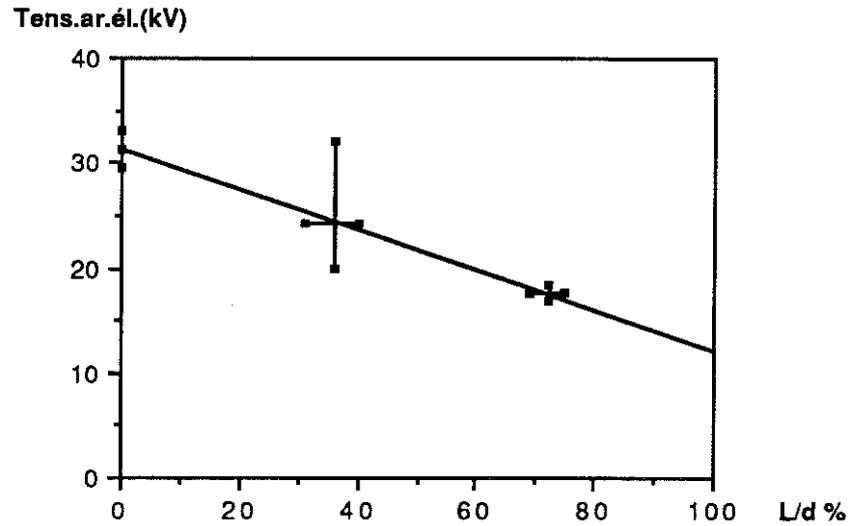


Figure 29: Tensions d'obtention d'une arborescence électrique pour deux classes d'arborescences d'eau de différents L/d et la référence, avec les intervalles de confiance. Pour la classe 1, l'intervalle de tensions est celui des extrêma des valeurs mesurées.

Valeurs théoriques: Nous avons calculé également les valeurs théoriques de tension pour les deux premières classes, compte tenu de leur longueurs moyennes et de leur concentration à la pointe d'eau. Ces valeurs sont portées sur le graphe précédent, décrivant les résultats expérimentaux.

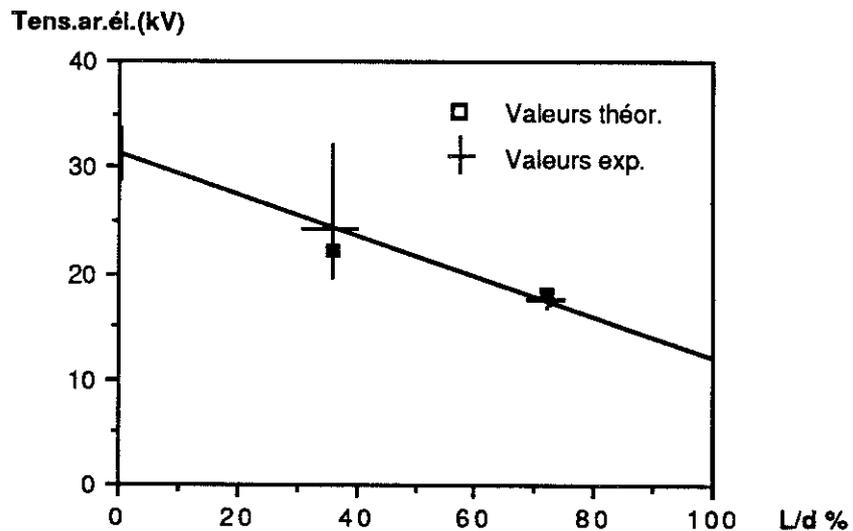


Figure 30: Sur un même graphe on a représenté les intervalles de confiance des valeurs moyennes de tensions d'apparition d'une arborescence électrique pour deux classes d'arborescence d'eau et les valeurs théoriques de ces tensions.

Ces résultats sont peu nombreux, toutefois ils apparaissent cohérents et permettent de percevoir une tendance à la décroissance de la tension avec un accroissement de L/d , à concentration sensiblement constante à la pointe. Nous pouvons espérer que cette tendance sera confirmée par les valeurs de la troisième classe d'arborescences.

3.4. Troisième classe d'arborescences, $L/d \approx 90\%$.

Caractéristiques:

Effectif	L moyen	$\Delta I/I_0$ moyen	Tens.ar.él.moyen.	Ecart-type
11	$L_3 = 438 \pm 12 \mu\text{m}$	$28,2 \pm 1,1\%$	$V_3 = 10,5 \pm 0,6 \text{ kV}$	1kV

Distribution des tensions:

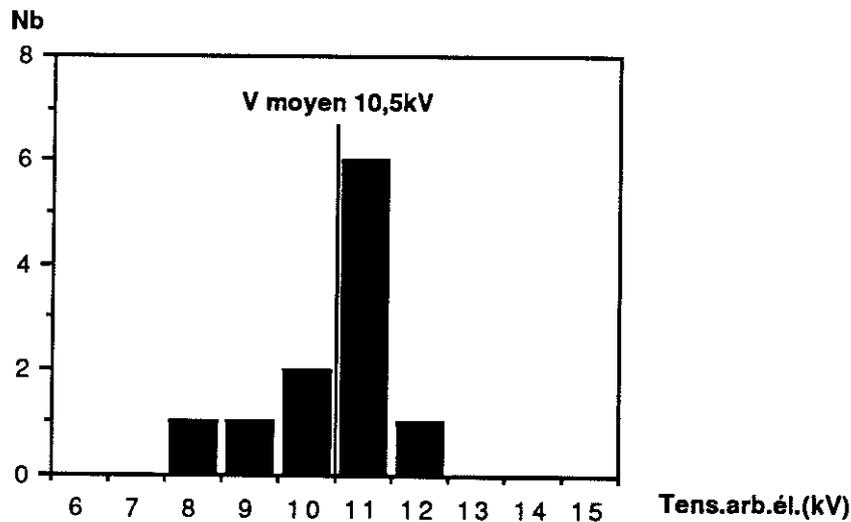


Figure 31: Histogramme des tensions d'apparition d'une arborescence électrique pour 11 éprouvettes contenant des arborescences d'un $L/d \approx 90\%$.

Les résultats sont peu dispersés et permettent, malgré un faible nombre d'échantillons de définir une intervalle de confiance étroit pour la valeur moyenne : [9,9kV;11,1kV]

Concentration en eau.

La longueur moyenne transverse L'_3 (cf figure 27) est plus faible que la longueur axiale L_3 . $L'_3 = 360\mu\text{m}$. Elle est égale à $5\mu\text{m}$ près à la longueur des arborescences de la classe n°2, L_2 . Le trajet optique pour la mesure de C_{o3} est donc le même que dans les arborescences de la classe n°2. L'absorption de 28% est aussi la même à 1% près, par suite $C_{o3} \approx C_{o2} = 0,68$.

Ces arborescences ayant la même concentration en eau que les deux premières classes de L/d . Leurs tensions d'apparition d'une arborescence électrique aussi bien expérimentales que théoriques peuvent donc être comparées à celles des 2 autres classes.

Valeurs expérimentales et théoriques de tensions pour les 3 classes de L/d .

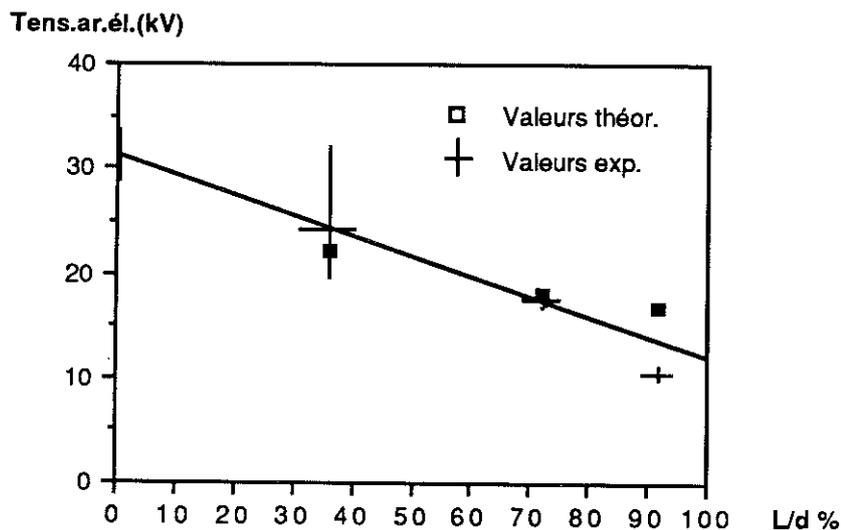


Figure 3 2: Tensions moyennes d'obtention d'une arborescence électrique avec leurs intervalles de confiance pour différentes longueurs d'arborescences d'eau et la référence et valeurs théoriques calculées.

Si pour les deux premières classes, il y a un accord relatif entre les valeurs théoriques et expérimentales, par contre le désaccord est complet entre les deux valeurs dans le cas de la troisième classe.

La valeur théorique de 16,7kV est supérieure de 59% à la valeur expérimentale de 10,5kV.

On peut remarquer aussi que la valeur attendue d'après la tendance des valeurs précédentes est également supérieure de 30% environ à la valeur expérimentale de la classe $L/d \approx 90\%$ et ceci laisse supposer que la situation physique n'est plus la même, dans le cas de la 3ème classe, que dans le cas des deux premières classes de L/d .

Discussion des résultats précédents:

Ce constat pose une question: Quelle est l'origine de l'anomalie rencontrée dans la variation du renforcement de champ avec L/d , lorsque l'arborescence remplit l'espace inter-électrode?

La remise en cause de la validité du modèle utilisé dans le calcul ne suffit pas, car la valeur expérimentale obtenue dans le cas de la troisième classe est également très supérieure à la valeur attendue d'après la tendance qui se dégage des valeurs de référence et de celles des deux premières classes.

La réponse que nous proposons s'efforce de prendre en compte les deux éléments de la question: l'invalidation du calcul et la modification de la situation expérimentale.

L'un des paramètres décisifs qui détermine les propriétés diélectriques de l'arborescence d'eau est la répartition de l'eau au sein de l'arborescence. Nous pensons que, dans la nouvelle configuration où $L/d \approx 90\%$, la répartition de l'eau n'est pas la même que dans celle des deux autres classes d'arborescence. La structure de l'arborescence d'eau est modifiée.

Si c'est bien le cas, il n'est pas étonnant que les résultats expérimentaux soient modifiés. Il n'est pas surprenant non plus que le calcul donne des résultats aberrants puisque l'une des hypothèses décisives du modèle était précisément que toutes les arborescences possédaient la même structure cf. § 3.1.1.

Cela dit, il ne suffit pas de relever des indices en faveur de cette modification, il faut encore comprendre, si possible, ce qui, dans la nouvelle situation physique a pu entraîner cette modification. Or, une donnée physique importante est également modifiée dans cette nouvelle situation: la topologie du champ électrique que voit l'arborescence d'eau pendant sa croissance. Il y a donc de bonnes raisons de penser qu'il y a une relation entre les deux phénomènes: la modification de la répartition spatiale de l'eau et celle du champ électrique. Ce point fait l'objet du paragraphe suivant.

3.5.Relation entre répartition de l'eau et topologie du champ électrique dans les trois classes d'arborescences d'eau, pendant leur croissance.

3.5.1.II existe une relation entre densité d'eau et amplitude du champ électrique pendant la croissance de l'arborescence .

Le processus de développement des arborescences d'eau est encore mal connu et aucune théorie explicative n'a fait l'unanimité jusque là. Tous les auteurs s'accordent cependant sur le rôle essentiel du champ électrique dans la croissance des arborescences d'eau. Pour certains, la concentration moyenne en eau croît linéairement, en première approximation, avec le champ appliqué [7]. D'autres relient explicitement la densité locale de micro-cavités à l'intensité du champ [4].

Ce dernier point est illustré en ajoutant sur une courbe expérimentale de densité de cavité les valeurs calculées du champ local correspondantes:

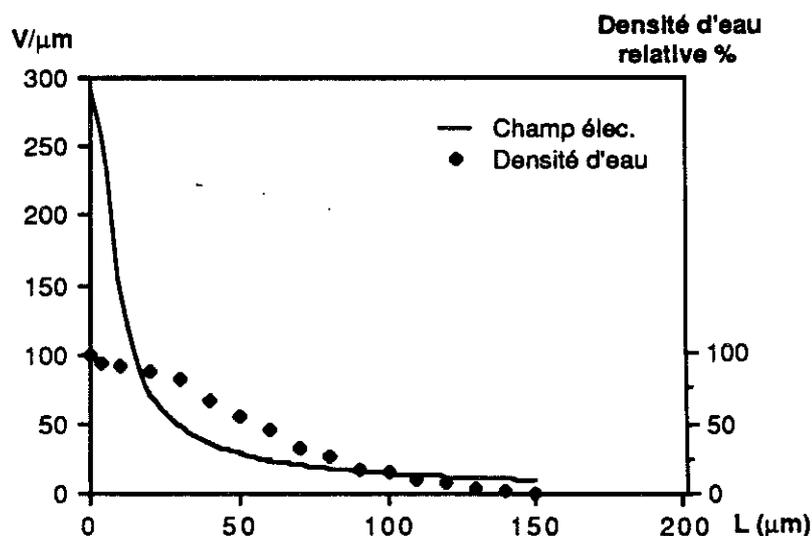


Figure 33: Densité d'eau relative en fonction de la distance à la pointe d'eau établie expérimentalement par CHEN [4] en géométrie pointe-plan et valeur calculée du champ électrique au moment de la formation de l'arborescence d'eau. (Le calcul du champ ne prend pas en compte la charge d'espace éventuelle..)

En dehors de la région immédiatement à proximité de la pointe où nous sommes en présence d'un phénomène de saturation, la densité relative de micro-cavités suit la décroissance du champ électrique local.

3.5.2. L'extrapolation de la répartition de l'eau en géométrie pointe-plan au cas de la géométrie pointe-pointe et ses conséquences.

Nous nous sommes inspirés de la courbe précédente de la figure 33 pour modéliser l'arborescence d'eau en géométrie pointe-pointe pour un espace inter-électrode de $500\mu\text{m}$. Or la courbe expérimentale de densité de micro-cavités, et la courbe des valeurs du champ électrique ont été établies en géométrie pointe-plan pour une distance inter-électrode de $2,5\text{mm}$ [4]. En supposant implicitement que la répartition spatiale de l'eau était identique dans les deux cas, nous avons extrapolés des résultats acquis en géométrie pointe-plan à la géométrie pointe-pointe pour évaluer l'incidence de l'arborescence d'eau sur les propriétés diélectriques des éprouvettes.

Or la topologie globale du champ électrique au sein de l'espace inter-électrode n'est pas la même dans les deux géométries. Dans l'une le champ décroît constamment, dans l'autre, le champ commence par décroître jusqu'au milieu de l'espace inter-électrode puis il croît à nouveau.

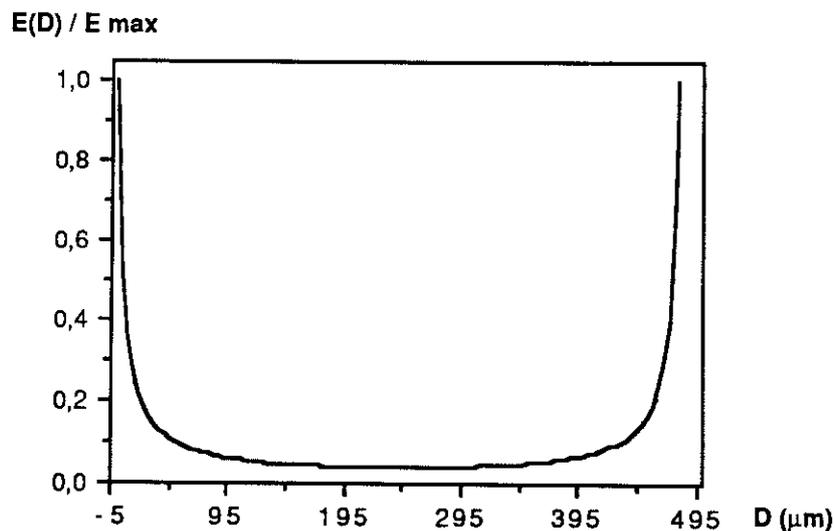


Figure 34: En géométrie pointe-pointe symétrique, le champ décroît jusqu'au milieu de l'espace inter-électrode puis recroît ensuite. $E(D)$ désigne le champ à une distance D de la pointe d'eau.

S'il y a bien une relation entre champ électrique et densité d'eau, nous pouvons nous interroger sur la légitimité de l'extrapolation précédente. En effet si

les répartitions spatiales du champ dans les deux géométries sont différentes, celles de l'eau doivent l'être aussi, alors que nous les avons supposées identiques.

Mais la situation doit être examinée de plus près: en effet, la configuration spatiale du champ au sein de l'arborescence d'eau, en géométrie pointe-pointe, n'est pas la même pour toutes les valeurs du rapport L/d .

3.5.3. Configuration spatiale du champ électrique local au sein de l'arborescence d'eau et son incidence sur la densité d'eau, pour les 3 classes de L/d .

La figure suivante indique la valeur du champ électrique que rencontre l'arborescence d'eau au cours de sa croissance à son extrémité, là où commencent à se former en principe les cavités d'eau. Deux valeurs du champ sont indiquées : l'une ignore la perturbation due à la présence de l'arborescence d'eau, l'autre est la valeur du champ corrigée, compte tenu du renforcement induit par l'arborescence. Les longueurs d'arborescences correspondantes aux trois valeurs du rapport L/d , sont indiquées.

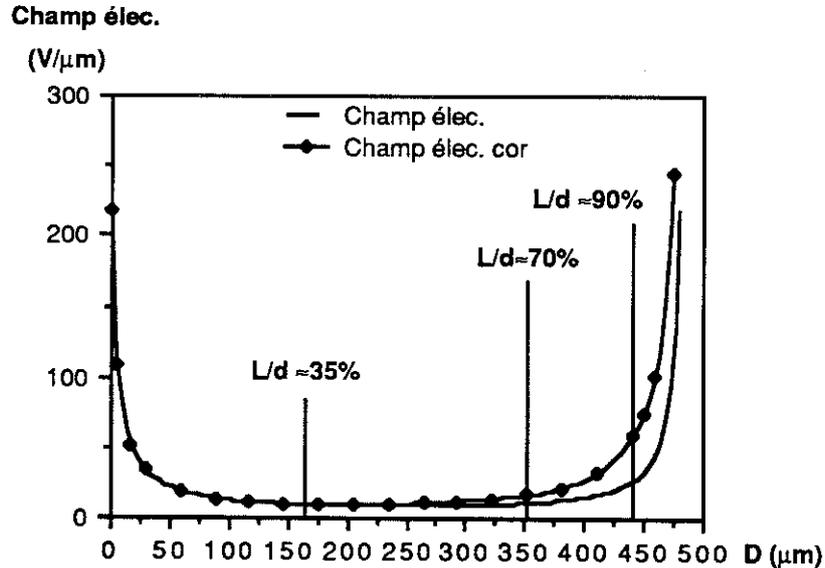


Figure 35: Valeurs du champ électrique sur l'axe que rencontre une arborescence d'eau, à sa frontière, à différents moments de sa croissance. Le trait lisse indique la valeur du champ en l'absence d'arborescence d'eau. Les losanges indiquent la valeur du champ corrigé en ces points compte tenu du renforcement induit par l'arborescence d'eau, pour la longueur atteinte par cette arborescence.

L'examen de ce graphique fait apparaître que la répartition spatiale du champ rencontrée par les deux premières classes d'arborescences, $L/d \approx 35$ ou 70% au terme de leur croissance est différente de celle rencontrée par la troisième classe, $L/d \approx 90\%$. Ainsi dans le cas de $L/d \approx 90\%$ le champ retrouve les valeurs qu'il avait au début de la croissance de l'arborescence, valeurs qui étaient associées à des valeurs élevées de la densité d'eau. Dans le cas des deux premières classes, le champ que rencontre l'arborescence à la fin de sa croissance reste en valeur absolue proche du minimum associé, dans la courbe expérimentale qui a servi de référence (cf fig.33), aux plus faibles valeurs de densité.

a-Le cas des deux premières classes $L/d \approx 35$ ou 70% .

Tant que $L/d < 50\%$ ($L < 250\mu\text{m}$), la configuration spatiale du champ que rencontrent les arborescences d'eau au cours de leur croissance est celle d'un champ décroissant continuellement. Cette configuration est qualitativement identique à celle rencontrée en géométrie pointe-plan dans la situation de la figure 33.

Dans le cas où $L/d \approx 70\%$ ($L = 355\mu\text{m}$), la situation est théoriquement différente puisque, dès que la longueur des arborescences dépasse $250\mu\text{m}$, le champ électrique au front de l'arborescence recommence à croître. Mais entre 250 et $350\mu\text{m}$, la valeur absolue du champ est faible et son accroissement en valeur absolue également. Cela reste vrai même en tenant compte du renforcement de champ dû à l'arborescence d'eau. Donc pratiquement la configuration spatiale du champ ne diffère pas sensiblement de celle de la première classe d'arborescence et de la géométrie pointe-plan.

Nous pouvons tirer deux conséquences de ce constat:

1-II n'est pas surprenant que les deux premières classes d'arborescences fournissent des résultats expérimentaux cohérents, puisque les deux situations physiques sont similaires.

2-Si l'amplitude du champ conditionne la densité d'eau, alors, l'extrapolation que nous avons faite de la répartition de l'eau pour ces deux classes d'arborescences à partir de résultats obtenus en géométrie pointe-plan, semble justifiée. Il y a en effet une grande similitude entre la répartition spatiale du champ pour ces valeurs de L/d et la répartition spatiale du champ dans la situation qui sert de base à l'extrapolation. De fait, la densité d'eau extrapolée suit (globalement dans le cas le cas $L/d \approx 70\%$) la décroissance du champ électrique effectif.

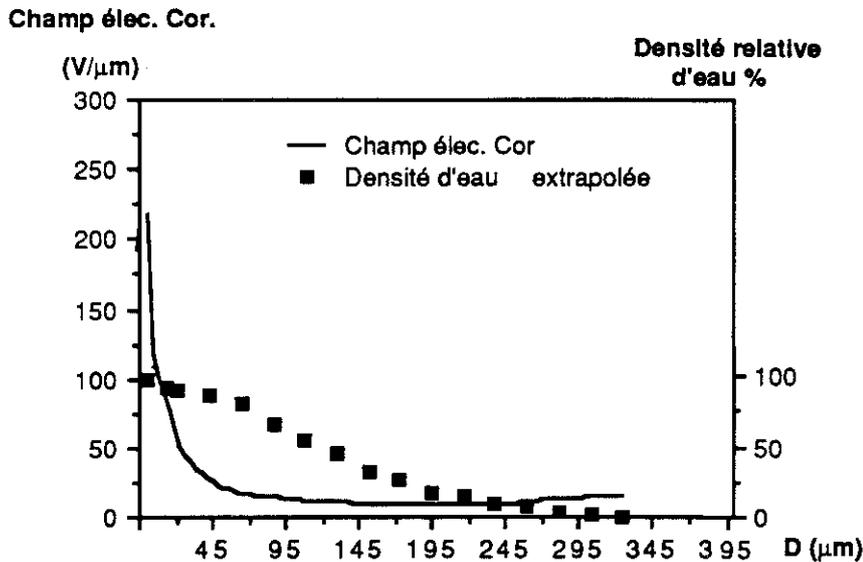


Figure 36: La densité d'eau obtenue en transposant la distribution expérimentale obtenue en géométrie pointe-plan (figure 33) pour une arborescence de $125\mu\text{m}$, au cas d'une arborescence de $325\mu\text{m}$ ($L/d=70\%$) en géométrie pointe-pointe, suit la décroissance du champ effectif. Les valeurs du champ sont corrigées pour prendre en compte le renforcement de champ induit par l'arborescence.

Par suite, il n'est pas surprenant non plus que la modélisation réalisée sur la base de l'extrapolation précédente, ait donné pour ces deux valeurs de L/D , des résultats en accord avec les valeurs expérimentales.

b-Le cas où L/d atteint 90%.

La situation est dans ce cas complètement différente des deux précédentes. En effet, dans le dernier tiers de l'arborescence d'eau, le champ électrique recommence à croître très fortement pour atteindre des valeurs égales ou supérieures à celle qu'il avait au début de l'arborescence, cf figure 35. On peut donner deux raisons de cette forte croissance: d'une part la géométrie avec l'effet de pointe et d'autre part le renforcement de champ dû à l'arborescence, qui accentue le premier effet et tend à faire apparaître une instabilité.

La répartition spatiale du champ électrique n'a plus rien de commun avec ce qu'elle est en géométrie pointe-plan. Aussi la transposition des résultats sur la répartition de l'eau, obtenus en géométrie pointe-plan, à la configuration actuelle

apparaît totalement injustifiée. La décroissance continue de la densité d'eau, ainsi extrapolée, apparaît en totale contradiction avec la croissance du champ électrique effectif dans la dernière partie de l'arborescence.

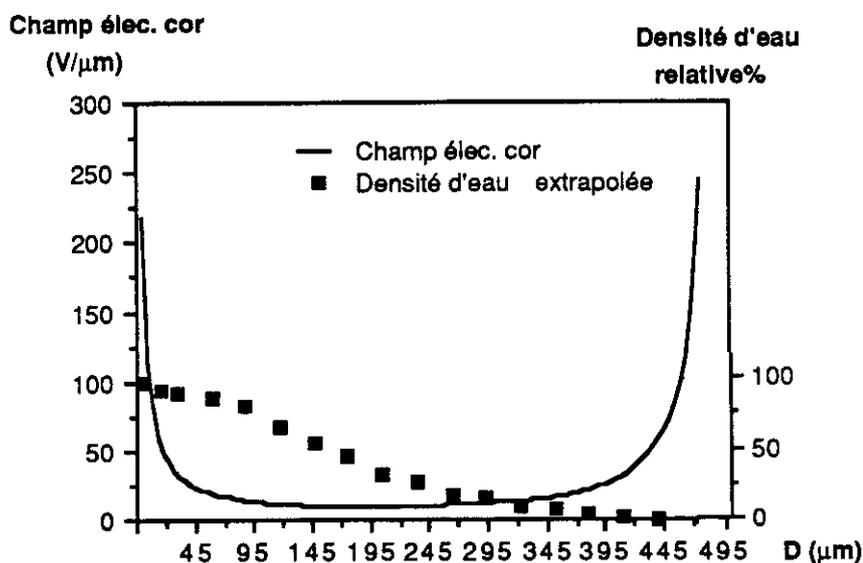


Figure 37: La reproduction dans cette situation de l'opération réalisée dans le cas de la figure 36, conduit maintenant à une contradiction entre la forme de la courbe de densité ainsi obtenue et celle du champ. La densité extrapolée à partir de la géométrie pointe-plan, décroît continuellement. Au contraire, le champ électrique effectif sur l'axe croît fortement en fin d'arborescence.

Il n'est pas étonnant que le renforcement de champ calculé à partir de cette densité extrapolée soit en désaccord avec la valeur expérimentale.

Si, laissant de côté la référence à la géométrie pointe-plan, nous imposons à la densité d'eau de suivre les variations du champ électrique effectif, nous obtenons une répartition de l'eau complètement différente.

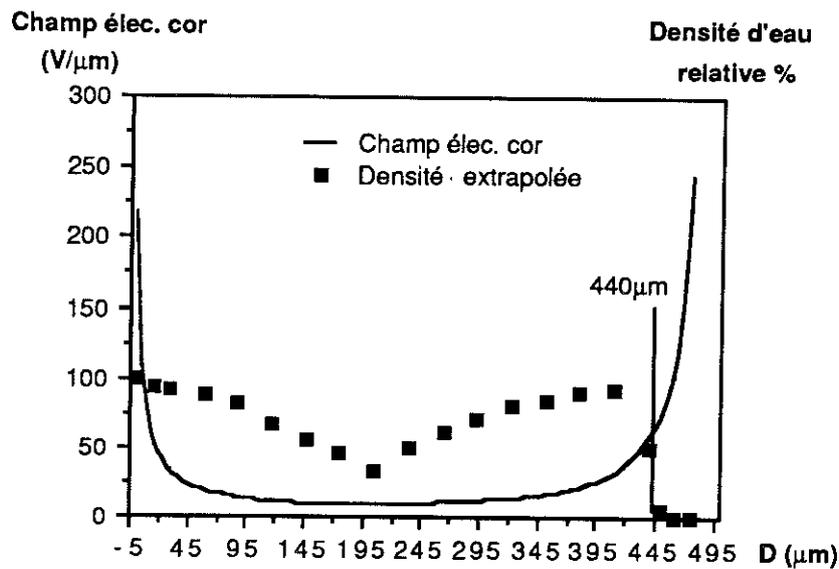


Figure 38: La densité d'eau relative sur l'axe est calculée dans la deuxième partie de la courbe, d'après les valeurs du champ dans cette région, en reproduisant les relations numériques entre densités et valeurs du champ existant dans la première partie. On a ainsi artificiellement introduit une symétrie dans la courbe des densités calquée sur la symétrie de celle du champ.

Cette symétrie calculée sera approximativement constatée aussi expérimentalement par des mesures de transmittance dans le paragraphe suivant. Pour le moment nous pouvons déjà vérifier la cohérence de ces nouvelles valeurs de densité, avec les valeurs expérimentales de renforcement de champ correspondantes.

Si nous calculons le renforcement du champ électrique sur la pointe métallique avec les nouvelles valeurs de densités au moyen du modèle de l'arborescence hétérogène, nous obtenons une tension de 11,1kV, qui se rapproche sensiblement de la valeur expérimentale de 10,5kV cf § 3.5.4.

En résumé, l'hypothèse d'une modification de la densité d'eau résultant elle-même d'une modification de la topologie du champ électrique dans l'arborescence d'eau, permet de rendre compréhensible les anomalies constatées jusque là dans la variation du renforcement de champ avec L/d . Pour le moment cependant il ne s'agit que d'une hypothèse, aussi nous proposons deux arguments expérimentaux, à l'appui de cette hypothèse.

3.5.4. Deux arguments expérimentaux.

Ces deux arguments visent à établir successivement chacun des termes de l'hypothèse précédente:

1-Il y a bien une modification de la structure de répartition de l'eau au sein de l'arborescence d'eau lorsqu'on passe de $L/d \approx 70\%$ à $L/d \approx 90\%$.

2-Cette modification est bien la conséquence de la modification du champ électrique.

a-Modification de la structure de répartition de l'eau lors du passage de $L/d \approx 70\%$ à $L/d \approx 90\%$, en géométrie pointe-pointe.

Par structure de répartition de l'eau nous entendons le rapport des concentrations en eau dans les diverses régions de l'arborescence.

Les mesures de transmittance ne nous permettent pas d'accéder aux valeurs absolues dans la mesure où il est difficile de déterminer la turbidité. Nous nous sommes donc limités à des mesures relatives de la concentration moyenne. Ces mesures sont faites en trois points de l'axe situés à des distances d de la pointe d'eau égales, respectivement à $0,33L$, $0,7L$, $0,85L$; L longueur de l'arborescence d'eau. $C_{0,33L}$ correspond de fait, en général, au maximum de la concentration moyenne. Cette valeur est prise comme référence et les deux autres valeurs $C_{0,7L}$ et $C_{0,85L}$ sont exprimées en fraction de cette concentration maximale.

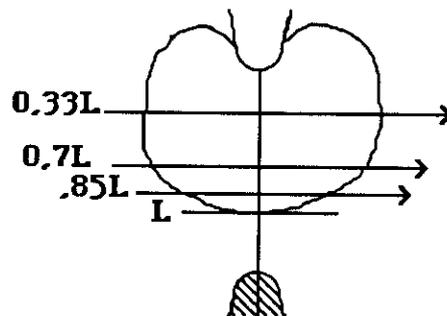


Figure 39: Les mesures de transmittance dont sont déduites les valeurs de concentration moyenne sont faites en trois régions de l'arborescence.

Nous présentons ici des résultats de mesures de concentration moyenne réalisées pour 4 arborescences de 270 à $300\mu\text{m}$ de longueur, $L/d \approx 70\%$ et pour 8 arborescences de 406 à $478\mu\text{m}$, $L/d \approx 90\%$. Ces valeurs relatives de concentration moyenne sont calculées comme au §2.3.7 en mesurant à la fois la transmittance et le

trajet optique sur l'image de l'arborescence d'eau, obtenue au microscope cf figure 39 . La signification du petit nombre de valeurs de la première population sera consolidée par des mesures ultérieures, présentées au paragraphe suivant.

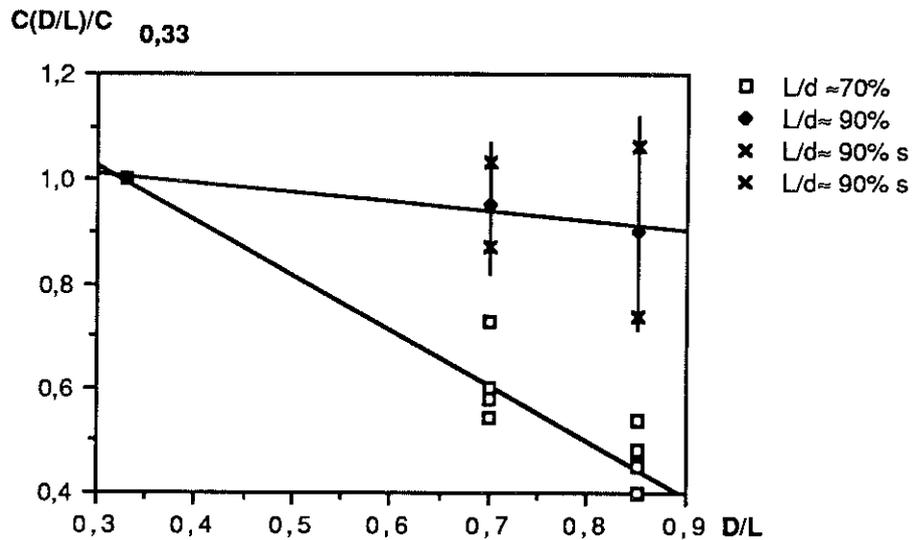


Figure 40: Variation de la concentration moyenne en eau avec la distance à la pointe d'eau pour deux classes d'arborescences, $L/d \approx 70\%$ et $L/d \approx 90\%$. Dans le 1er cas toutes les valeurs sont indiquées, dans le 2ème figurent les extrêmes, la moyenne et l'écart-type.

On peut constater, malgré la dispersion, que la concentration moyenne décroît beaucoup moins rapidement pour $L/d \approx 90\%$ que pour $L/d \approx 70\%$.

b-Le rétablissement d'une topologie du champ de type pointe-plan supprime les anomalies de la classe ($L/d \approx 90$) par rapport aux 2 autres.

De nouvelles arborescences d'une longueur égale en moyenne à 90% de la distance inter-électrode sont produites à nouveau, mais dans une autre géométrie.

La pointe métallique de $10\mu\text{m}$ de rayon de courbure est remplacée par une autre d'un rayon de courbure de $100\mu\text{m}$, pendant la croissance d'un groupe d'arborescences d'eau. Cette modification a plusieurs conséquences.

1)Le champ est modifié pendant la croissance des arborescences.

Le renforcement de champ important lorsque L/d s'approche de l'unité est dû essentiellement à l'effet de pointe.

Si le rayon de cette pointe est porté de 10 à 100 μm , la configuration du champ se rapprochera très sensiblement de celle qu'il a en géométrie pointe-plan, comme on peut le constater sur le graphe suivant.

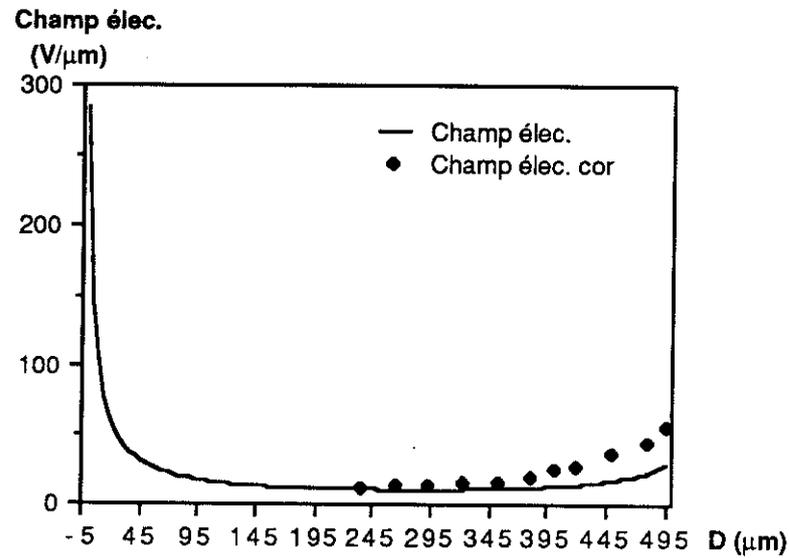


Figure 41: Valeurs du champ électrique sur l'axe, brutes et corrigées compte tenu du renforcement de champ, en fonction de la distance à la pointe d'eau, pour un rayon de courbure de la pointe métallique de 100 μm .

2) Pour un même rapport L/d ces arborescences diffèrent des arborescences produites en géométrie pointe-pointe symétrique.

Ces arborescences une fois produites sont soumises au même test de tenue diélectrique que les précédentes: la pointe de $100\mu\text{m}$ de rayon de courbure est remplacée par la pointe originelle avant le test.

Les caractéristiques diélectriques sont différentes.

Effectif	L moyen	$\Delta I/I_0$ moyen	Tens.ar.él.moyen	Ecart-type
13	$L_4 = 452 \pm 12\mu\text{m}$	$28,7 \pm 1,3\%$	$V_4 = 14,8 \pm 1,4 \text{ kV}$	2,5kV

Distribution des tensions d'apparition d'une arborescence électrique.

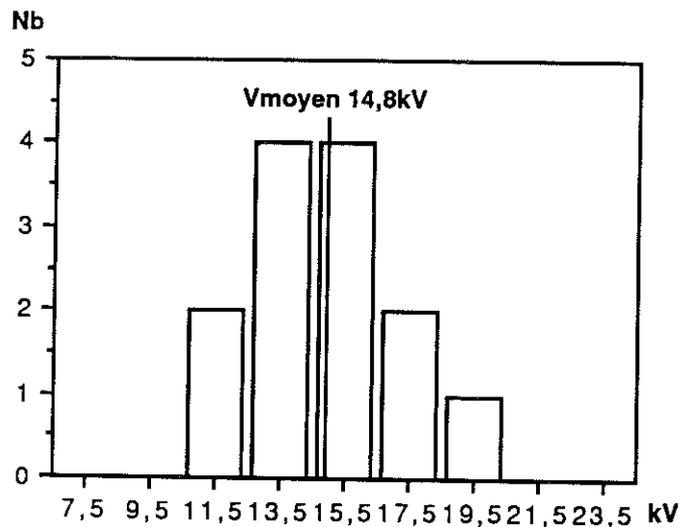


Figure 42: Tensions d'apparition d'une arborescence électrique obtenues pour 13 éprouvettes contenant des arborescences d'une longueur moyenne de $452\mu\text{m}$, obtenues en géométrie= pointe-plan.

Les nouveaux résultats expérimentaux et la valeur théorique sont ajoutés sur le graphique représentant les valeurs obtenues dans l'autre géométrie, pour différentes valeurs du rapport L/d .

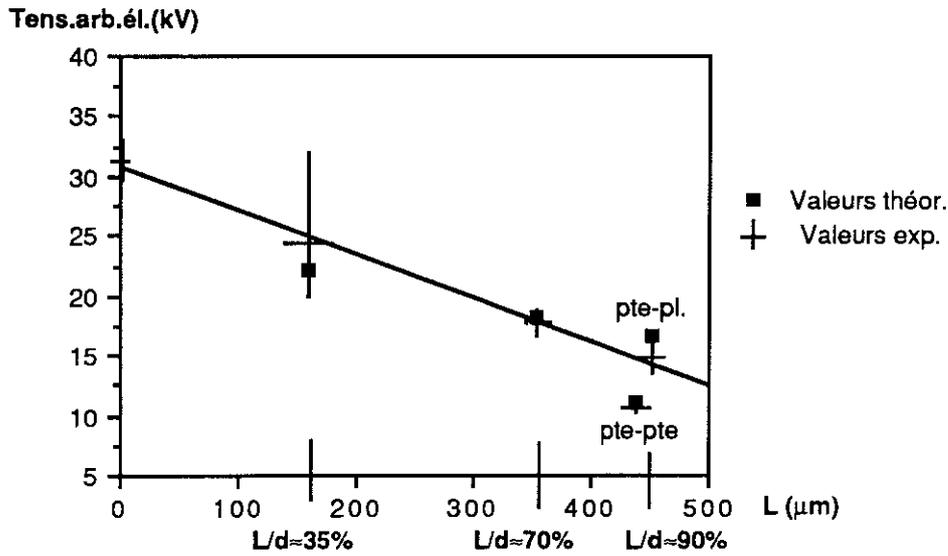


Figure 43: Valeurs expérimentales et théoriques de tension d'obtention d'une arborescence électrique pour les 4 classes de L/d .

On peut constater que les tensions obtenues en géométrie=pointe-plan pour $L/d \approx 90\%$ sont maintenant cohérentes avec les résultats obtenus pour des valeurs inférieures de L/d . L'anomalie dans la variation du renforcement de champ avec L/d , dans les arborescences produite en géométrie pointe-pointe symétrique, pour une valeurs $L/d \approx 90\%$, n'existe pas pour les arborescences d'un même L/d , produites en géométrie=pointe-plan.

3-La répartition de l'eau au sein de l'arborescence, pour la 4ème classe est très proche de celle obtenue pour $L/d \approx 70\%$.

Nous présentons les valeurs de concentrations relatives extraites de mesures effectuées sur 13 arborescences de la quatrième classe $L/d \approx 90$ en géométrie ≈pointe-plan. Ce résultat est ajouté sur un même graphe au résultats déjà obtenus pour les classes 2 et 3.

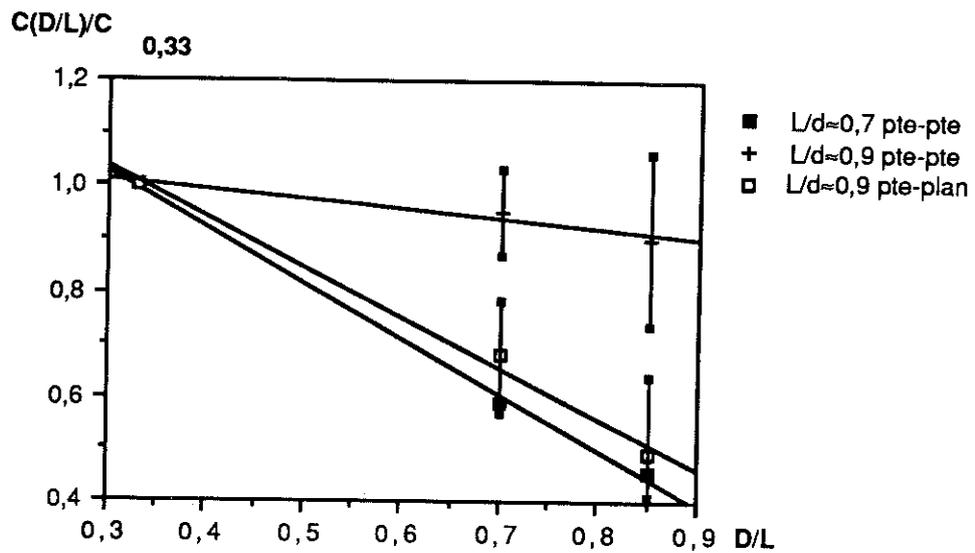


Figure 34: Variation de la concentration moyenne en eau en fonction de la distance à la pointe d'eau, pour 3 classes d'arborescences. On a indiqué la dispersion pour la classe 3 ($L/d \approx 90\%$ en géométrie pointe -pointe) et l'intervalle de confiance à 95% pour la classe 4 ($L/d \approx 90\%$ en géométrie pointe -plan).

Le rétablissement d'une même configuration du champ, pour toutes les arborescences, pendant leur croissance, quelque soit la fraction de l'espace inter-électrode qu'elles occupent, entraîne pour ces arborescences une répartition de l'eau identique.

CONCLUSION.

Nous avons vu que trois paramètres fondamentaux conditionnent l'effet de renforcement de champ induit par l'arborescence d'eau sur un défaut qui lui fait face: la densité d'eau, la dimension de l'arborescence relativement à l'espace inter-électrode et la répartition spatiale de l'eau.

Aucun de ces paramètres ne peut être négligé si l'on veut apprécier correctement la perturbation apportée par l'arborescence dans la répartition du des potentiels entre les électrodes.

Les mesures de la transmittance effectuées sur les arborescence, ont permis d'apprécier en valeurs relatives la densité d'eau et la répartition spatiale de cette eau et d'établir ainsi une corrélation entre ces deux paramètres et le renforcement de champ induit par l'arborescence.

Au vu de cette corrélation, l'approximation selon laquelle les arborescences d'eau ont toutes la même distribution spatiale de micro-cavités, pourvu que la distribution du champ électrique soit la même, permet de prédire avec une assez bonne précision le renforcement du champ électrique.

Enfin si la présence d'eau dans l'arborescence, renforce le champ électrique sur un défaut qui lui fait face, en retour, lorsque l'arborescence s'approche suffisamment de ce défaut, le champ induit par ce défaut à l'intérieur de l'arborescence d'eau pendant sa croissance, modifie la répartition et la densité d'eau au sein de l'arborescence, entraînant une instabilité.

REFERENCES DU CHAPITRE CINQ.

- [1] J.Y. KOO, J.D. CROSS, M. EL-KAHEL, C.T. MEYER, J.C. FILIPINI,
Annual Report of the 1983 CEIDP, (NAS, Whashington), p. 301.
- [2] J. B. BIRKS,
Progress in dielectrics. Volume 3. Heywood & Company LTD. London 1961.
- [3] J. B. HASTED, Aqueous dielectrics. Chapman and Hall. London, 1973.
- [4] J.L. CHEN, J.C. FILIPINI, Y. POGGI,
Conf. Record of the 1985 ICPADM, Xi'an, p. 366.
- [5] N. YOSHIMURA, M.S.A.A. HAMMAM, N. NISHIDA, F. NOTO,
Annual Report of the 1978 CEIDP, (NAS, Whashington), p. 342.
- [6] S. KAGEYAMA, M. ONO, S. CHABATA , IEEE Transaction on Power Apparatus and
Systems, Vol. PAS-94, N° 4, 1975, p.1258.
- [7] C. T. MEYER, IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-18, N° 1, February 1983, p. 28.
- [8] S.ISSHIKI, M. YAMAMOTO, S. CHABATA, Fujikura Technical Review, N° 5. 1973,
p. 36.
- [9] L.A. DISSADO, J.C. FOTHERGILL, S.V. WOLFE,
Annual Report of the 1981 CEIDP, (NAS, Whashington), p. 264.
- [10] S. BAMJI, A.BULINSKI, J. DENSLEY,
IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-19 N° 1, February 1983, p. 32.
- [11] P. DOTY and R.F. STEINER,
Journal of Chemical Physics, Vol. 18, N. 9, September 1950, p.1211.
- [12] J.BRANDRUP, E.H. IMMERGUT,
Polymer Handbook, John Wiley & Sons, Second Edition, 1974.

- [13] A. WEISSBERGER, Physical Methods of Organics Chemistry.
Volume I. Third Edition. John Wiley & Sons. New York. 1947.
- [14] E.ATHERTON and H. PETERS, Brit. J. Appl. Phys. ,4, 344, (1953).
- [15] W. HELLER and W. PANGONIS, Journal Chem. Phys., 22,948 (1954).
- [16] E.DURAND, Electrostatique. Tome II. Problèmes généraux , Conducteurs.
Masson 1966.
- [17] J.D. CROSS, J.Y. KOO,
IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-19 N° 4, August 1984, p.303.
- [18] R. PATCH, A. PAXIMADAKIS, P. ROMERO, Conference Record of the 1990 IEEE
International Symposium on Electrical Insulation, Toronto, 160.
- [19] J.L. CHEN, rapport de recherche non publié.
- [20] S. BERTHIER, Ann. Phys. Fr. 13, Décembre 1988, 503-595.
- [21] K.W. WAGNER, Arch. Elektrotech., 3, 100. 1914.
- [22] J.L. CHEN, J.C. FILIPINI, Y. POGGI,
Conf. Record of the 1988 ICPADM, Beijing, p. 507
- [23] D.A.G. BRUGGEMAN, Ann. Phys.(Leipz) 24, 1935, 636.
- [24] L.D. LANDAU and E.M. LIFSHITZ,
Electrodynamique des milieux continus. Editions Mir . Moscou. 1960.
- [25] J.W. RAYLEIGH, Philisophical Magazine, 1892,34,p. 481.
- [26] B.H. CRICHTON, M.J. GIVEN, O. FARISH, H.M. BANDFORD,
Intern. Conf. on Polymer Insulated Power Cables Jicable, Mars 1984, 93.
- [27] R. BOUZERARA, Thèse de l'université Joseph Fourier. Grenoble 1990.

CONCLUSION GENERALE-PERSPECTIVES

La présence d'arborescences d'eau dans les câbles haute tension isolés au polyéthylène et utilisés pour le transport de l'énergie électrique, pose de nombreuses questions, Cette étude nous a permis de répondre à certaines d'entre elles.

Dans une première partie nous avons examiné la question cruciale pour tous les utilisateurs de ces câbles de l'incidence des arborescences d'eau pour la fiabilité des câbles. Notre étude nous a permis de conclure que la réponse à cette question dépend fortement de la géométrie. La solution du problème doit donc prendre en compte non seulement l'arborescence d'eau elle-même mais aussi les défauts éventuels de l'isolation dans l'environnement de l'arborescence.

Il est admis que celle-ci prend toujours naissance à proximité d'un défaut renforçant le champ localement.

Une première situation, la plus simple, est donc celle d'un défaut unique, correspondant à un seul maximum local du champ. L'arborescence d'eau se développe alors autour de ce défaut, entraînant un "écrêtage" du champ maximum à l'extrémité du défaut. La présence d'une arborescence d'eau réduit ainsi le risque représenté par le défaut isolé et peut se traduire par une élévation de la tenue diélectrique de l'échantillon ou de la portion de câble considérée. Un constat analogue a été publié récemment relatant une expérimentation sur des fragments de câble dans lequel des défauts avaient été artificiellement créés.

Une deuxième situation est celle de la présence de plusieurs défauts dans l'environnement immédiat de l'arborescence. Nous avons examiné le cas de deux défauts, l'un à l'intérieur de l'arborescence d'eau comme précédemment, et l'autre opposé au premier à l'extérieur de l'arborescence. Nous sommes en présence cette fois de deux maxima locaux du champ et la situation est totalement différente. La présence de l'arborescence d'eau se traduit en effet toujours par une diminution du champ maximum interne, mais par un effet de compensation la valeur du second maximum est accrue. Il en résulte que la présence de l'arborescence d'eau se traduit cette fois-ci par une diminution de la tenue diélectrique. Cette conclusion est en accord avec des observations rapportées récemment d'incidents survenus dans les câbles indiquant qu'en présence d'une arborescence d'eau la

rupture diélectrique s'amorce toujours à l'opposé de l'arborescence d'eau et non pas à sa racine. Des photographies d'arborescences électriques survenues dans ces conditions et jointes aux remarques précédentes, manifestent par ailleurs la présence de défauts à l'extérieur de l'arborescence d'eau qui sont à l'origine de l'arborescence électrique.

Cette possibilité d'un déplacement de la valeur maximale du champ électrique par une arborescence d'eau dans l'espace situé entre deux électrodes entre lesquelles est maintenue une différence de potentiel constante avait été envisagée depuis plusieurs années au laboratoire à la suite de travaux expérimentaux mettant en évidence les propriétés diélectriques de l'arborescence d'eau. Des mesures de capacité faisaient apparaître en effet que l'arborescence se comportait comme un diélectrique d'une permittivité relative égale en moyenne au double de celle du polyéthylène. D'autres travaux avaient établi que la densité moyenne d'eau dans l'arborescence était de l'ordre de 10 %. Enfin des travaux avaient établi l'existence d'une structure dans la répartition de l'eau au sein de l'arborescence. L'arborescence n'est pas un milieu homogène mais la densité d'eau décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la pointe. Nous avons complété ces résultats obtenus au laboratoire par des mesures de la lumière transmise par l'arborescence d'eau et nous avons établi l'existence d'une relation entre l'intensité lumineuse diffusée par l'arborescence d'eau et le renforcement du champ électrique induit par l'arborescence d'eau sur un défaut extérieur à elle.

Nous avons ensuite montré qu'une modélisation de l'arborescence d'eau prenant en compte sa structure interne permettait de concilier les résultats précédents des mesures de permittivité et de densité moyenne en eau alors qu'un modèle ignorant cette structure faisait apparaître ces résultats comme contradictoires, l'accroissement de permittivité paraissant excessif au vu de la teneur en eau. La structure de l'arborescence se traduit en effet par une forte concentration en eau, là où le champ est fort, une faible concentration là où il est faible. Il en résulte une plus grande efficacité de l'eau dans le déplacement du champ équivalent à un plus fort accroissement de la permittivité moyenne pour une même quantité moyenne d'eau que dans le cas d'un milieu homogène.

Un modèle de l'arborescence prenant en compte son hétérogénéité et permettant un calcul du champ à l'intérieur et à l'extérieur de l'arborescence avait été élaboré au laboratoire pour la géométrie pointe-plan. Ce modèle toutefois, à notre connaissance, n'a donné lieu à aucune validation expérimentale, systématique.

Pour notre part nous avons pu à partir de la modélisation que nous avons proposée, calculer l'atténuation du champ attendu dans l'arborescence, en géométrie pointe-plan, pour des concentrations en eau, fixées a priori. Nous avons calculé également le renforcement de champ, à l'extérieur de l'arborescence, en géométrie pointe-pointe, pour des concentrations en eau estimées à partir de mesures de transmittance d'arborescence. Les valeurs théoriques déduites de ce modèle se sont trouvées en bon accord avec les valeurs expérimentales obtenues à partir de nos expériences.

Enfin l'examen de l'incidence de la fraction de l'espace inter-électrode occupé par l'arborescence sur le renforcement du champ, nous a permis d'apporter une preuve supplémentaire de l'incidence déjà mentionnée du champ électrique sur la densité d'eau au sein de l'arborescence. Des mesures de transmittance nous ont permis de mettre en évidence une relation entre la répartition spatiale calculée du champ et celle estimée expérimentalement de l'eau.

Ce dernier point permet d'envisager des prolongements possibles de ce travail. Une amélioration du dispositif de mesure de la transmittance permettrait très certainement d'obtenir plus d'informations sur la répartition de l'eau et de mieux cerner la relation existant entre la densité d'eau et le champ. On peut ainsi espérer progresser dans la connaissance du processus qui donne naissance à l'arborescence d'eau et tester la validité des hypothèses émises à son sujet dont aucune jusqu'à ce jour ne fait vraiment l'unanimité faute de validation expérimentale suffisante.

Un autre prolongement consisterait à faire des mesures absolues de concentration en eau dans l'arborescence alors que nous nous sommes limités à des valeurs relatives. Ces mesures permettraient de déterminer expérimentalement la valeur de concentration maximale, actuellement fixée arbitrairement, qui a servi de base au calcul du champ.

Enfin la modélisation pourrait être améliorée en prenant en compte une répartition effective de l'eau déterminée par des mesures de transmittance et également par une prise en compte de l'action réciproque du champ sur la densité d'eau et de celle-ci sur le champ, alors qu'actuellement cette répartition est fixée a priori à partir d'une expérience unique.

ANNEXE.

CALCUL DE L'ATTENUATION DU CHAMP SUR LA POINTE
EN GEOMETRIE-POINTE-PLAN

Nous reprenons la situation de la figure 23 du chapitre V, §3.3.2. mais seulement la pointe métallique est remplacée par un plan conducteur.

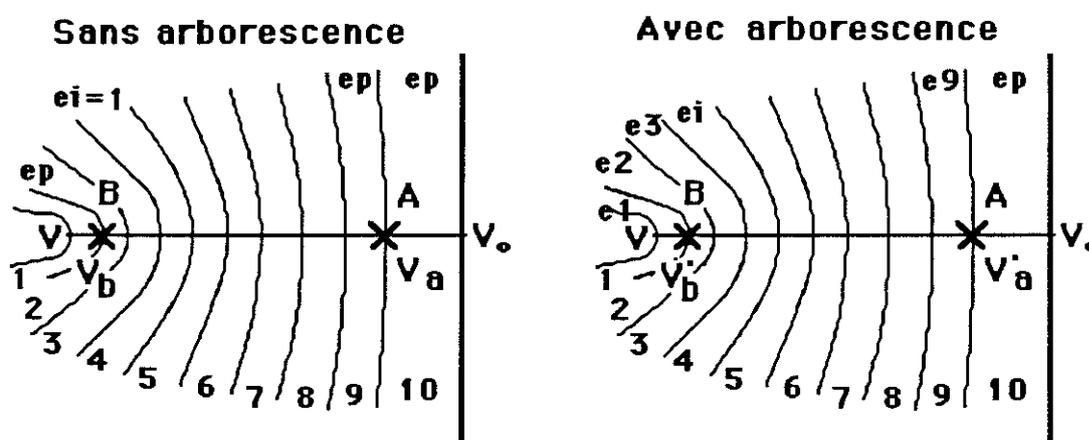


Figure 1: Réseau d'équipotentiels séparant les différentes régions occupées par l'arborescence. Dans ces régions la permittivité est ep en l'absence d'arborescence et ei ep dans la région i en présence d'une arborescence.

Comme au ch.V §3.3.2, chaque région peut être représentée par un condensateur.



Figure 1: Le réseau d'équipotentiels peut être modélisé par une série de dix condensateurs.

Notre problème est de connaître la modification du champ sur la pointe d'eau, lorsqu'on passe de la situation sans arborescence, à la situation avec

arborescence. Le champ sur la pointe est proportionnel à la différence de potentiel $V_b - V$ dans la région 1, le coefficient de modification du champ est donc égal à:

$$C_m = V_b - V / V_b - V$$

Si comme au chV3.3.2, les u_j sont les ddp aux bornes des condensateurs C_j et les u'_j les ddp aux bornes des condensateurs C'_j , rapportées au potentiel V .

$$C_m = u'_1 / u_1 \quad (1)$$

Les deux réseaux de condensateurs fournissent les relations

$$C_1 u_1 = \dots = C_i u_i = \dots = C_{10} u_{10}$$

$$C'_1 u'_1 = \dots = C'_i u'_i = \dots = C'_{10} u'_{10}$$

soit

$$C'_1 u'_1 / C_1 u_1 = u'_{10} / u_{10}$$

d'où avec (1):

$$C_m = (u'_{10} / u_{10}) (C_1 / C'_1)$$

mais:

$$(C_1 / C'_1) = \epsilon_1$$

et

$$(u'_{10} / u_{10}) = C^* r = (\sum u_j / \epsilon_j + u_{10})^{-1} \quad \text{cf (40) de chV §3.3.2}$$

d'où:

$$C_m = [\epsilon_1 (+ u_{10})]^{-1}.$$

Le champ diminue sur la pointe d'eau quand la permittivité de la région 1 croît mais augmente quand le terme $\sum u_j / \epsilon_j$ décroît et ce qui est le cas en particulier quand l'arborescence croît et progresse vers le plan.

