

**RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT**

**CEI
IEC**

60664-4

Première édition
First edition
1997-09

PUBLICATION FONDAMENTALE DE SÉCURITÉ
BASIC SAFETY PUBLICATION

**Coordination de l'isolement des matériels
dans les systèmes (réseaux) à basse tension –**

**Partie 4:
Considérations sur les contraintes de tension
à hautes fréquences –**

**Insulation coordination for equipment
within low-voltage systems –**

**Part 4:
Considerations of high-frequency voltage stress –**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60664-4: 1997

Numéros des publications

Les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000 dès le 1er janvier 1997.

Publications consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant des amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à ces révisions, à l'établissement des éditions révisées et aux amendements peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et dans les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
Accès en ligne*
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement (Accès en ligne)*

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI).

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*, la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*, et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*.

Publications de la CEI établies par le même comité d'études

L'attention du lecteur est attirée sur les listes figurant à la fin de cette publication, qui énumèrent les publications de la CEI préparées par le comité d'études qui a établi la présente publication.

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

Numbering

As from 1st January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Validity of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

Information on the revision work, the issue of revised editions and amendments may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**
On-line access*
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates (On-line access)*

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV).

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*.

IEC publications prepared by the same technical committee

The attention of readers is drawn to the end pages of this publication which list the IEC publications issued by the technical committee which has prepared the present publication.

* See web site address on title page.

RAPPORT TECHNIQUE – TYPE 3

**CEI
IEC**

TECHNICAL REPORT – TYPE 3

60664-4

Première édition
First edition
1997-09

PUBLICATION FONDAMENTALE DE SÉCURITÉ
BASIC SAFETY PUBLICATION

Coordination de l'isolement des matériels dans les systèmes (réseaux) à basse tension –

Partie 4: Considérations sur les contraintes de tension à hautes fréquences –

Insulation coordination for equipment within low-voltage systems –

Part 4: Considerations of high-frequency voltage stress –

© IEC 1997 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembe Geneva, Switzerland
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

U

Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION	8
Articles	
1 Domaine d'application.....	10
2 Documents de référence.....	10
3 Distances d'isolement.....	10
4 Lignes de fuite.....	14
5 Isolation solide	14
6 Essais à haute fréquence	18
Figures.....	22
Annexe.....	58

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
INTRODUCTION	9
Clause	
1 Scope.....	11
2 Reference documents.....	11
3 Clearances.....	11
4 Creepage distances.....	15
5 Solid insulation	15
6 High-frequency testing.....	19
Figures.....	23
Annex	59

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

COORDINATION DE L'ISOLEMENT DES MATÉRIELS DANS LES SYSTÈMES (RÉSEAUX) À BASSE TENSION –

Partie 4: Considérations sur les contraintes de tension à hautes fréquences –

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes Internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques, représentent, dans la mesure du possible un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes Internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La tâche principale des comités d'études de la CEI est l'élaborer des Normes internationales. Exceptionnellement, un comité d'études peut proposer la publication d'un rapport technique de l'un des types suivants:

- type 1, lorsque, en dépit de maints efforts, l'accord requis ne peut être réalisé en faveur de la publication d'une Norme internationale;
- type 2, lorsque le sujet en question est encore en cours de développement technique ou lorsque, pour une raison quelconque, la possibilité d'un accord pour la publication d'une Norme internationale peut être envisagée pour l'avenir mais pas dans l'immédiat;
- type 3, lorsqu'un comité d'études a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales, cela pouvant comprendre, par exemple, des informations sur l'état de la technique.

Les rapports techniques des types 1 et 2 font l'objet d'un nouvel examen trois ans au plus tard après leur publication afin de décider éventuellement de leur transformation en Normes internationales. Les rapports techniques du type 3 ne doivent pas nécessairement être révisés avant que les données qu'ils contiennent ne soient plus jugées valables ou utiles.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**INSULATION COORDINATION OF EQUIPMENT WITHIN
LOW-VOLTAGE SYSTEMS –****Part 4: Consideration of high-frequency voltage stress –**

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. In exceptional circumstances, a technical committee may propose the publication of a technical report of one of the following types:

- type 1, when the required support cannot be obtained for the publication of an International Standard, despite repeated efforts;
- type 2, when the subject is still under technical development or where for any other reason there is the future but no immediate possibility of an agreement on an International Standard;
- type 3, when a technical committee has collected data of a different kind from that which is normally published as an International Standard, for example "state of the art".

Technical reports of types 1 and 2 are subject to review within three years of publication to decide whether they can be transformed into International Standards. Technical reports of type 3 do not necessarily have to be reviewed until the data they provide are considered to be no longer valid or useful.

La CEI 60664-4, rapport technique de type 3, a été établie par le comité d'études 28 de la CEI: Coordination de l'isolement des matériels dans les systèmes (réseaux) à basse tension.

Elle a le statut d'une publication fondamentale de sécurité conformément au Guide CEI 104.

Le texte de ce rapport technique est issu des documents suivants:

Projet de comité	Rapport de vote
28A(SEC)93	28A/114/RVC

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de ce rapport technique.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 60664-4:1997

IEC 60664-4, which is a technical report of type 3, has been prepared by IEC technical committee 28: Insulation coordination for equipment within low-voltage systems.

It has the status of a basic safety publication in accordance with IEC Guide 104.

The text of this technical report is based on the following documents:

Committee draft	Report on voting
28A(SEC)93	28A/114/RVC

Full information on the voting for the approval of this technical report can be found in the report on voting indicated in the above table.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 60664-4:1997

INTRODUCTION

Des contraintes électriques élevées apparaissent dans les matériels à haute tension. La fréquence est généralement de 50/60 Hz, mais dans certaines applications des fréquences légèrement plus élevées (400 Hz) ou plus basses ($16 \frac{2}{3}$ Hz,) ou continues peuvent apparaître. Une situation particulière peut apparaître dans les transmetteurs de radio-fréquences de haute puissance. Le développement de tels matériels a été à l'origine de la motivation de recherches sur la capacité de tenue de l'isolation pour les radiofréquences. Depuis ce temps, l'aspect des contraintes de tension à hautes fréquences n'a pas été étudié.

Actuellement, les tensions de fonctionnement à hautes fréquences dépassant 100 kHz sont souvent utilisées dans des matériels à basse tension. On peut s'attendre à ce que le domaine du MHz soit atteint dans le futur. Des petites dimensions sont nécessaires pour la miniaturisation et pour une fiabilité élevée, par exemple pour les transformateurs HF dans lesquels une contrainte très élevée existe plus particulièrement pour l'isolation solide.

Comme les distances sont appelées à diminuer et les fréquences à augmenter dans la même période, la situation s'aggravera dans le futur. C'est pourquoi, en tenant compte de la sécurité du personnel et de la fiabilité du matériel, les contraintes dues aux hautes fréquences jusqu'à 1 MHz doivent être considérées dans la coordination de l'isolement des matériels à basse tension (voir la note 2 du domaine d'application de la CEI 60664-1).

Ce rapport résume les données disponibles les plus importantes concernant les contraintes à hautes fréquences sur l'isolement et précise comment les matériaux et leurs dimensions peuvent être influencés. Ce rapport décrit aussi la manière dont les essais peuvent être réalisés en tenant compte de ces contraintes.

INTRODUCTION

High electrical stress occurs in high-voltage equipment. The frequency is usually 50/60 Hz, but in some applications a higher frequency (400 Hz) or a lower frequency (16 2/3 Hz) or d.c. may occur. A particular situation may exist in high-power RF transmitters. The development of such equipment had motivated earlier research on the withstand capability of insulation at radio frequencies. Since that time, the aspect of high-frequency voltage stress has not been pursued.

At present, high-frequency working voltages with frequencies exceeding 100 kHz are often used in low-voltage equipment. It can also be expected that frequencies in the MHz range will be reached in the future. Small dimensions are necessary for miniaturization and for high efficiency, for instance in HF transformers so that a very high stress exists, especially on solid insulation.

As dimensions are likely to decrease further and frequencies increase, this situation will be aggravated in the future. Therefore, with respect to safety of personnel and reliability of equipment, the stress due to high frequencies up to 1 MHz will have to be considered for insulation coordination of low-voltage equipment (see note 2 to the scope of IEC 60664-1).

This report summarizes the most important available data concerning high-frequency stress of insulation, and identifies how materials and their dimensions may be influenced. This report also describes how tests may be performed with respect to this stress.

COORDINATION DE L'ISOLEMENT DES MATÉRIELS DANS LES SYSTÈMES (RÉSEAUX) À BASSE TENSION –

Partie 4: Considérations sur les contraintes de tension à hautes fréquences –

1 Domaine d'application

Ce rapport traite de l'isolation soumise à des contraintes de tension à hautes fréquences dans les matériels à basse tension. Des tensions permanentes jusqu'à des fréquences de 100 MHz sont considérées.

NOTE – Les contraintes à hautes fréquences dues à des surtensions transitoires ne sont pas considérées.

2 Documents de référence

CEI 60112:1979, *Méthode pour déterminer les indices de résistance et de tenue au cheminement des matériaux isolants solides dans des conditions humides*

CEI 60664-1:1992, *Coordination de l'isolement des matériels dans les systèmes (réseaux) à basse tension – Partie 1: Principes, prescriptions et essais*

Guide 104 de la CEI: 1997, *Elaboration des publications de sécurité et utilisation des publications de sécurité et utilisation des publications fondamentales de sécurité et publications groupées de sécurité*

3 Distances d'isolement

Le claquage des distances d'isolement apparaît habituellement en moins d'une fraction de microseconde. En tenant compte de cette échelle de temps, une tension alternative à sa fréquence de fonctionnement possède une amplitude essentiellement constante. Par exemple à 50 Hz, l'amplitude reste en deçà de 99 % de sa valeur de crête pendant 1 ms. C'est pourquoi, pendant l'évolution menant au claquage, c'est la valeur de crête de la tension qui est appliquée. Ceci résulte normalement de valeurs identiques de tension alternative (crête) et continue (claquage).

A des fréquences plus élevées, une réduction de la valeur de sa tension de crête et aussi un renversement de sa polarité doivent être pris en compte pendant le claquage. Cet effet augmentera la tension de claquage.

Jusqu'alors, l'effet des ions (généralement positifs) générés au début du claquage n'a pas été considéré. Ces ions sont générés à la crête de la sinusoïde et, normalement, ils ont généralement assez de temps pour transiter vers les électrodes pendant la partie restante de la demi-sinusoïde. Cependant, il se peut que la polarité s'inverse pour des distances d'isolement élevées ou à hautes fréquences, avant que les ions aient pu être éliminés de la distance d'isolement. Ceci se traduira par une distorsion du champ électrostatique et réduira la tension de claquage. La vitesse moyenne de tels ions est environ de 6×10^2 m/s [1]*. A 50 Hz, l'intervalle de temps compris entre la crête et le passage à zéro de la sinusoïde étant de 5 ms, les ions parcourent environ 300 cm pendant ce temps. C'est pourquoi, aux fréquences de travail, ce problème n'apparaît que pour des distances d'isolement élevées. Cependant, si la fréquence est augmentée dans la zone du kHz, ce phénomène se produit aussi pour des distances d'isolement faibles.

* Les chiffres entre crochets se rapportent à l'annexe A (Bibliographie).

INSULATION COORDINATION OF EQUIPMENT WITHIN LOW-VOLTAGE SYSTEMS –

Part 4: Consideration of high-frequency voltage stress –

1 Scope

This report deals with insulation subjected to high-frequency voltage stress within low-voltage equipment. Steady-state voltages with frequencies up to 100 MHz are considered.

NOTE – High-frequency stress due to transient voltages is not considered.

2 Reference documents

IEC 60112:1979, *Method for determining the comparative and the proof tracking indices of solid insulating materials under moist conditions*

IEC 60664-1:1992, *Insulation coordination for equipment within low-voltage systems – Part 1: Principles, requirements and tests*

IEC guide 104: 1997, *The preparation of safety publications and the use of basic safety publications and group safety publications*

3 Clearances

Breakdown of clearances usually occurs in less than one submicrosecond. With respect to that time scale, an a.c. voltage of power frequency has an essentially constant amplitude. For instance at 50 Hz, the amplitude remains within 99 % of its peak value for 1 ms. Therefore, during the development leading to breakdown, the peak value of the voltage is effective. This normally results in identical a.c. (peak) and d.c. breakdown voltages.

At much higher frequencies, a reduction of the voltage from its peak value and even polarity reversal have to be taken into account during the development of breakdown. This effect will result in an increase of the breakdown voltage.

Up to now, the effect of the ions (which are usually positive) which are generated during inception of breakdown has not been considered. These ions are generated at the crest of the sine-wave and there is usually enough time for them to travel to the electrodes during the remaining part of that halfwave. However, in large clearances or at high frequency, the polarity may be reversed before the ions have been extracted from the clearance. This will result in a distortion of the electrostatic field and will reduce the breakdown voltage. The average velocity of the ions is approximately 6×10^2 m/s [1]*. At 50 Hz, the time interval between the crest and the zero crossing of the sine-wave is 5 ms, resulting in the ions moving approximately 300 cm. Therefore, at power frequency, this aspect will only be relevant for very large clearances. However, if the frequency is increased to the kHz range, this phenomenon will also be relevant for small clearances.

* The figures in square brackets refer to annex A (Bibliography)

La superposition de ces deux effets a pour résultat des courbes typiques présentant une tension minimale de claquage pour une certaine fréquence. Pour des distances d'isolement dans des champs de distribution homogènes ou approximativement homogènes montrés dans les figures 1 et 2 [2]. A 25 MHz, une tension de claquage proche de celle à 50 Hz est obtenue. La figure 2 montre très clairement que la distance d'isolement est un paramètre très important tenant compte de ce comportement.

En raison des fréquences actuellement utilisées, la gamme de la diminution initiale de la tension de claquage avec l'augmentation de la fréquence est du plus grand intérêt. Cette gamme de fréquences jusqu'à plusieurs MHz est décrite en détail ci-après.

Comme le montre la figure 3 [3], pour des distances d'isolement faibles dans l'azote sous pression atmosphérique, lequel a une tension de claquage comparable à celle de l'air, la réduction de la tension de claquage peut être de 10 % seulement. Cependant, pour des fréquences dépassant 1 MHz, cette réduction devient effective pour des distances d'isolement inférieures à 0,5 mm. Pour des distances d'isolement plus élevées, une plus grande réduction de la tension de claquage est observée, ce qui est montré en figure 4 [4].

En conclusion, en conditions homogènes ou approximativement homogènes, la réduction maximale de la tension de claquage est environ de 20 %. La fréquence critique à laquelle la réduction de la tension de claquage apparaît est approximativement:

$$f_{\text{crit}} \approx 0,7/d$$

où

f_{crit} est la fréquence critique à laquelle la réduction de la tension de claquage apparaît, en mégahertz;

d est la distance d'isolement, en millimètres.

Les caractéristiques d'isolation des distances d'isolement homogènes ou approximativement homogènes dans l'air sous pression atmosphérique en tenant compte de la fréquence peuvent être synthétisées par les indications suivantes.

- Au-dessus de f_{crit} , la tension de claquage diminue avec l'augmentation de la fréquence. La réduction de la tension de claquage peut atteindre 20 %.
- La tension de claquage atteint un minimum à des fréquences comprises entre 1 MHz et 5 MHz. A des fréquences plus élevées, la tension de claquage devient plus élevée et peut dépasser la valeur mesurée à la fréquence de travail.

Pour des champs non homogènes, f_{crit} est obtenue approximativement selon la formule ci-dessus. Au-dessus de f_{crit} , l'influence de la fréquence sur la tension de claquage est beaucoup plus significative. Cela peut être constaté sur la figure 5 [5] pour des distances d'isolement comparables assez grandes et en un point de l'électrode à 30° en combinaison avec une électrode plane de 15 cm de diamètre. La réduction de la tension de claquage vis-à-vis de sa valeur à 50 Hz peut être supérieure de 50 %. Les résultats sont fortement influencés par la configuration des électrodes. Les tensions de claquage les plus faibles sont mesurées avec l'électrode plane mise à la terre. En général, il est essentiel d'avoir une distribution du champ approximativement homogène pour les contraintes de tension à hautes fréquences.

The superposition of both effects results in typical curves which exhibit a minimum breakdown voltage for a certain frequency. For clearances with homogeneous and approximately homogeneous field distribution, data is shown in figures 1 and 2 [2]. At 25 MHz, the breakdown voltage is nearly the same as at 50 Hz. Figure 2 shows that the clearance is a very important parameter with respect to this behaviour.

With respect to the frequencies presently used, the range with the initial decrease of breakdown voltage with increasing frequency is of greater interest. This frequency range, being up to several MHz, is described in more detail hereafter.

For small clearances in N₂ at atmospheric pressure, which has similar breakdown characteristics as air, the reduction of the breakdown voltage may only be 10 %, as shown in figure 3 [3]. However, for frequencies exceeding 1 MHz, the reduction also becomes effective for very small clearances less than 0,5 mm. For larger clearances there is a greater reduction in the breakdown voltage, as shown in figure 4 [4].

As a conclusion, for homogeneous and approximately homogeneous conditions, the maximum reduction of the breakdown voltage with frequency is about 20 %. The critical frequency at which the reduction of the breakdown voltage occurs is approximately:

$$f_{\text{crit}} \approx 0,7/d$$

where

f_{crit} is the critical frequency at which the reduction of the breakdown voltage occurs, in megahertz;

d is the clearance in millimetres.

The insulating characteristics of homogeneous and approximately homogeneous clearances in air at atmospheric pressure with respect to frequency can be summarized by the following statements.

- Above f_{crit} , the breakdown voltage becomes lower with increasing frequency. The reduction in breakdown voltage may be up to 20 %.
- The breakdown voltage has its minimum at frequencies between 1 MHz and 5 MHz. With higher frequencies, the breakdown voltage becomes higher and may exceed the value at power frequency.

For inhomogeneous field conditions, f_{crit} is still obtained approximately from the equation given. Above f_{crit} , the influence of frequency on the breakdown voltage is much more significant. This can be seen from figure 5 [5] for comparatively large clearances and a 30° point electrode in combination with a plane electrode of 15 cm diameter. The reduction of the breakdown voltage with respect to that at 50 Hz can be more than 50 %. The results are strongly influenced by the electrode configuration. The lowest breakdown voltages were measured with the plane electrode earthed. As a general rule, it is essential to have approximately homogeneous field conditions if there is high-frequency voltage stress.

4 Lignes de fuite

Dans la CEI 60664-1, le cheminement est le seul phénomène pris en compte pour le dimensionnement des lignes de fuite. Cependant, de récents résultats de recherche [6] ont montré que cela ne s'applique en général que pour des conditions d'environnement très sévères et si les matériaux utilisés ne résistent pas au cheminement (voir CEI 60112). Dans des conditions d'environnement plus favorables, le cheminement ne semble pas être fonction du dimensionnement. Dans ce cas, cependant, la tension d'amorçage à la surface du matériau isolant est réduite par la pollution et doit être prise en compte pour le dimensionnement [7].

On ne sait pas si le phénomène de cheminement est influencé par la fréquence de la tension. Cependant, dans des conditions sévères de pollution ou avec des matériaux à faible CTI, un dimensionnement faible n'est pas possible et une marge de sécurité doit être prise. Cette marge de sécurité peut aussi permettre une possible influence de la fréquence sur la capacité de tenue au cheminement.

Pour des pollutions plus faibles, la tension d'amorçage à la surface de l'isolant semble être prise en compte pour le dimensionnement et une possible influence de la fréquence doit être considérée. Cependant, cette influence peut déjà être prise en compte par la dépendance de la fréquence de la tension de claquage de la distance d'isolement associée définie à l'article 3.

L'influence à long terme de l'humidité peut changer cette situation. Une réduction significative de la tension de claquage à la surface de l'isolation, plus particulièrement pour des fréquences plus élevées, apparaît dans de telles conditions. Ceci est essentiellement un problème dû à l'absorption d'eau à l'intérieur de l'isolant solide et c'est pourquoi ce phénomène est analysé à l'article 5.

5 Isolation solide

Deux mécanismes de défauts de l'isolation solide sont normalement pris en compte. Un mécanisme de défaut est dû aux pertes diélectriques à des niveaux de contrainte électrique élevés. Un échauffement plus important apparaît, pouvant entraîner une instabilité thermique et un claquage thermique. Ceci a généralement lieu en quelques minutes et peut être facilement vérifié. De plus, une isolation solide peut comporter des inclusions gazeuses ou des défauts provoqués soit entre les couches de l'isolation ou à l'interface entre les pièces isolantes et les pièces conductrices, soit par un usinage imparfait du matériau d'isolation solide. Dans de telles conditions, des décharges partielles peuvent entraîner un défaut éventuel de l'isolation solide même si la contrainte diélectrique est suffisamment faible pour ne pas entraîner un claquage thermique.

Pour l'isolation solide, la fréquence de la tension est un facteur d'influence très important. La perte diélectrique à une fréquence donnée est obtenue à partir de l'équation suivante:

$$P_v = \tan \delta \times 2 \pi f \times U^2 \times C$$

où

P_v est la puissance de dissipation;

$\tan \delta$ est le facteur de perte;

f est la fréquence;

U est la tension appliquée à l'isolation solide;

C est la capacité de la disposition d'isolation.

4 Creepage distances

In IEC 60664-1, tracking is the only phenomenon taken into account for dimensioning of creepage distances. However, recent research [6] provides evidence that this does only apply for very severe environmental conditions, and if the materials used are not resistant to tracking (see IEC 60112). Under more favourable environmental conditions, tracking does not seem to be relevant for dimensioning. In this case, the flashover voltage across the surface of the insulating material is reduced by pollution and has to be taken into account for dimensioning [7].

It is not known whether tracking is influenced by the frequency of the voltage. However, under conditions of severe pollution, or for materials having a low comparative tracking index, small dimensions are not possible, and a safety margin has to be provided. This safety margin may also allow for a possible influence of frequency on the withstand capability.

For less pollution, the flashover voltage across the surface of the insulation seems to be relevant for dimensioning and a possible influence of frequency has to be considered. However, this influence may already be covered by the frequency dependence of the breakdown voltage of the associated clearance according to clause 3.

Long-term influence of humidity is likely to change this situation. A significant reduction of the breakdown voltage across insulation surfaces, especially for higher frequencies, occurs under such conditions. This is mainly a problem caused by water absorption within solid insulation, and this phenomenon is considered in clause 5.

5 Solid insulation

Two failure mechanisms of solid insulation are normally relevant. One failure mechanism results from dielectric loss at high electric stress. Increased heating will occur, which may lead to thermal instability and thermal breakdown. This usually takes place within a few minutes and can be easily verified. Additionally, solid insulation can include gas gaps or voids, either caused by different layers of insulation, interfaces between insulating parts and conductive parts, or by imperfect manufacturing of the insulation material. In such small gaps, partial discharges are likely to cause eventual failure of solid insulation even if the dielectric stress is sufficiently low so as not to cause thermal breakdown.

For solid insulation, the frequency of the voltage is a very important influencing factor. The dielectric loss for a given frequency is obtained from the following equation:

$$P_V = \tan \delta \times 2 \pi f \times U^2 \times C$$

where

P_V is the power dissipation;

$\tan \delta$ is the loss factor;

f is the frequency;

U is the voltage across the solid insulation;

C is the capacitance of the insulation arrangement.

En raison de la dépendance du facteur de perte $\tan \delta$ avec la fréquence, l'influence de la fréquence sur la perte diélectrique peut être inférieure ou supérieure à celle pouvant être obtenue si la dépendance est linéaire. Ceci est dû à une probabilité plus grande de claquage thermique et à une réduction de la capacité de tenue diélectrique à court terme. Ce phénomène a été testé sur divers matériaux isolants [8]. Les résultats les plus importants sont indiqués à la figure 6. Pour une fréquence de 1 MHz, l'intensité du champ de claquage à court terme peut être de seulement 10 % de la fréquence de fonctionnement. L'intensité du champ de claquage ne semble pas atteindre une limite plus faible même à des fréquences aussi élevées que 100 MHz.

En général, et particulièrement pour les tensions à hautes fréquences, la rigidité diélectrique de l'isolation solide est davantage réduite par l'influence de l'humidité et de la température.

L'influence du stockage à long terme sur l'intensité du champ électrique au claquage de l'isolation solide sous des tensions à hautes fréquences et sous forte humidité est montrée à la figure 7 [9]. Spécialement pour des résines phénoliques micacées, la réduction de la valeur du champ électrique au claquage est extraordinairement élevée. Cela semble déjà un problème grave pour des fréquences industrielles, mais cela s'aggrave davantage pour une augmentation de fréquence. La raison est la capacité d'absorption plutôt élevée des phénoliques mica chargés, laquelle est de l'ordre de 1 % du poids dans de telles conditions. Dans les mêmes conditions, l'absorption d'eau des stratifiés silicone-verre est seulement de 0,3 % de la masse.

L'intensité du champ électrique au claquage de l'isolation solide est fonction de l'épaisseur du matériau et les films de très faible épaisseur peuvent présenter des intensités du champ électrique au claquage supérieures de l'ordre d'une magnitude à celles des éprouvettes de 0,75 mm d'épaisseur. Ceci est montré à la figure 8 [10]. Avec l'augmentation de la fréquence, cependant, il existe une réduction significative des valeurs. A 1 MHz, seulement 10 % des valeurs à 50 Hz sont retrouvées. A de telles hautes fréquences, la tenue des films minces semble analogue à celle d'éprouvettes d'environ 1 mm d'épaisseur. L'influence de l'épaisseur du film sur la tension de claquage peut être vue de manière plus détaillée à la figure 9 [10]. Il existe des indications sur la tension de claquage de films très minces plutôt moins affectés par la fréquence, mais pour des films de 0,01 mm, il existe une réduction significative.

La figure 10 [11] montre que la valeur du champ au claquage de l'isolation solide à toutes les fréquences est réduite en plus par l'augmentation de la température. L'influence de l'augmentation de la température sur la tension de claquage de films minces est montrée à la figure 11 [10], laquelle met en exergue une tendance de la réduction de la tension de claquage avec l'augmentation de la température et son aggravation avec l'augmentation de la fréquence.

Jusqu'ici, seuls la contrainte à court terme et le claquage thermique ont été considérés. Pour des contraintes à long terme, des décharges partielles doivent aussi être prises en compte [12]. L'expérience montre que des matériaux isolants de faible épaisseur utilisés dans les matériels à basse tension ne peuvent résister à de telles décharges pendant de longues périodes. Ceci signifie qu'aucune décharge partielle ne doit se maintenir en service dans des conditions établies. Des décharges partielles doivent être attendues sous des contraintes diélectriques nettement plus faibles que celles provoquant le claquage thermique.

Des résultats détaillés sur les caractéristiques de décharges partielles à hautes fréquences ne sont valables que pour des fréquences jusqu'à quelques kHz [13, 14]. Dans cette gamme de fréquences, il a été établi que le temps de défaut provoqué par les décharges partielles est inversement proportionnel à la fréquence. Ceci a déjà été utilisé par des essais accélérés. C'est pourquoi, particulièrement pour les hautes fréquences, aucune durée de vie raisonnable ne peut être définie quand apparaissent des décharges partielles.

Des mesures plus détaillées ont été faites sur des circuits imprimés revêtus. Un des circuits d'essai utilisé est montré à la figure 12. Un enregistrement typique de l'intensité des décharges partielles (charge apparente q) est représenté en pointillés à la figure 13 [15].

Due to the dependence of the loss factor $\tan \delta$ on frequency, the influence of frequency on the dielectric loss may be lower or higher than can be expected from the apparent linear dependency. This results in a higher probability of thermal breakdown and a reduction of the short-time dielectric withstand capability. This phenomenon has been investigated on different insulating materials [8]. The most important results are shown in figure 6. For a frequency of 1 MHz, the short-time breakdown field strength may only be 10 % of the power frequency value. The breakdown field strength does not seem to reach a lower limit even at frequencies as high as 100 MHz.

The dielectric strength of solid insulation in general, and especially at high-frequency voltage, is further reduced by the influence of humidity and temperature.

The influence of long-time storage on the breakdown field strength of solid insulation at high-frequency voltage under high humidity is shown in figure 7 [9]. The reduction of the breakdown field strength of mica-filled phenolic is extraordinarily high. This is a significant problem at power frequency, but is further aggravated with increasing frequency. The poor performance of mica-filled phenolic is caused by its comparatively high water absorption, which was found to be in the order of 1 % by weight under such conditions. Under the same conditions, the water absorption of glass-silicone laminate was only 0,3 % by weight.

The breakdown field strength of solid insulation is a function of the thickness of the material, and very thin films may have a breakdown field strength one order of magnitude higher than that of the 0,75 mm test specimen. This is shown in figure 8 [10]. With increasing frequency, there is a significant reduction of the values. At 1 MHz only approximately 10 % of the 50 Hz values were found. At such high frequencies, the behaviour of thin films seems to be similar to that of specimens having approximately 1 mm thickness. The influence of the thickness of the film on the breakdown voltage can be seen in more detail in figure 9 [10]. There is some indication that the breakdown voltage of very thin films is slightly less affected by frequency, but even for 0,01 mm film, there is still a significant reduction.

Figure 10 [11] shows that the breakdown field strength of solid insulation at all frequencies is additionally reduced with increasing temperature. The influence of increased temperature on the breakdown voltage of thin films is shown in figure 11 [10], which shows that the reduction of breakdown voltage with increasing temperature is aggravated with increasing frequency.

So far, only short-time stress and thermal breakdown have been considered. For long-time stress, partial discharges have also to be taken into account [12]. Experience shows that, in particular, thin insulation used in low-voltage equipment cannot withstand these discharges for long periods. Therefore, partial discharges should not be maintained under steady-state conditions. Partial discharges are to be expected at a dielectric stress significantly lower than that causing thermal breakdown.

Detailed results concerning the partial discharge characteristics at high-frequency voltage are only available for frequencies up to a few kHz [13, 14]. In that range, it has been established that the time to failure caused by partial discharges is inversely proportional to frequency. This relationship has been used for accelerated testing. Therefore, especially at higher frequencies, a reasonable lifetime cannot be expected when partial discharges occur.

Detailed measurements have been made on coated printed circuit boards. One of the test boards is shown in figure 12. A typical plot of the partial discharge intensity (apparent charge q) is shown in figure 13 [15].

Pour ce type d'éprouvette, une augmentation de la charge apparente avec l'augmentation de la fréquence est davantage susceptible de se produire qu'une diminution. Il a été établi que, pour des hautes fréquences dans de telles conditions, le temps de défaut peut être seulement de l'ordre de quelques minutes. C'est pourquoi, l'essai de décharge partielle à haute fréquence peut être destructif.

En complément, la tension de début de décharge partielle U_i et la tension d'extinction de décharge partielle U_e peuvent être influencées par la fréquence. Comme montré à la figure 14 [15], une réduction des tensions de décharge partielle avec l'augmentation de la fréquence semble être typique pour les circuits imprimés revêtus. Cependant, cette caractéristique paraît largement dépendante du type d'éprouvette. Comme montré à la figure 15 [15], les tensions de décharge partielle des optocoupleurs ne semblent pas influencées par la fréquence, et à haute fréquence, il semble qu'il y ait même une tendance à la diminution de la charge apparente q . Cependant, l'effet cumulatif de la fréquence et de la charge apparente comme cause de défaut est plus important qu'aux fréquences industrielles.

6 Essais à haute fréquence

Les essais suivants sont appropriés vis-à-vis de la fréquence:

- vérification de la tension diélectrique à court terme pour les distances d'isolement et, en particulier, pour l'isolation solide, par un essai sous tension alternative à haute fréquence;
- pour tenir compte des contraintes électriques à long terme, vérifier qu'aucune décharge partielle ne se maintienne dans des conditions normales de service.

Actuellement, les matériels d'essai à haute fréquence ne sont valables qu'avec une puissance de sortie limitée appropriée pour les essais des composants et de petits sous-ensembles.

6.1 Essai de claquage à haute fréquence

Cet essai est semblable à l'essai à haute tension à fréquence industrielle. Actuellement, les sources d'essai HF à haute puissance ne sont pas disponibles.

6.1.1 Méthode d'essai

Il a été observé que la tenue à haute fréquence est largement influencée par la température des matériels et les conditions d'environnement. L'essai devrait être réalisé dans les conditions les plus difficiles telles qu'elles peuvent exister en service, comprenant l'élévation de la température due au fonctionnement normal du matériel.

6.1.2 Matériel d'essai

Pour des fréquences jusqu'à quelques MHz, un moyen approprié pour générer la tension d'essai est l'utilisation d'un oscillateur de haute puissance associé à un transformateur à noyau à air. Un tel circuit est montré à la figure 16 [10]. Avec ce circuit, des fréquences fixes de 100 kHz jusqu'à 10 MHz peuvent être réglées avec une puissance de sortie de 1,5 kW. En raison de la charge capacitive élevée, la fréquence et la tension de sortie sont influencées par l'éprouvette.

Afin de couvrir la gamme de fréquences de quelques kHz à 1 MHz, un circuit d'essai constitué d'un amplificateur à haute puissance et d'un transformateur à résonance HF peut être utilisé. Le circuit est montré à la figure 17 [15] avec un circuit de détection de décharges partielles. Le domaine de fréquence des transformateurs à résonance en fonction du nombre de spires au secondaire est montré à la figure 18. L'essai à haute fréquence nécessite un nombre assez faible de spires. Afin de couvrir la gamme complète de fréquences, plusieurs transformateurs à résonance sont nécessaires.

For this type of test specimen, an increase of the apparent charge with increasing frequency is more likely to occur than a decrease. It has been established that at high frequency, the time to failure may only be in the order of minutes. Therefore, partial discharge testing at high frequency for such periods may be destructive.

Additionally, the partial discharge inception voltage U_i and the partial discharge extinction voltage U_e may be influenced by frequency. As shown in figure 14 [15], some reduction of the partial discharge voltages with increasing frequency is to be expected for coated printed circuit boards. However, this characteristic seems to depend on the type of test specimen. As shown in figure 15 [15], the partial discharge voltages of optocouplers do not seem to be influenced by frequency. At high frequency, there seems to be even some tendency of a decrease of the apparent charge q . However, the combined effect of frequency and apparent charge as the source of failure is more onerous than at power frequency.

6 High-frequency testing

The following tests are relevant with regard to frequency:

- verification of the short-time dielectric strength for clearances and, in particular, for solid insulation by an a.c. voltage test at high frequency;
- with regard to long-time electric stress, verification that no partial discharges are maintained under steady-state conditions.

At the present time, high-frequency test equipment is only available with limited power output, so that only components and small subassemblies can be tested.

6.1 High-frequency breakdown test

This test is similar to the high-voltage test at power frequency. At present, no standard high-power HF test voltage sources are available.

6.1.1 Test method

It has been observed that the high-frequency withstand is influenced by equipment temperature and environmental conditions. The test should be performed under the most onerous conditions that may be encountered in service, including the temperature rise caused by normal operation of the equipment.

6.1.2 Test equipment

For frequencies up to a few MHz, one way to generate the test voltage is by using a high-power oscillator in combination with an air-core transformer. An appropriate circuit is shown in figure 16 [10]. With this circuit, fixed frequencies from 100 kHz up to 10 MHz can be adjusted with an output power of 1,5 kW. Due to the high capacitive loading, both frequency and output voltage are influenced by the test specimen.

In order to cover the whole frequency range from a few kHz to 1 MHz, a test circuit consisting of a high-power amplifier and an HF resonance transformer can be used. The circuit is shown in figure 17 [15], together with a partial discharge detection circuit. The frequency range for resonance transformers dependent on the number of secondary turns is shown in figure 18. High-frequency operation requires a low number of secondary turns. In order to cover the whole frequency range, several resonance transformers are required.

6.2 Essai de décharge partielle à haute fréquence

6.2.1 Méthode d'essai

En raison du risque élevé de détérioration de l'éprouvette en hautes fréquences, le taux d'augmentation de la tension devrait être aussi élevé que possible sans provoquer de claquage. En général, le niveau de bruit pendant les essais de décharges partielles à haute fréquence sera significativement plus élevé que celui apparaissant aux fréquences industrielles.

Les résultats préliminaires obtenus sur des optocoupleurs montrent que les tensions de décharges partielles ne sont pas influencées de façon significative par la fréquence. Si cela pouvait être vérifié sur une base plus représentative, un essai de décharge partielle sous la tension aux fréquences industrielles devrait être suffisant pour donner assez d'informations sur les caractéristiques de décharge partielle des optocoupleurs sous des tensions à haute fréquence. Pour les circuits imprimés revêtus, les résultats sont différents parce que les tensions de décharge partielle et leurs intensités sont influencées par la fréquence. Ces aspects nécessitent des investigations complémentaires avec d'autres types d'éprouvettes.

6.2.2 Matériel d'essai

La mesure des décharges partielles est plus difficile car la source de tension d'essai et le matériel de mesure des décharges partielles n'existent pas encore.

Cependant, cette difficulté peut être contournée en utilisant le matériel de laboratoire montré à la figure 17. La détection de décharge partielle est réalisée par une intégration numérique avec un oscilloscope numérique à mémoire à haut taux d'échantillonnage. Les résultats montrés aux figures 13 à 15 ont été obtenus avec ce circuit d'essai.

6.2 High-frequency partial discharge test

6.2.1 Test method

Due to the high risk of deterioration of the test specimen at high frequencies, the rate of voltage rise should be as high as possible without causing overshoot. In general, the noise level during high frequency partial discharge testing will be significantly higher than that occurring during power-frequency testing.

The preliminary results obtained for optocouplers give some indication that the partial discharge voltages are not significantly influenced by frequency. If this could be verified on a more representative basis, a partial discharge test with power-frequency voltage could be sufficient to give enough information about the partial discharge characteristics of optocouplers at high frequency. For coated printed circuit boards, this is different, because both the partial discharge voltages and the partial discharge intensity are influenced by frequency. These aspects need further investigation with other test specimens.

6.2.2 Test equipment

The measurement of partial discharges is more difficult, because both the test voltage source and the partial discharge measuring equipment are not readily available.

However, this difficulty may be overcome by employing laboratory apparatus as shown in figure 17. The partial discharge detection is performed by digital integration with a digital storage oscilloscope of high sampling rate. With this test circuit, the data shown in figures 13 to 15 were obtained.

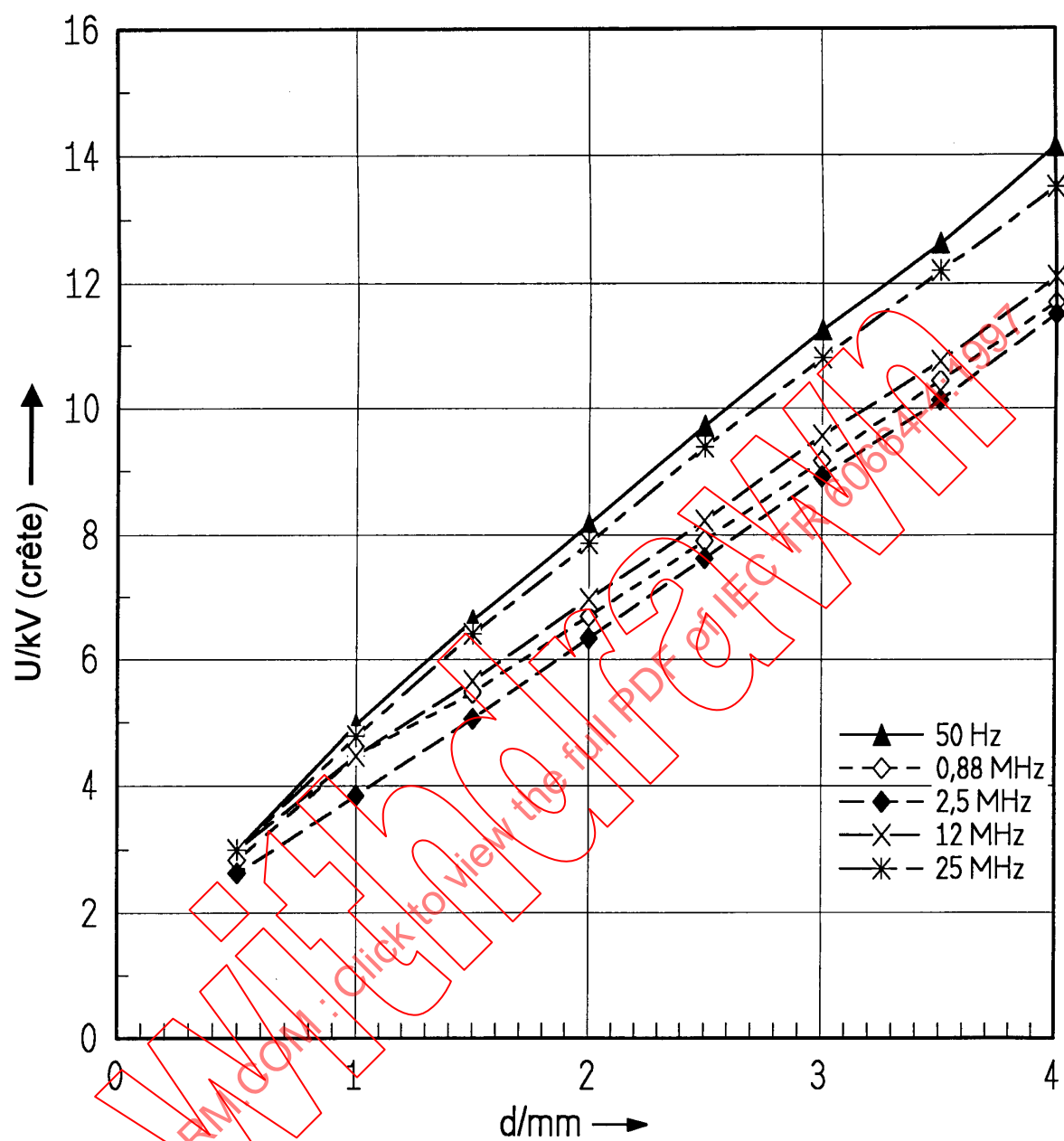


Figure 1 – Claquage à haute fréquence, dans l'air, champ homogène [2]

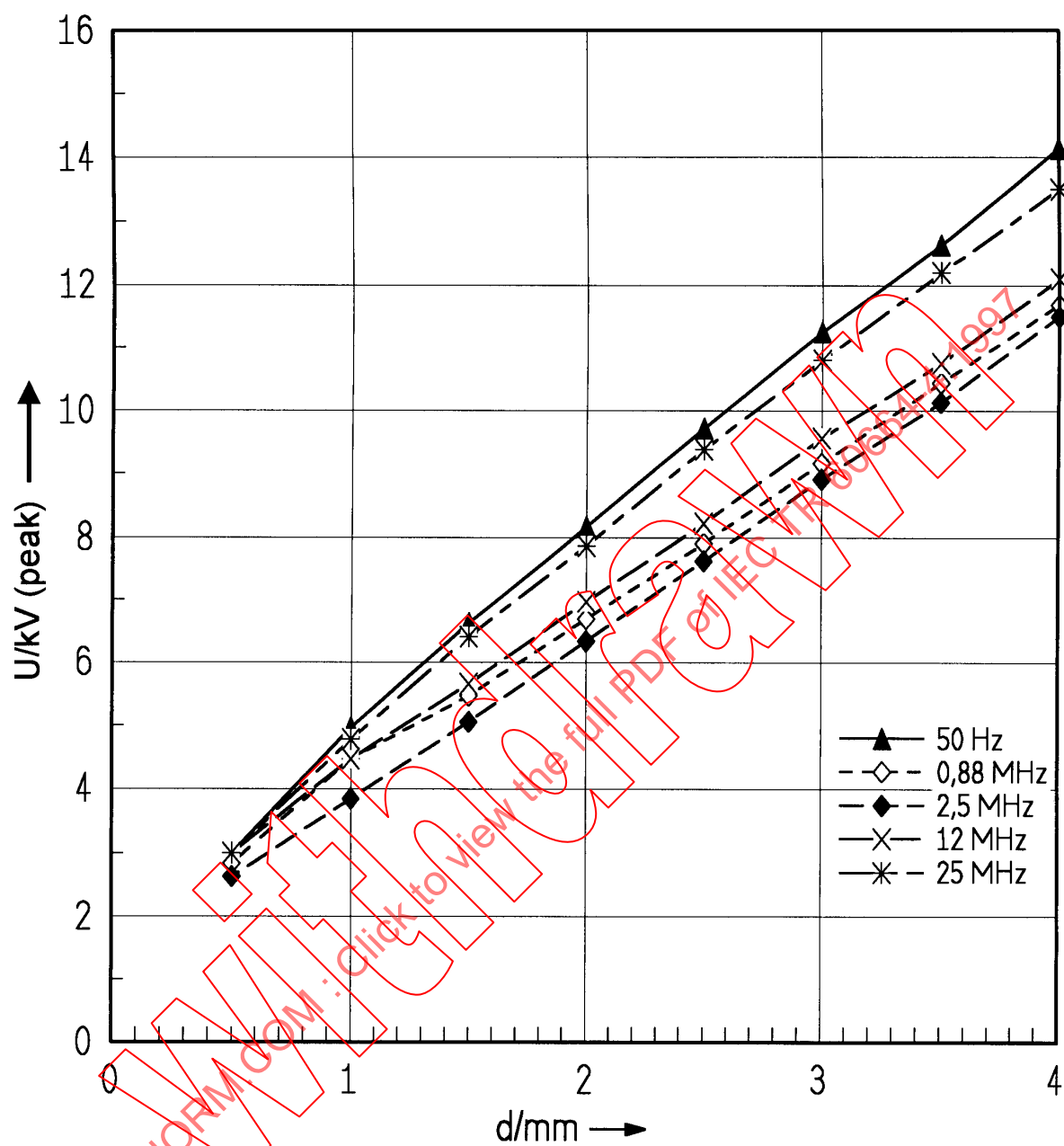


Figure 1 – Breakdown at high frequency in air, homogeneous field [2]

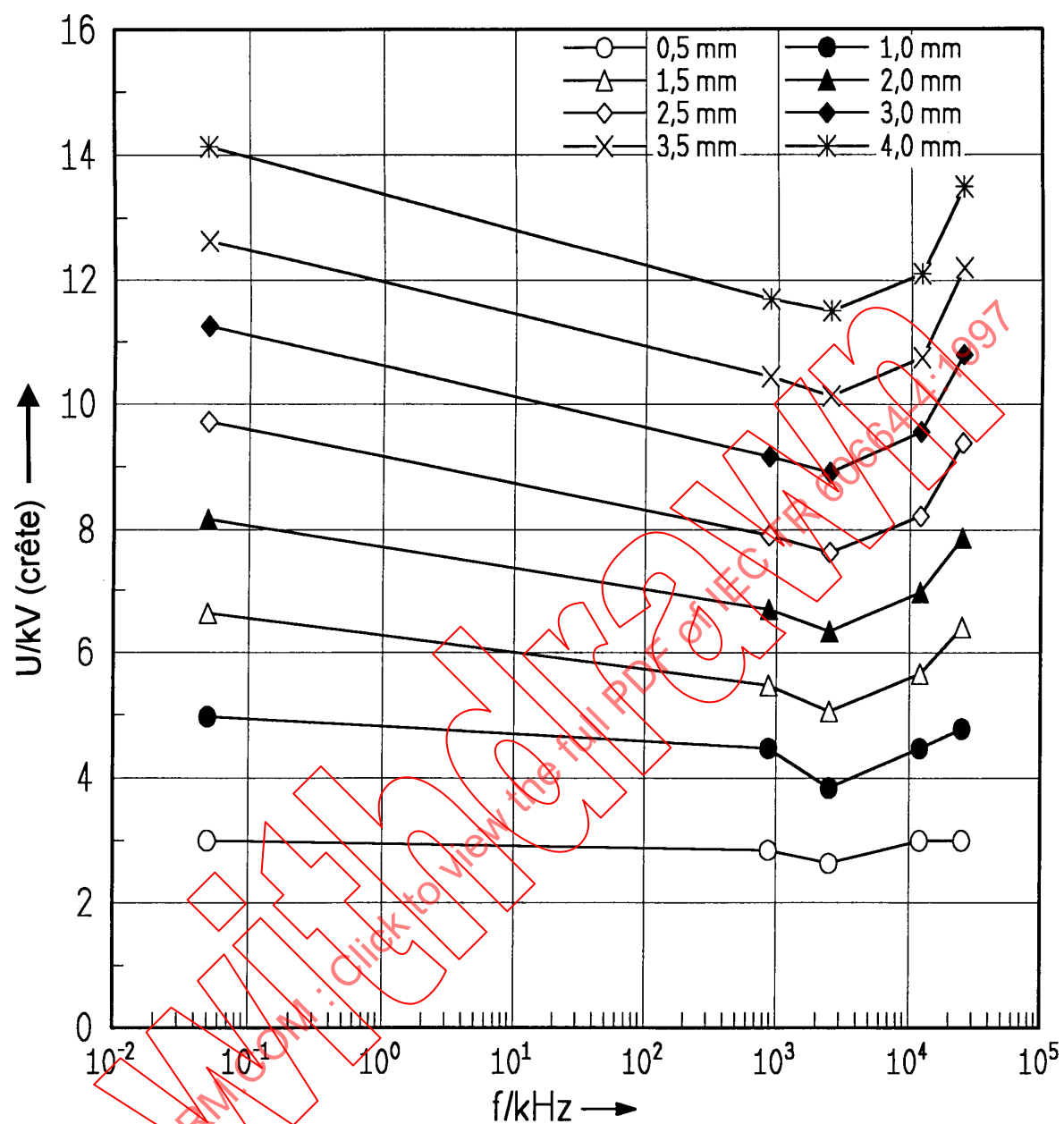


Figure 2 – Claquage à haute fréquence, dans l'air, champ homogène [2]

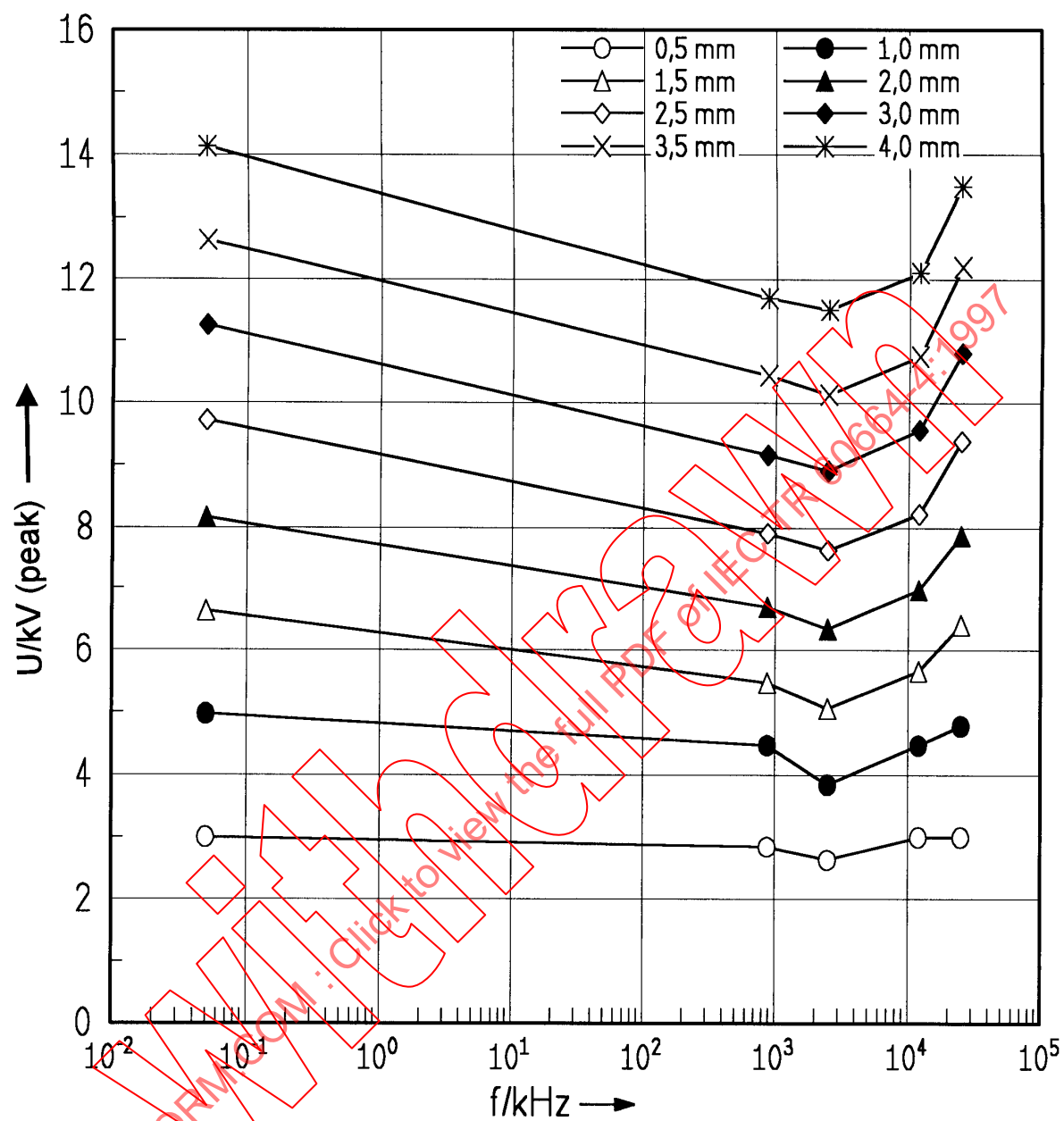


Figure 2 – Breakdown at high frequency in air, homogeneous field [2]

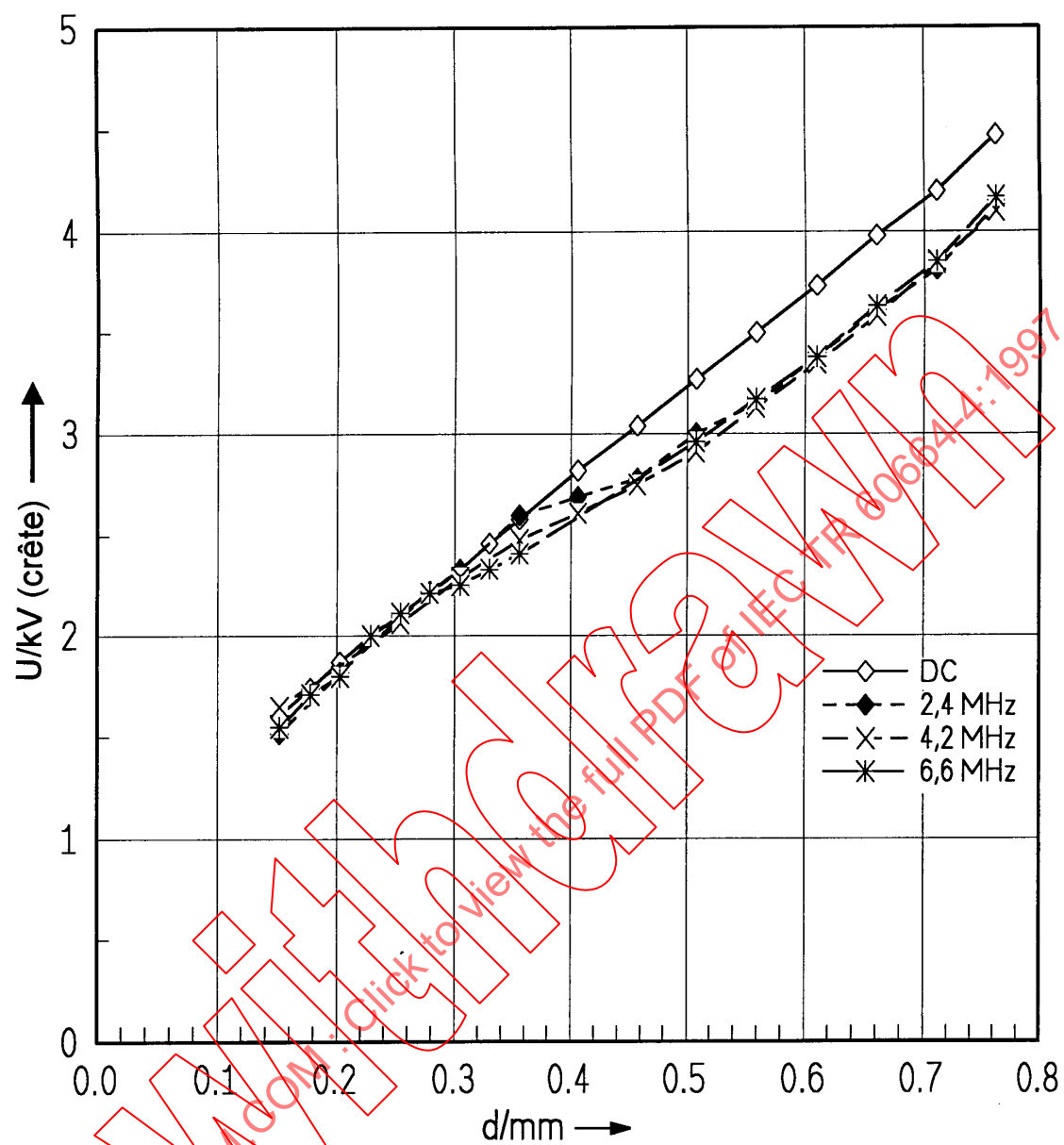


Figure 3 – Claquage à haute fréquence dans l'azote, champ homogène [3]

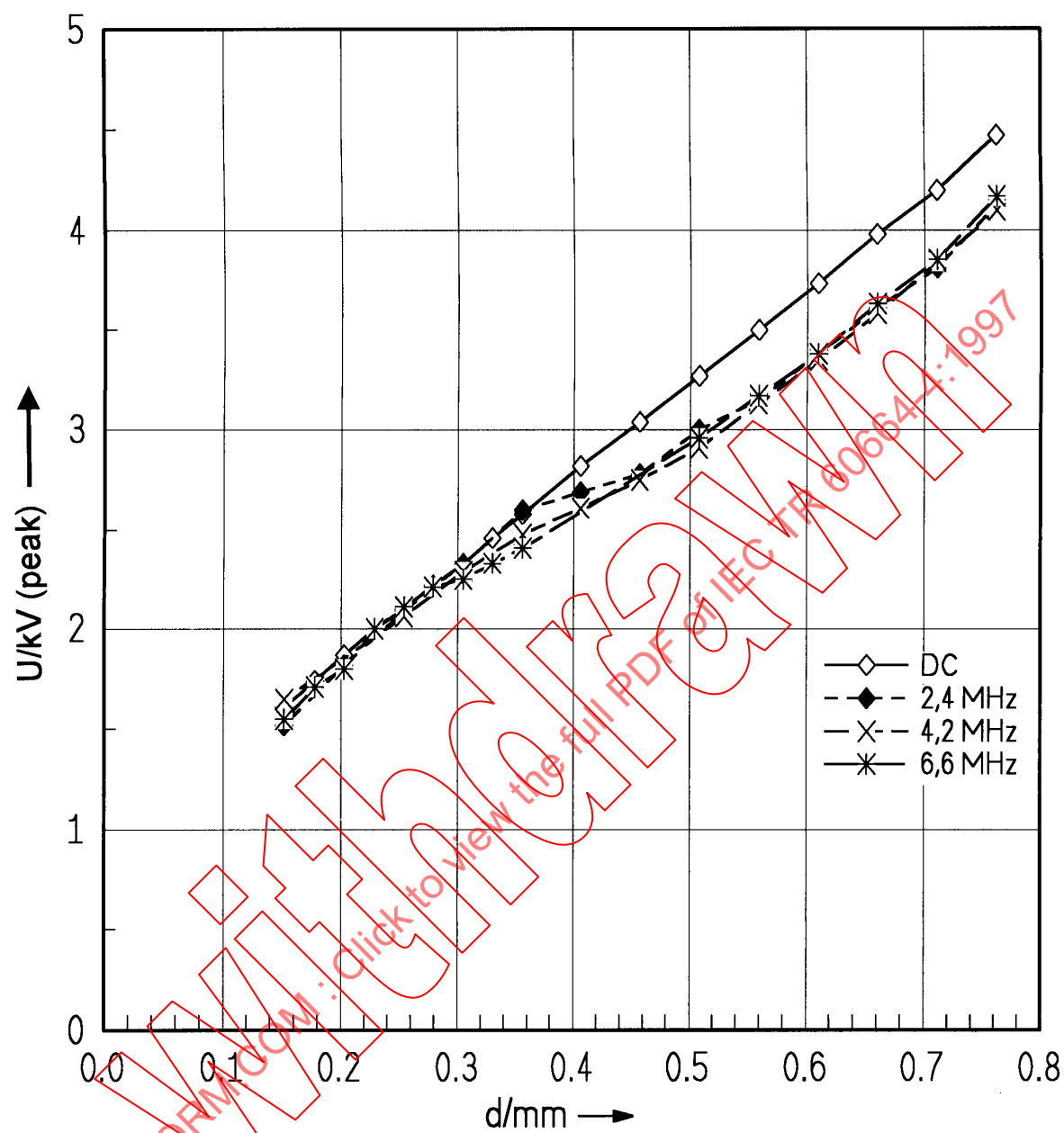


Figure 3 – Breakdown at high frequency in nitrogen, homogeneous field [3]

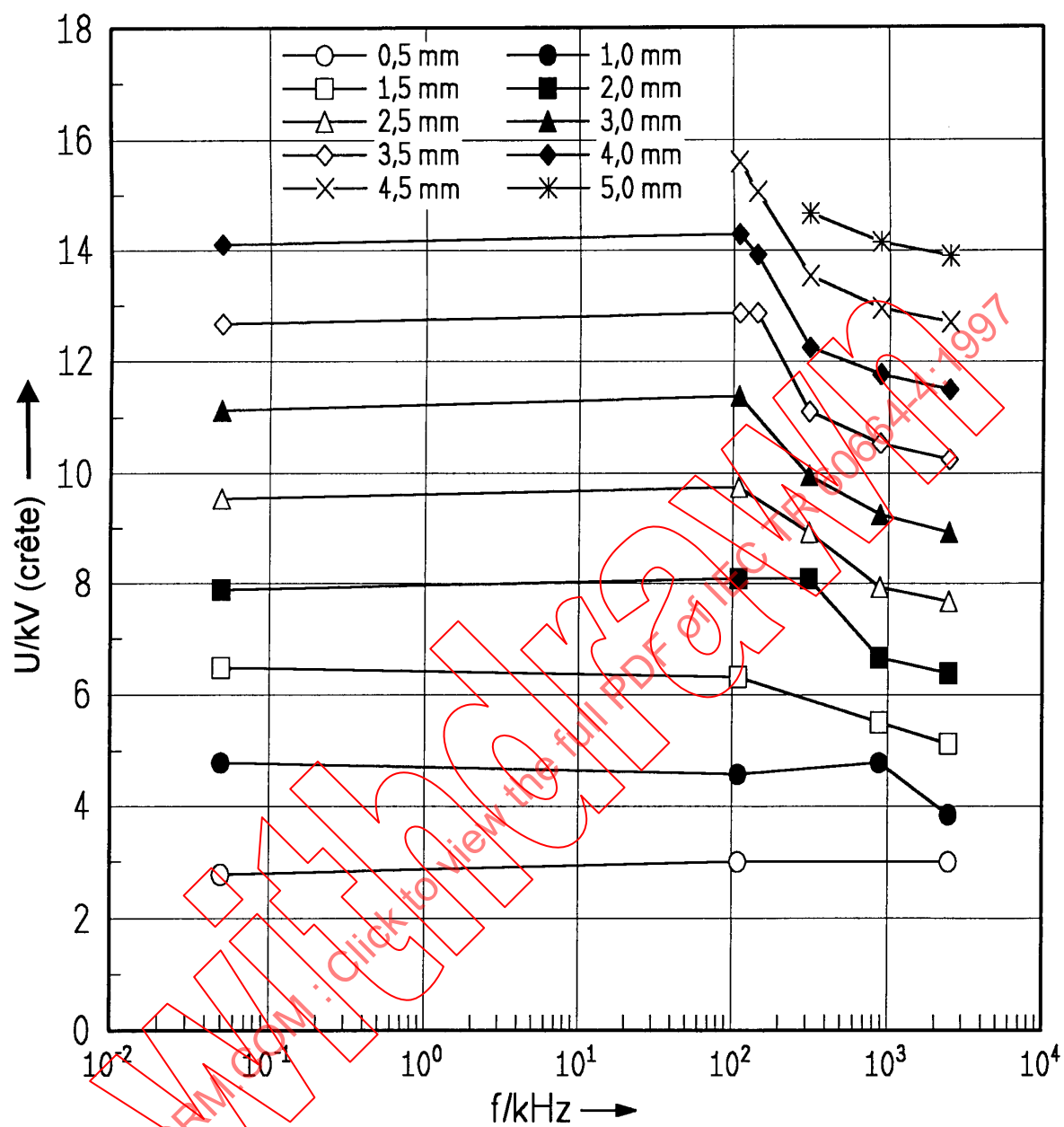


Figure 4 – Claquage à haute fréquence dans l'air, champ homogène [4]

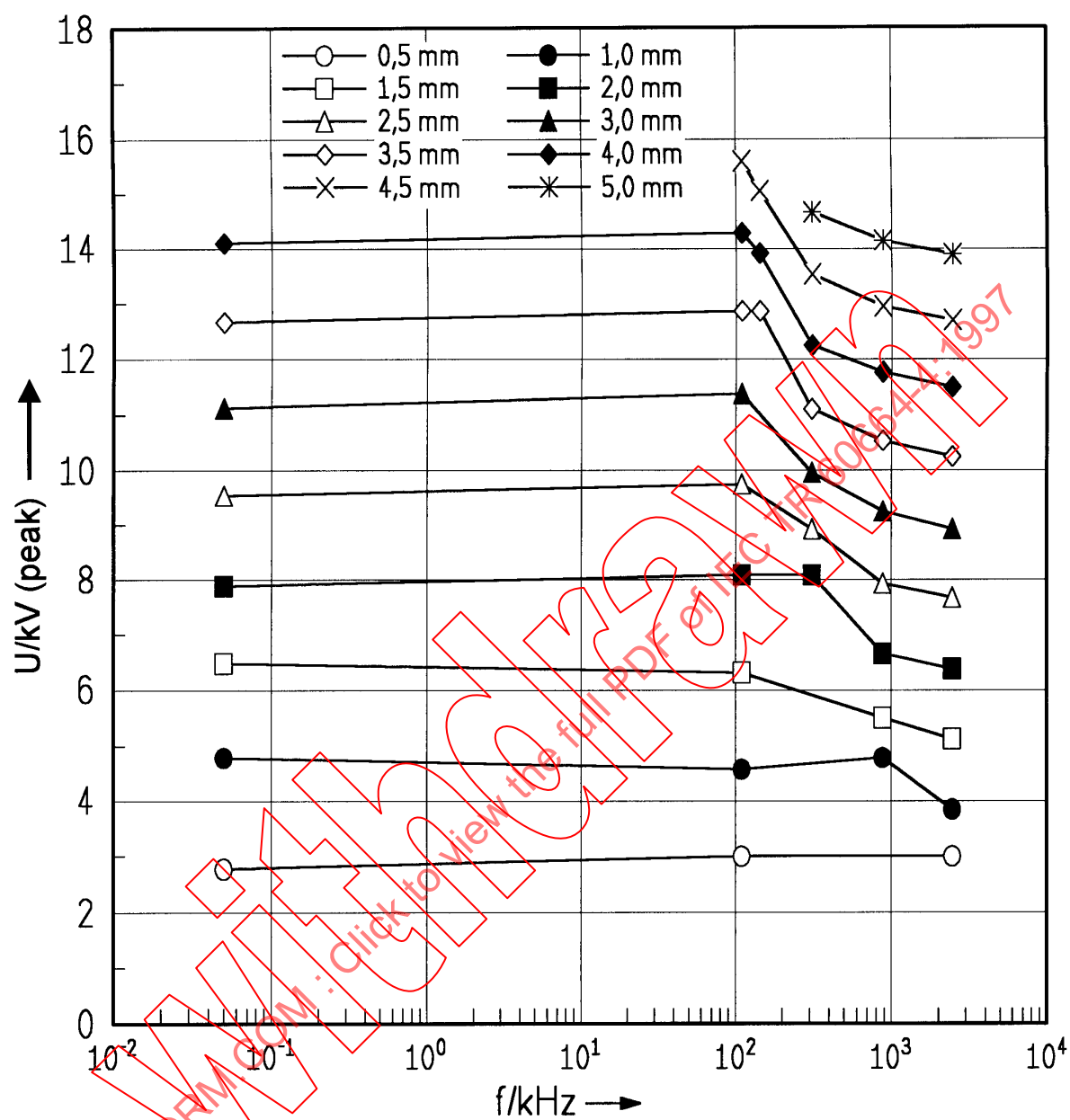


Figure 4 – Breakdown at high frequency in air, homogeneous field [4]

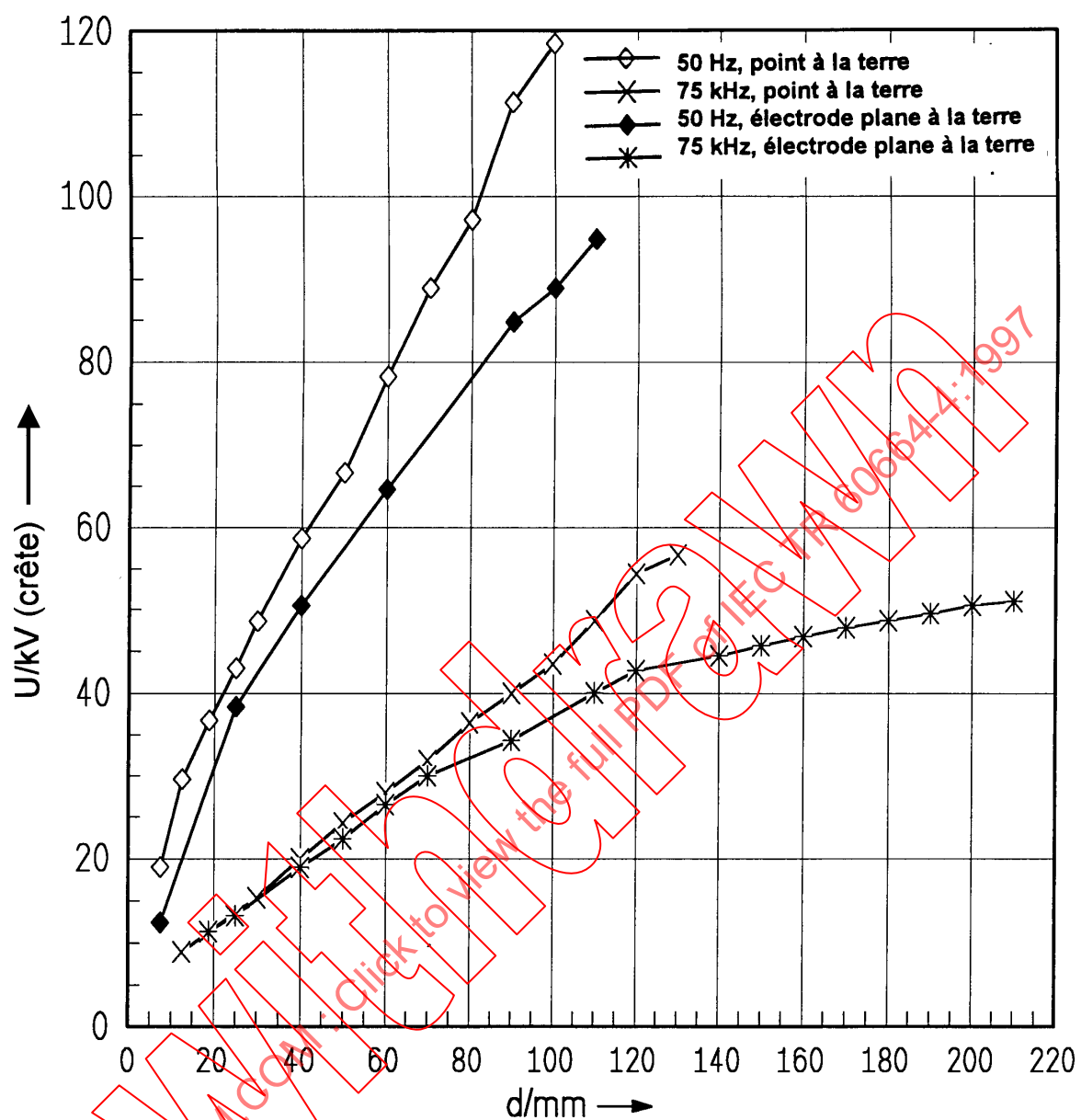


Figure 5 – Claquage à haute fréquence, dans l'air, champ non homogène [5]

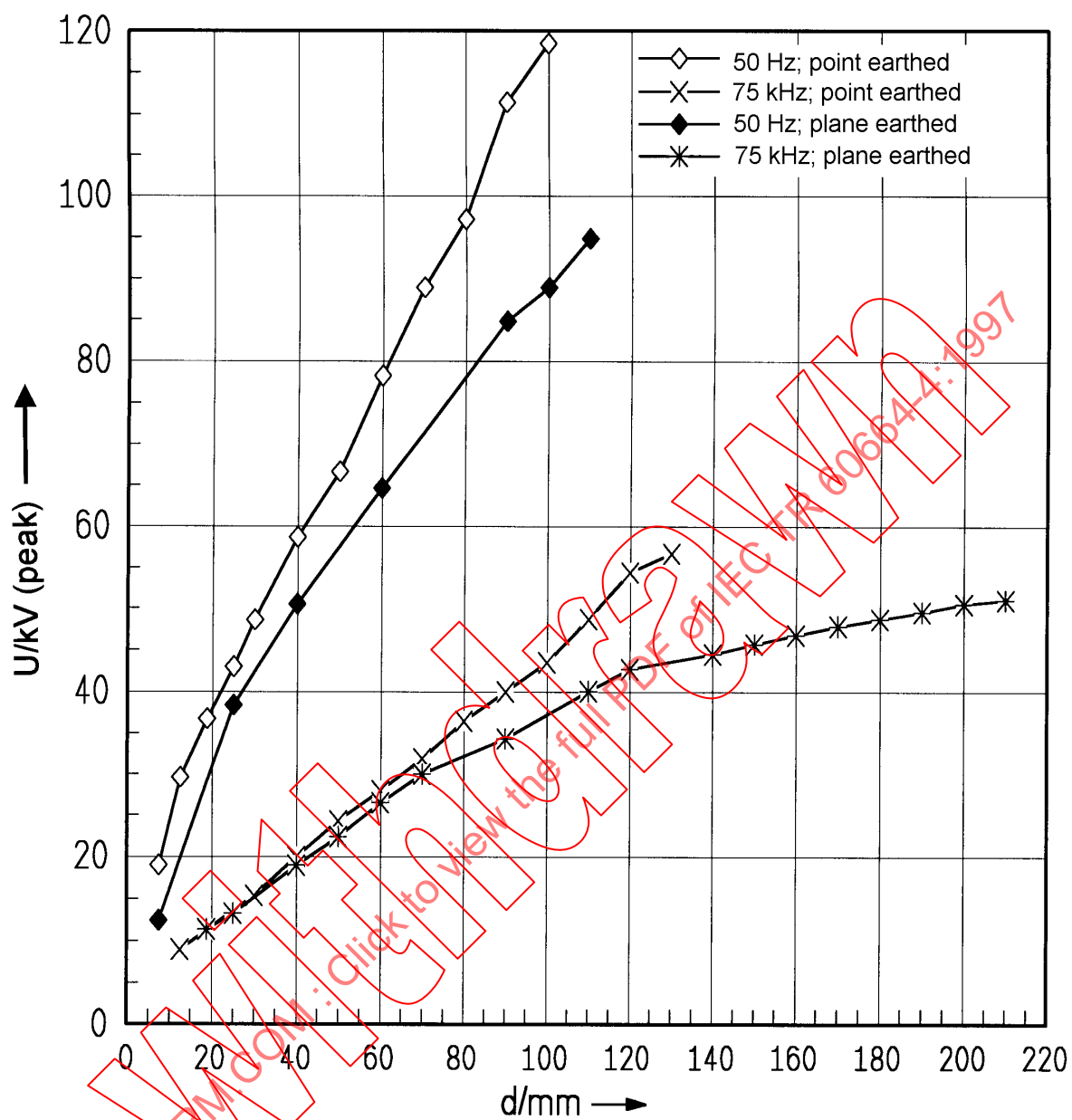
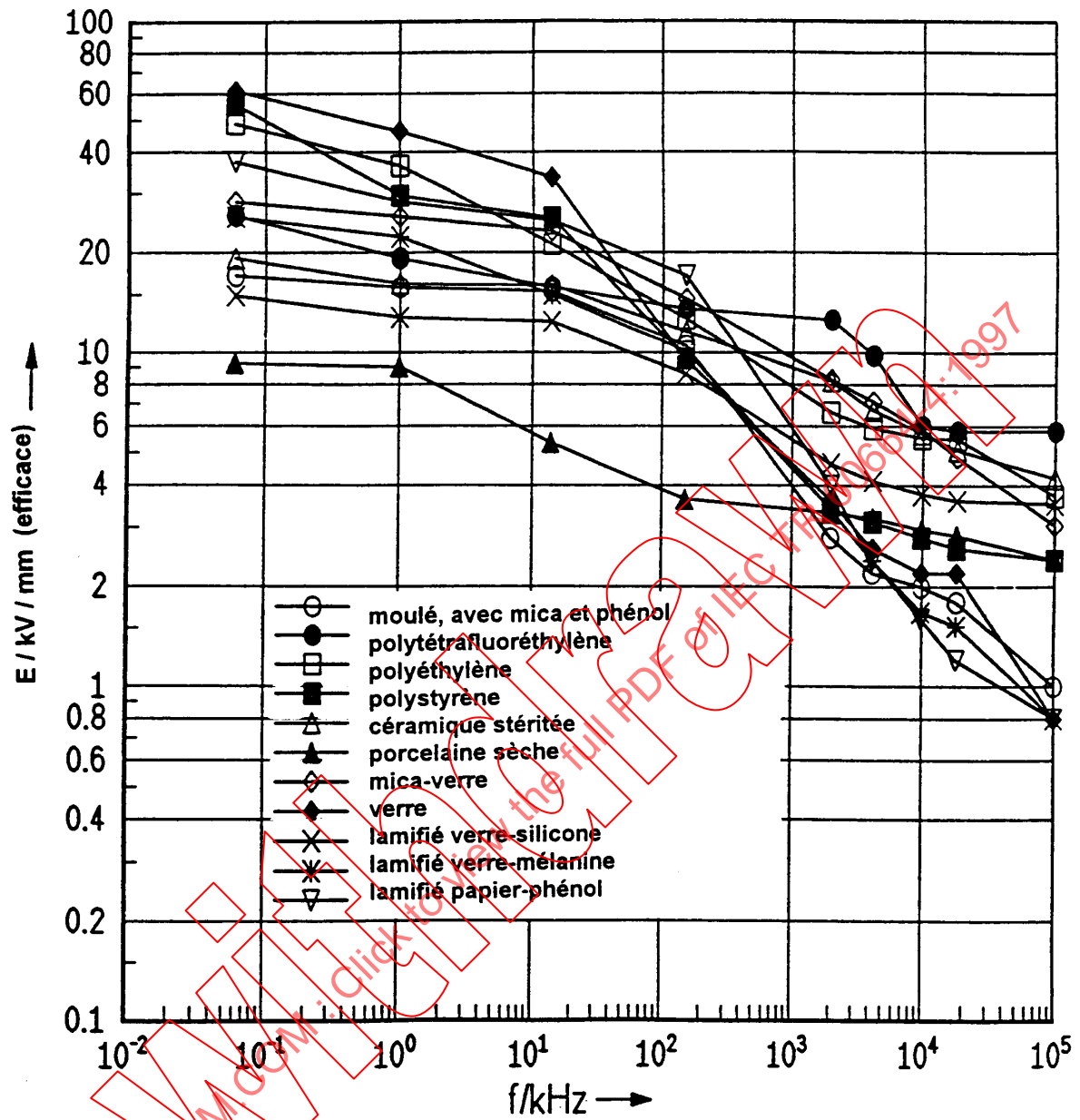


Figure 5 – Breakdown at high frequency in air, inhomogeneous field [5]



$d = 0,75 \text{ mm}$

Figure 6 – Claquage à haute fréquence, isolation solide [8]

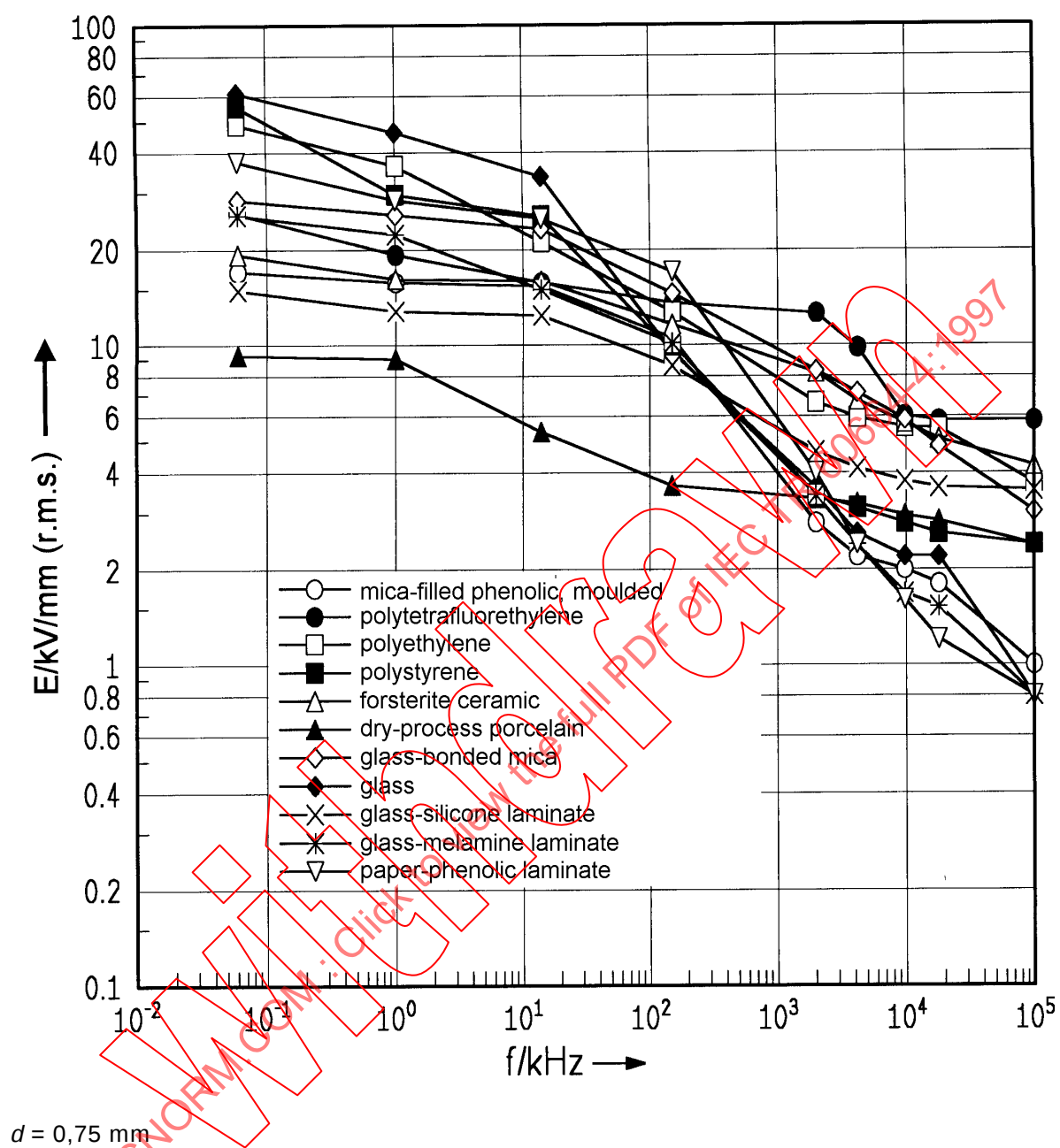


Figure 6 – Breakdown at high frequency, solid insulation [8]

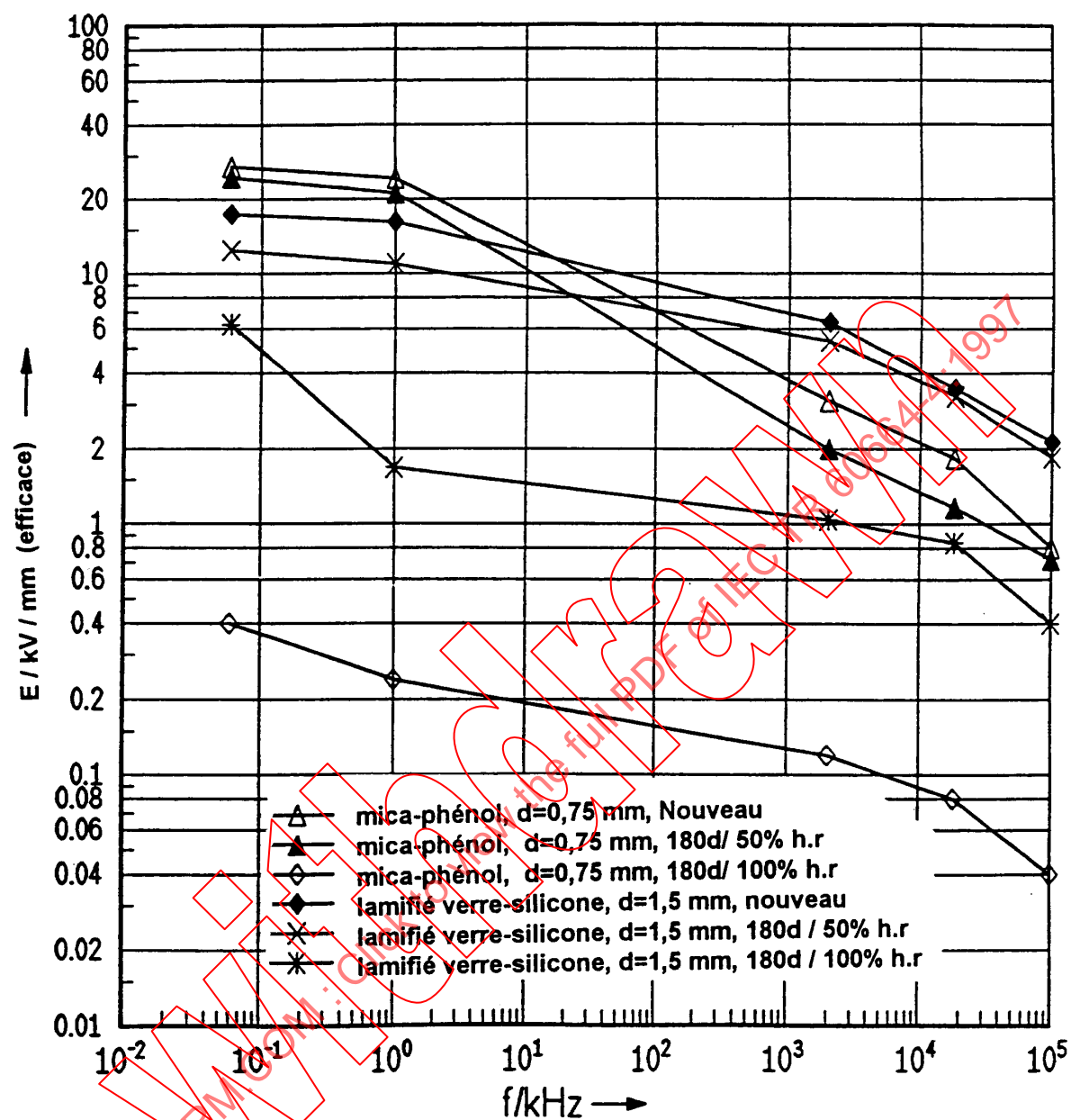


Figure 7 – Claquage à haute fréquence, isolation solide; conditionnement à 50 °C [9]

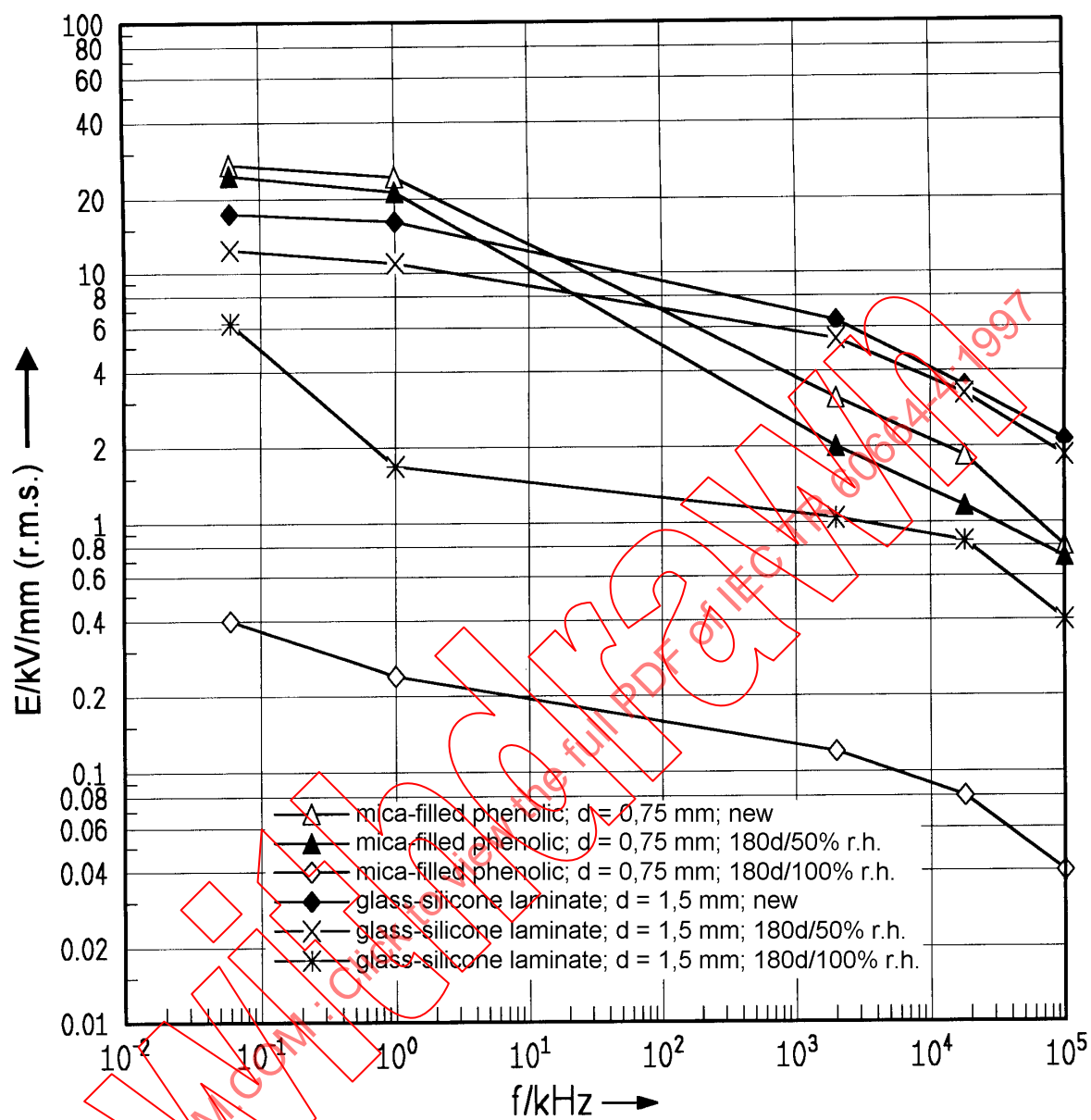


Figure 7 – Breakdown at high frequency, solid insulation; conditioning at 50 °C [9]

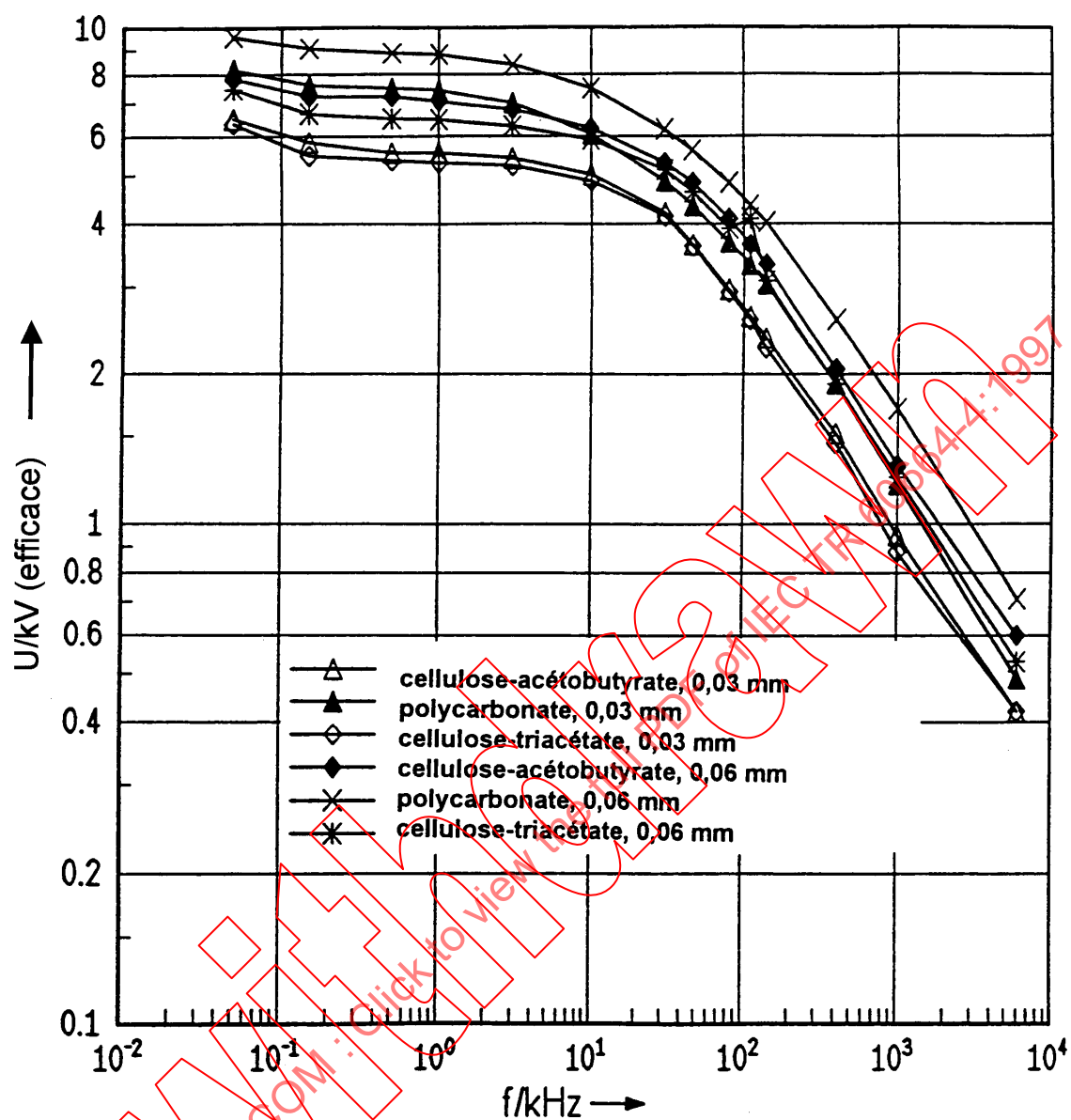


Figure 8 - Claquage à haute fréquence, films isolants [10]

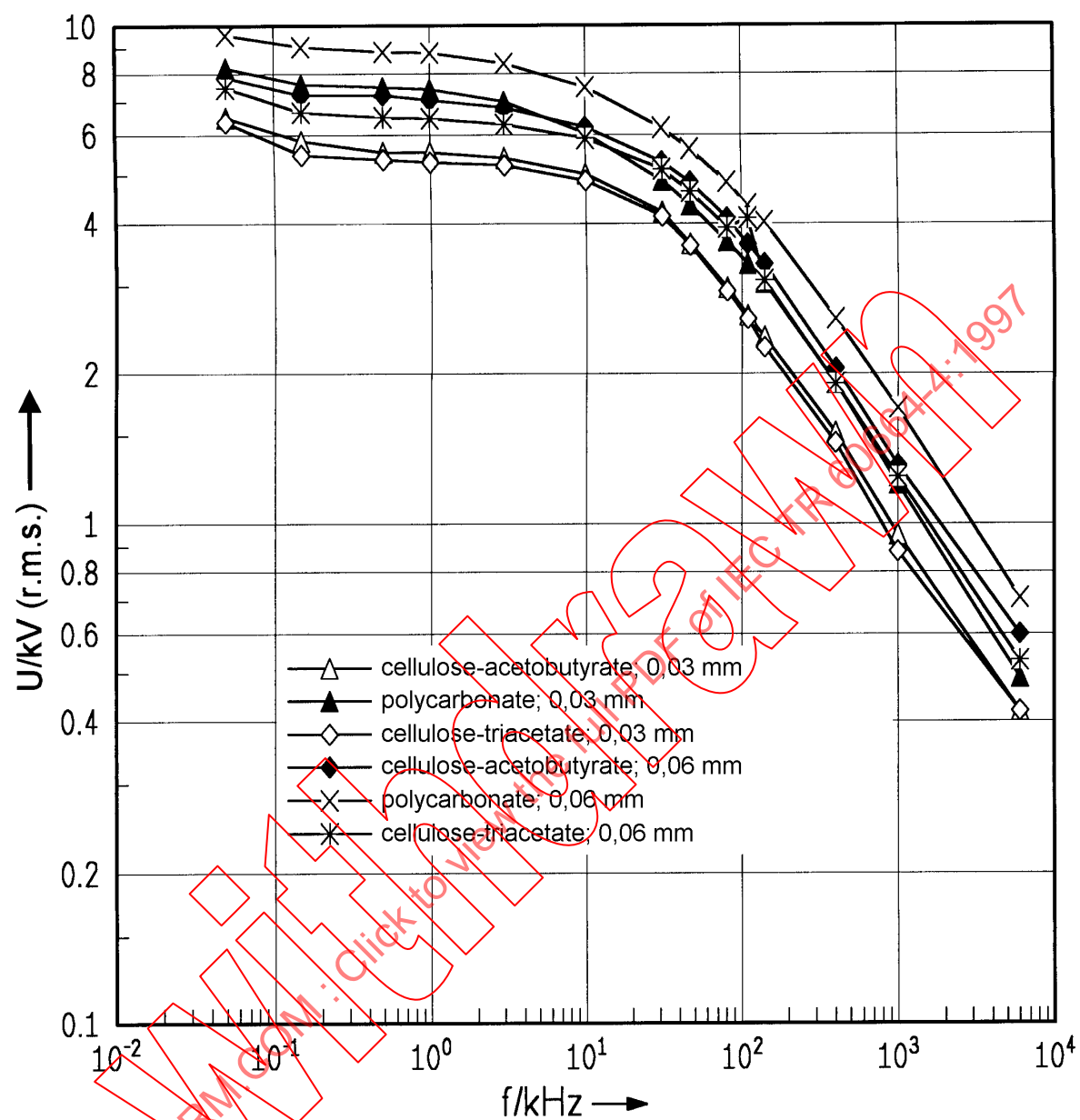


Figure 8 – Breakdown at high frequency, insulating films [10]

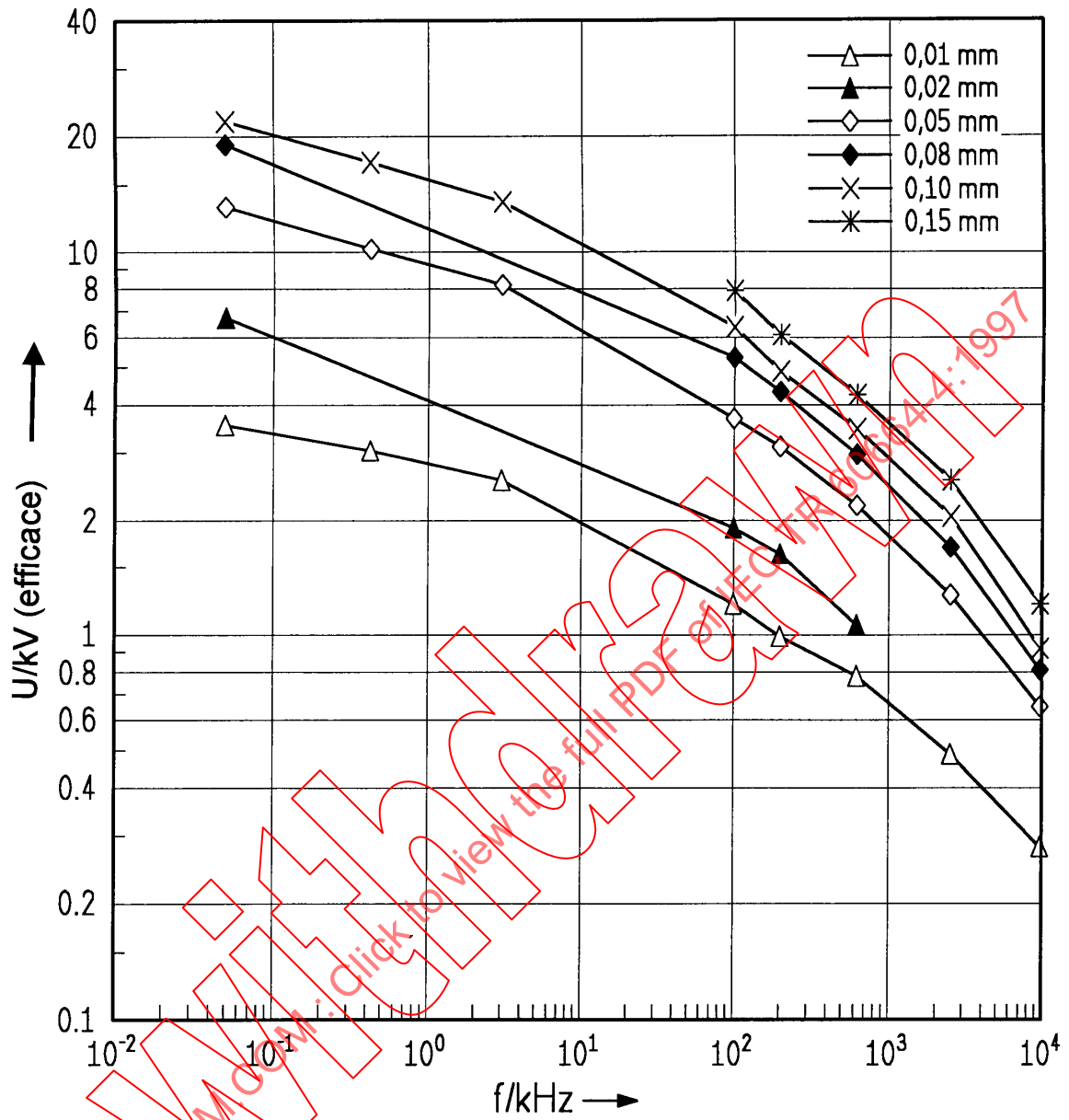


Figure 9 – Claquage à haute fréquence, films polystyrène à 20 °C [10]

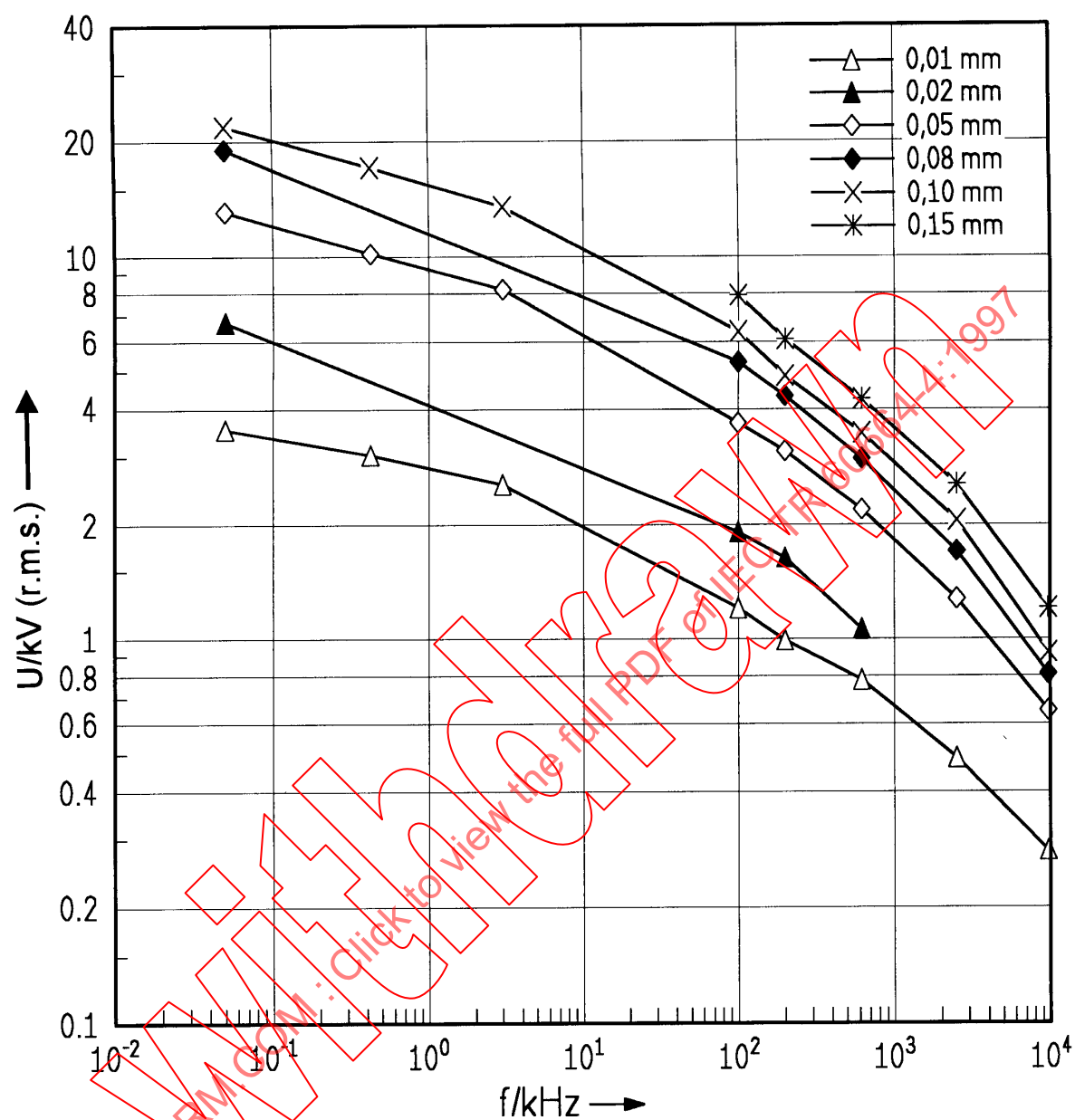


Figure 9 – Breakdown at high frequency, polystyrene film at 20 °C [10]

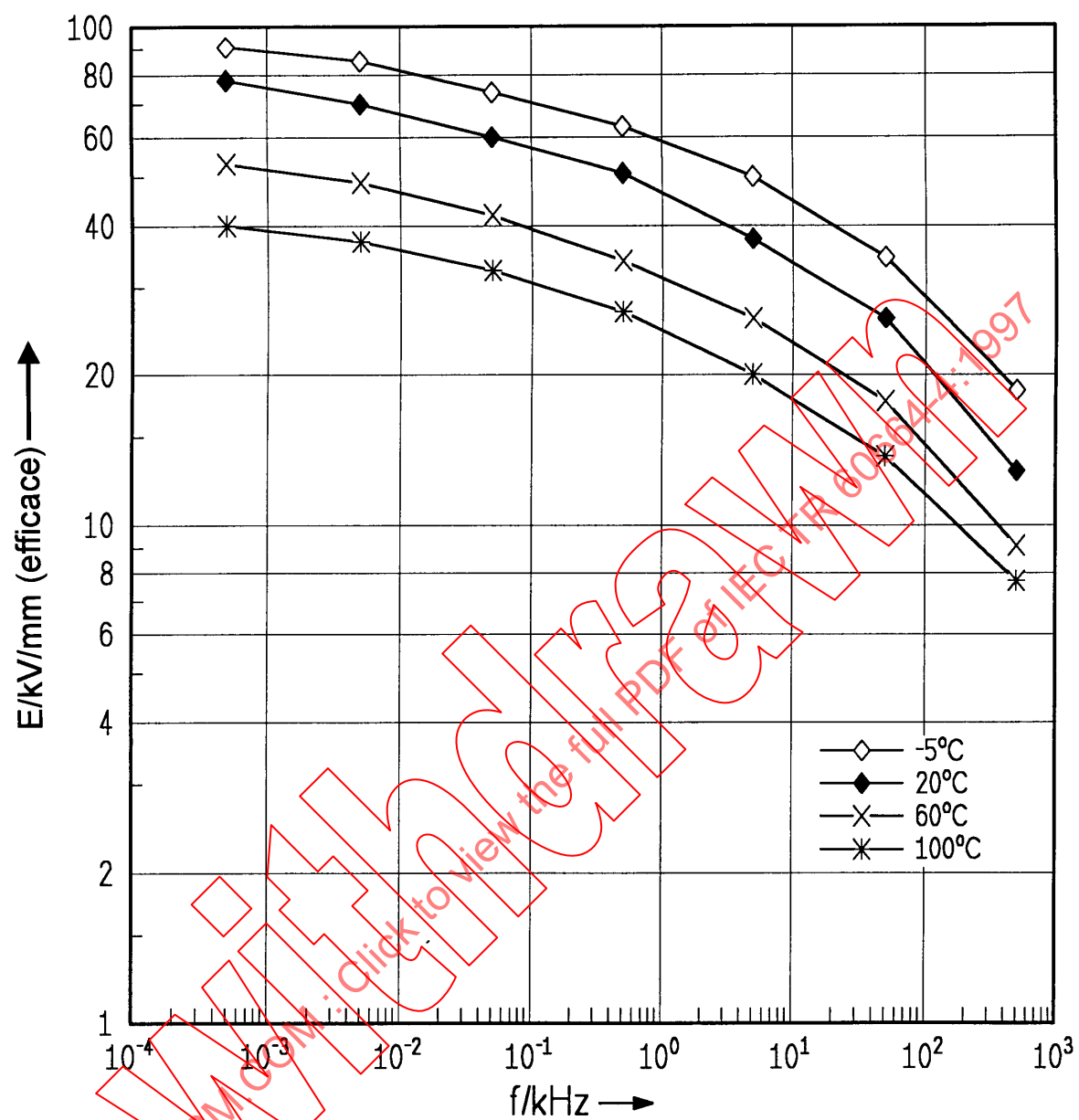


Figure 10 – Claquage à haute fréquence, papier stratifié (pertinax); température [11]

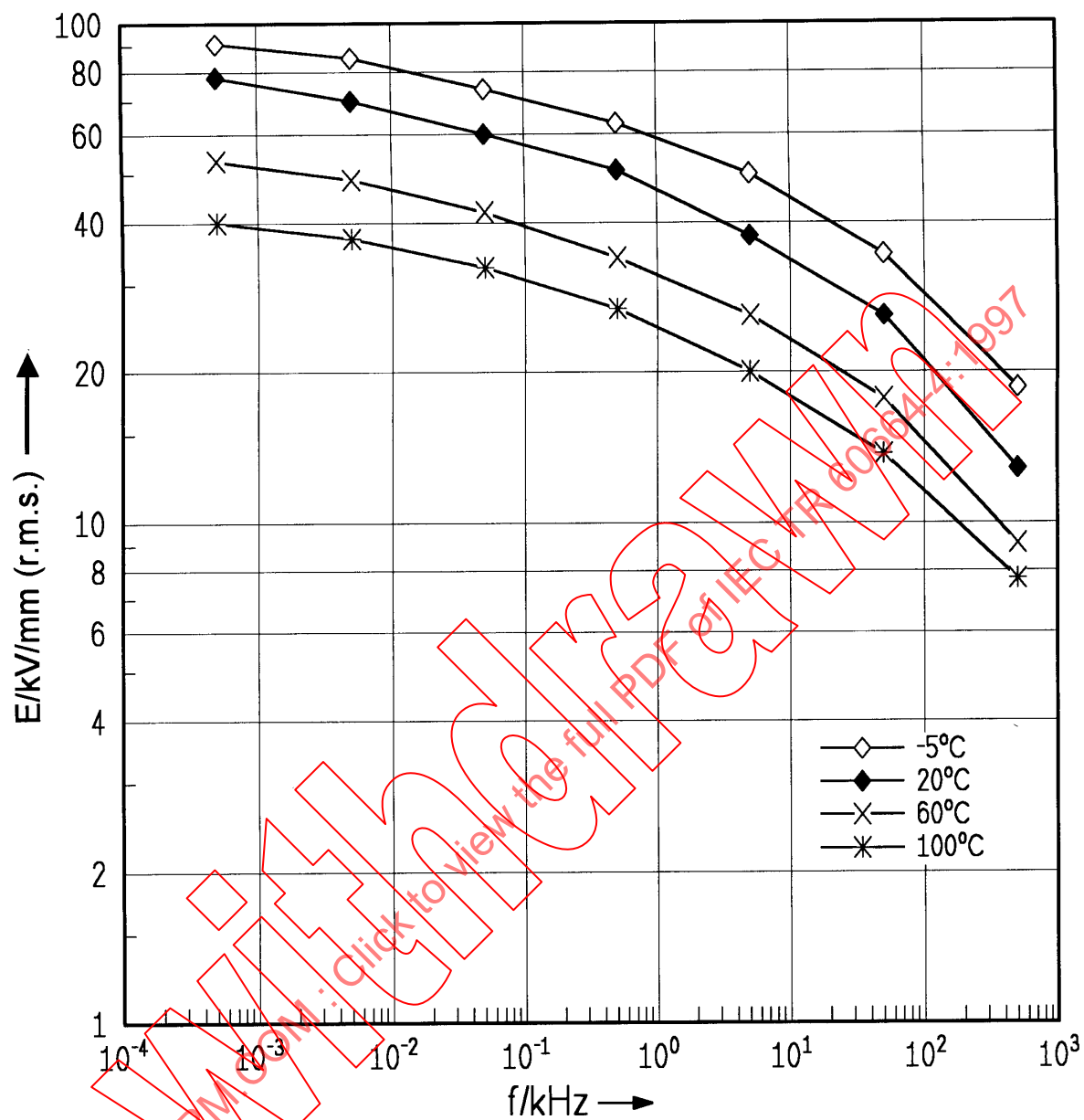


Figure 10 – Breakdown at high frequency, paper laminate (pertinax); temperature [11]

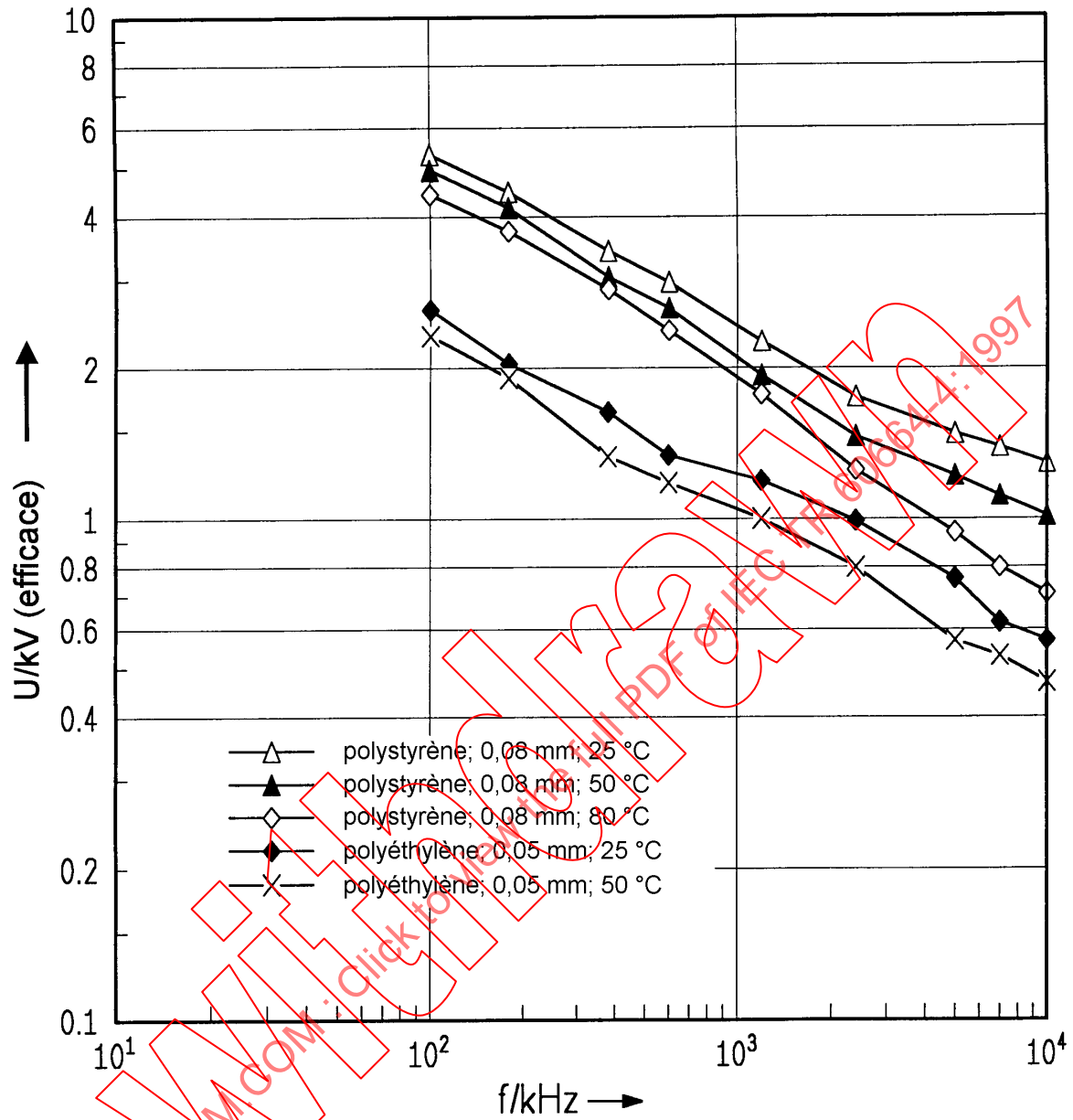


Figure 11 – Claquage à haute fréquence, films isolants; température [10]

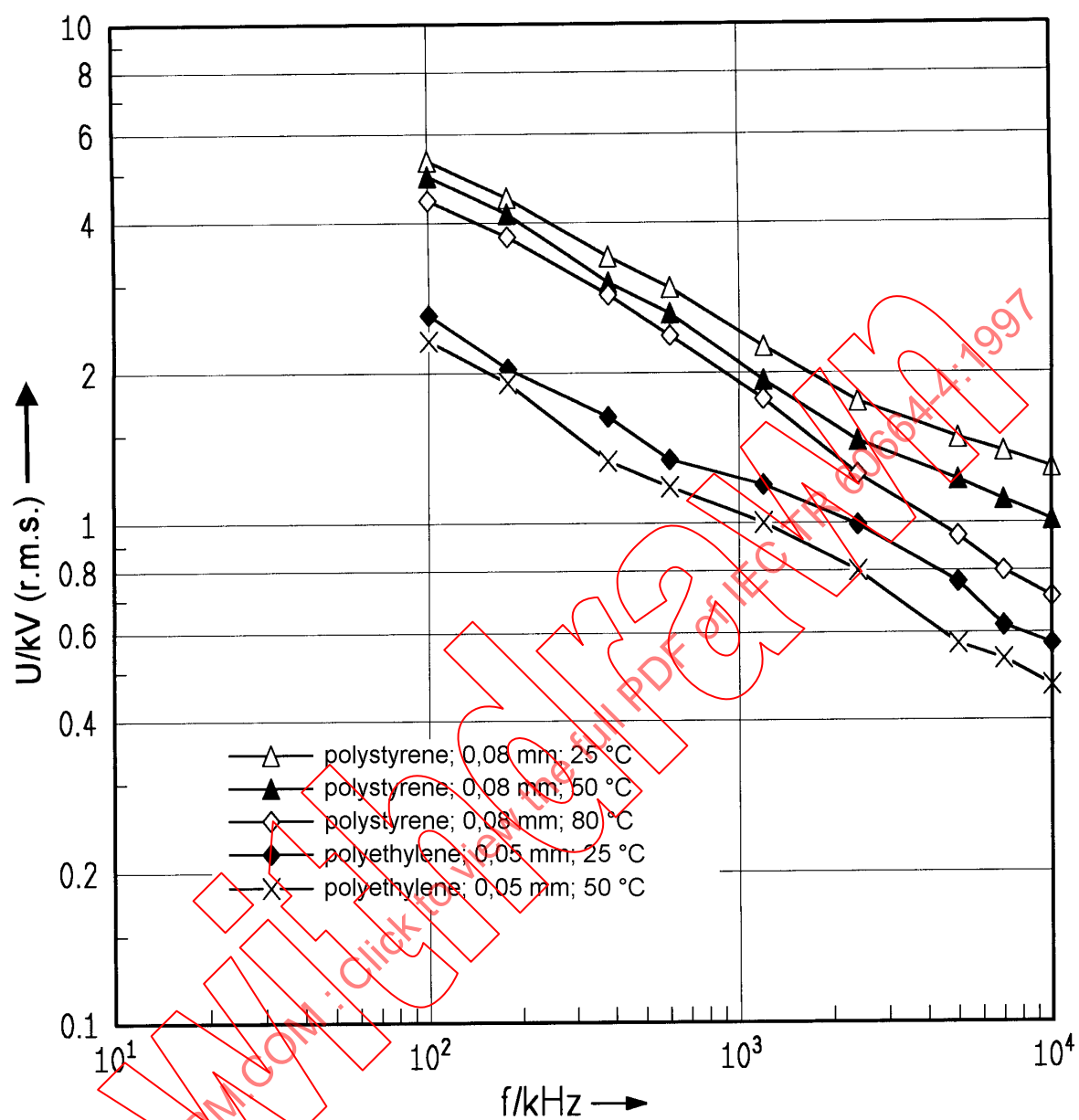
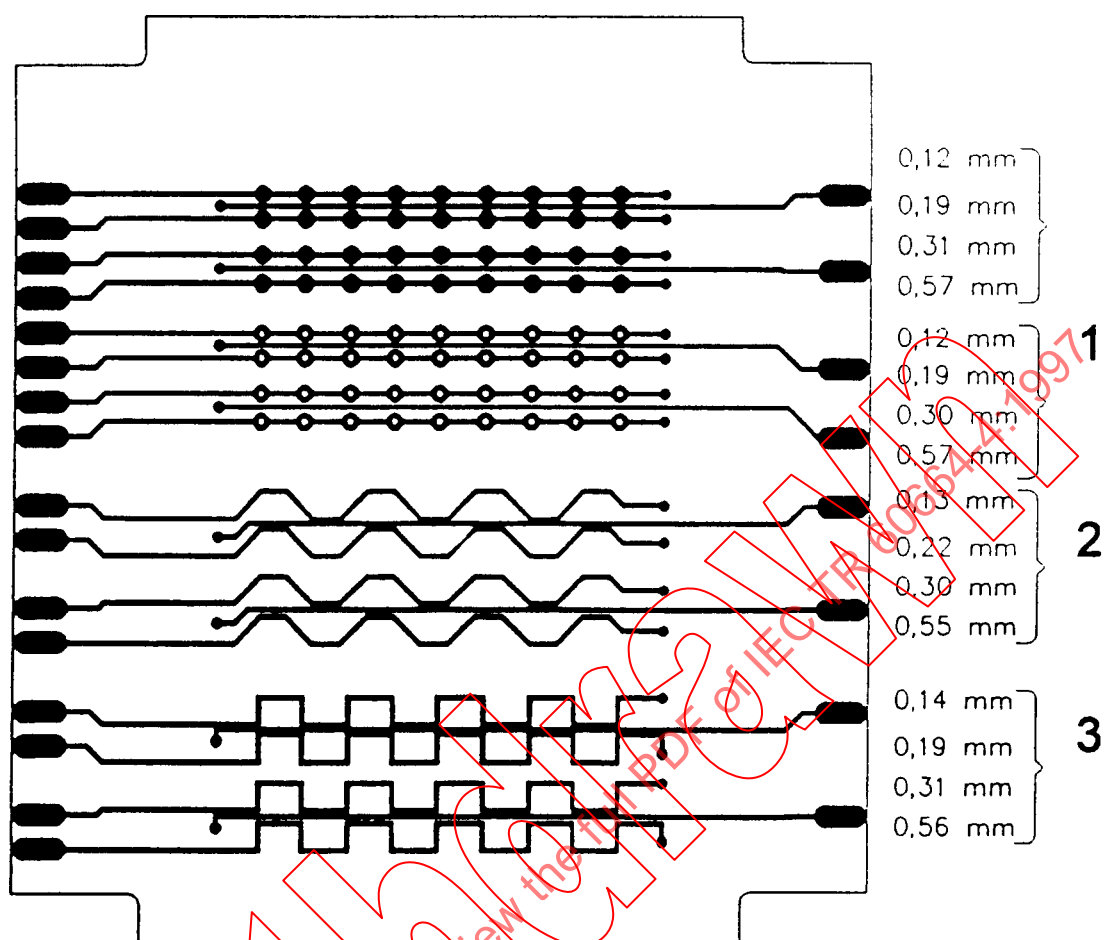


Figure 11 Breakdown at high frequency, insulating films; temperature [10]



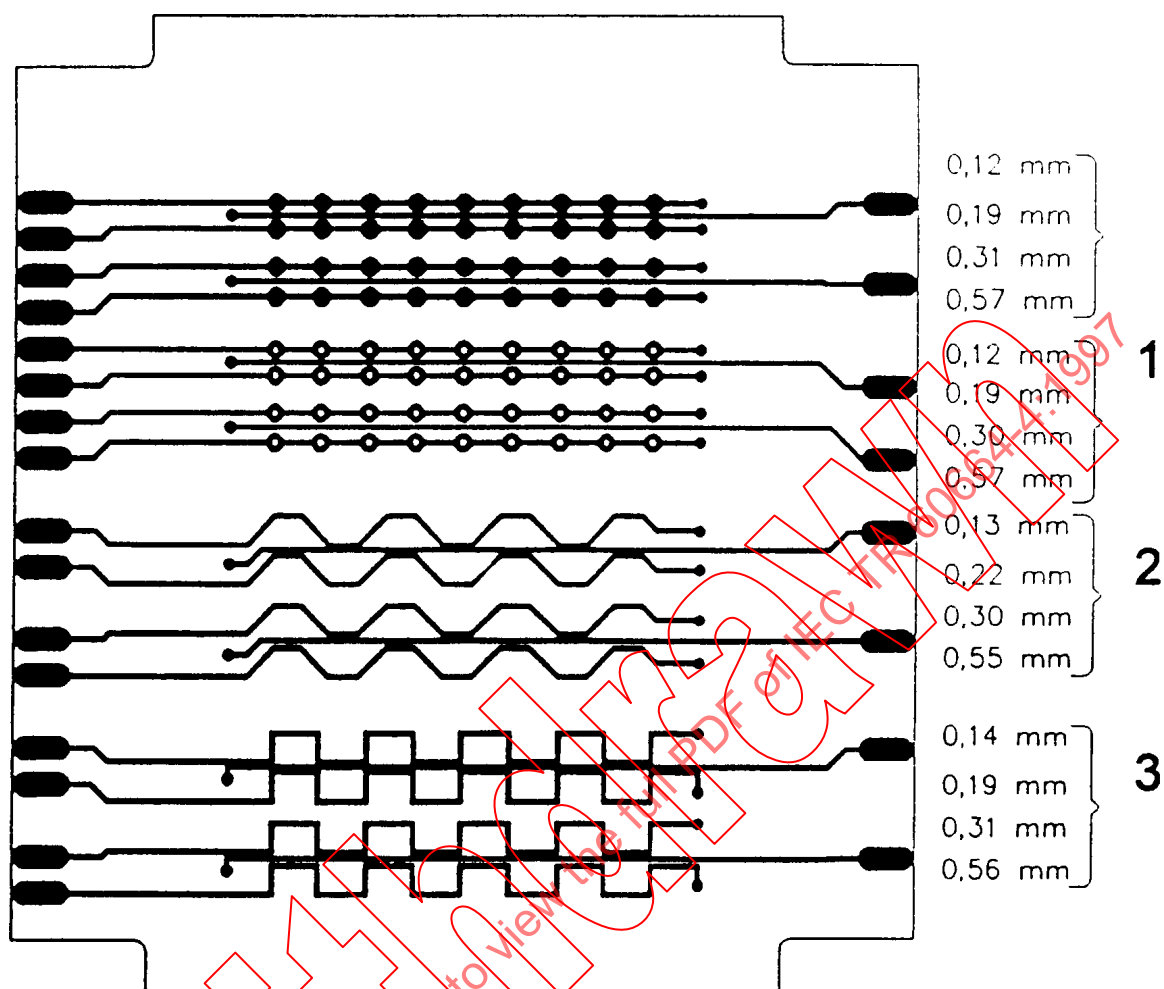
1 – trous (pour l'interconnexion des couches)

2 – conducteurs avec un angle de 45°

3 – conducteurs avec un angle de 90°

Les valeurs des distances sont les plus faibles mesurées entre deux conducteurs adjacents.

Figure 12 – Disposition de la carte d'essai



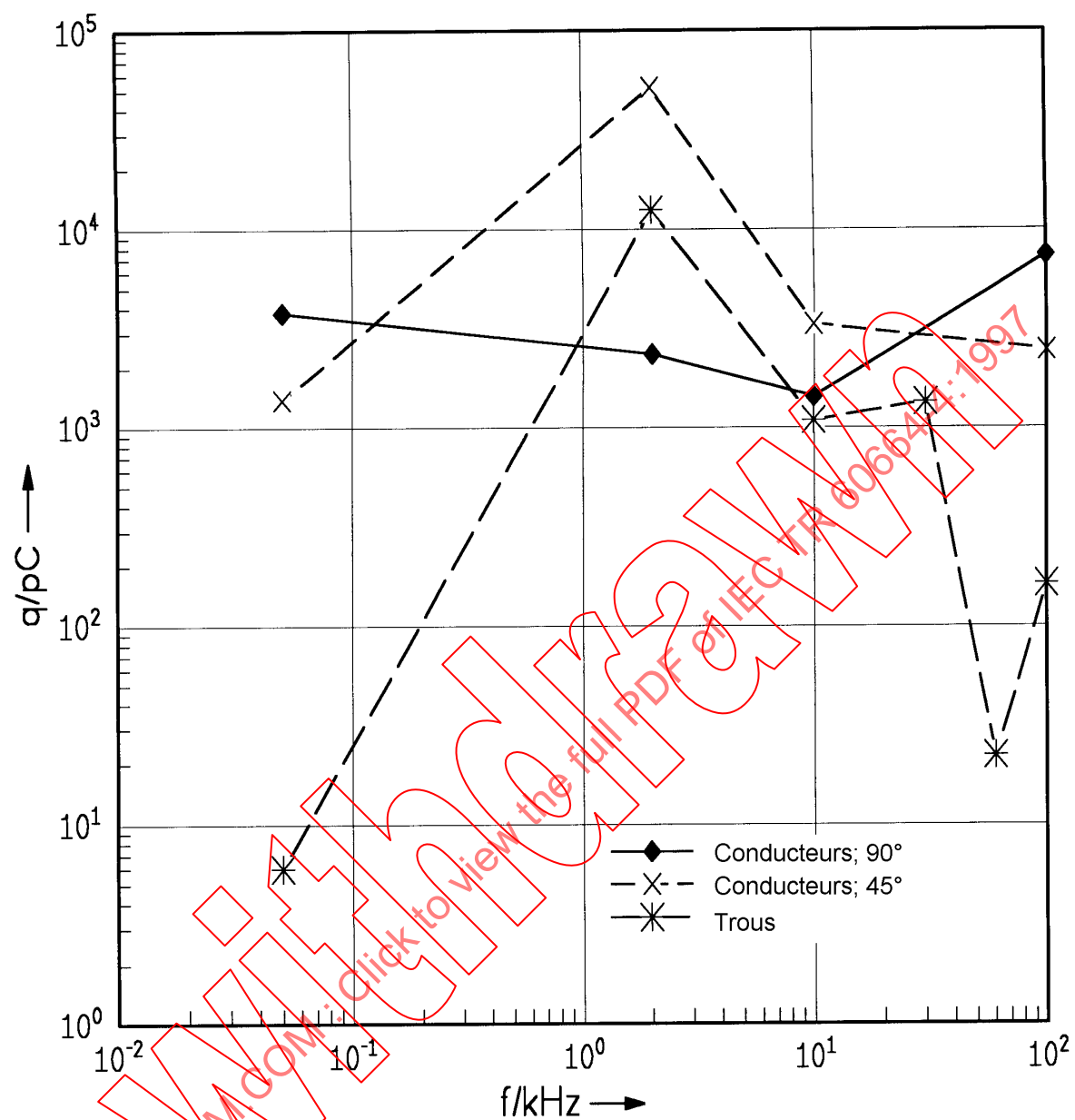
1 – through holes (interconnecting of layers)

2 – conductors 45°

3 – conductors 90°

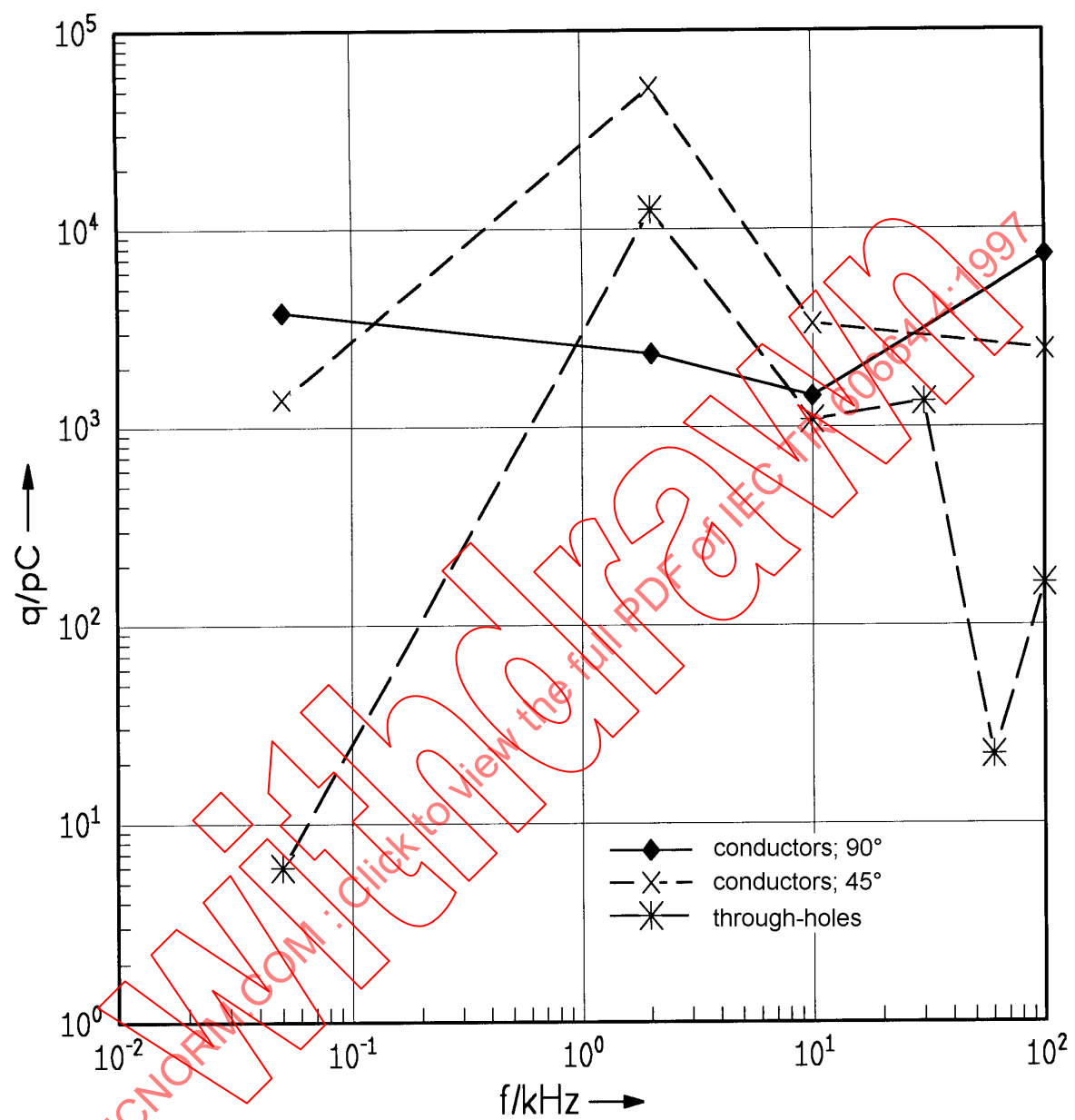
The distance values are the smallest ones between adjacent conductors actually being measured.

Figure 12 – Layout of the test board



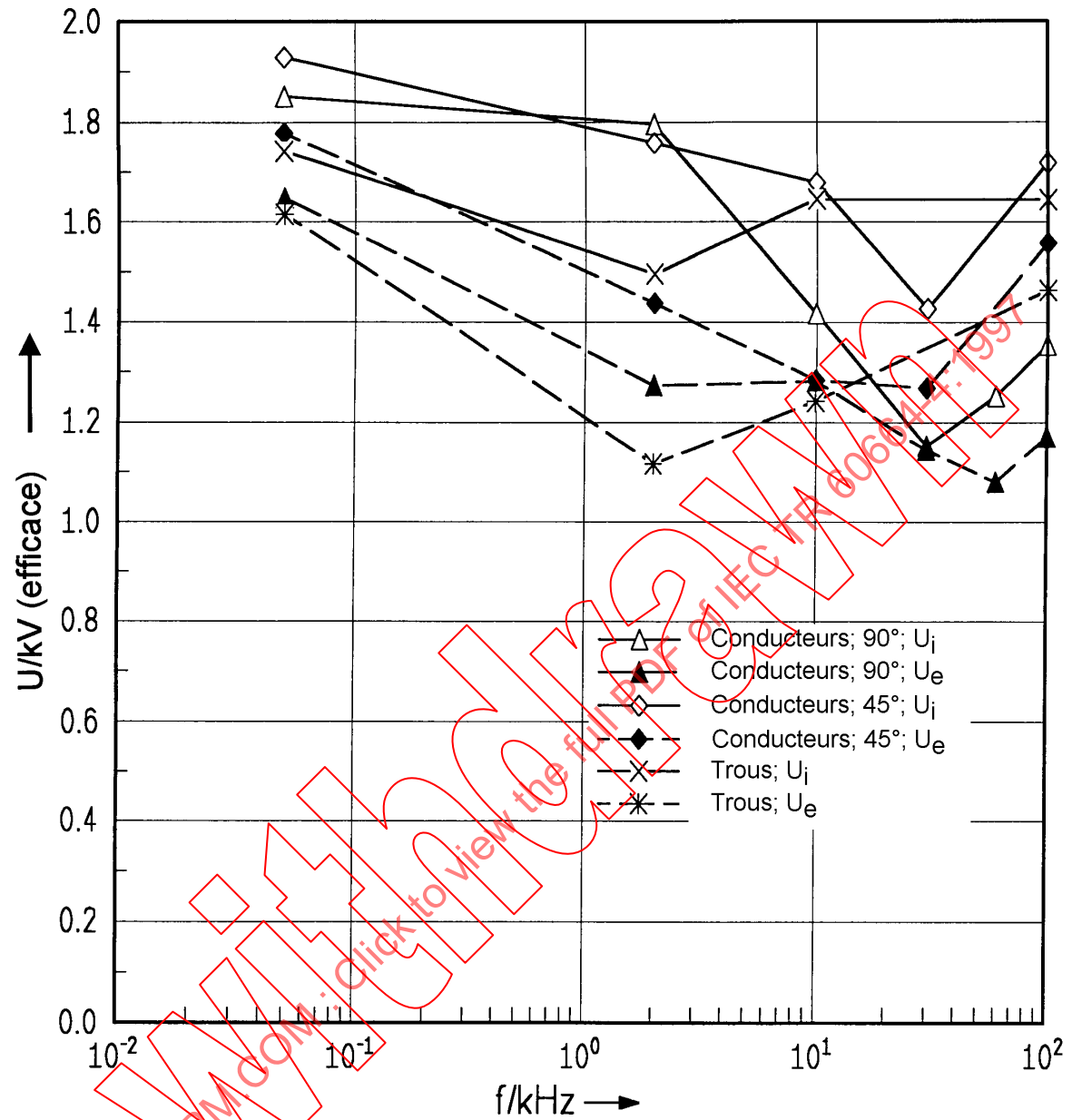
$d = 0,3 \text{ mm}$

Figure 13 – Décharge partielle à haute fréquence, circuit imprimé revêtu [15]



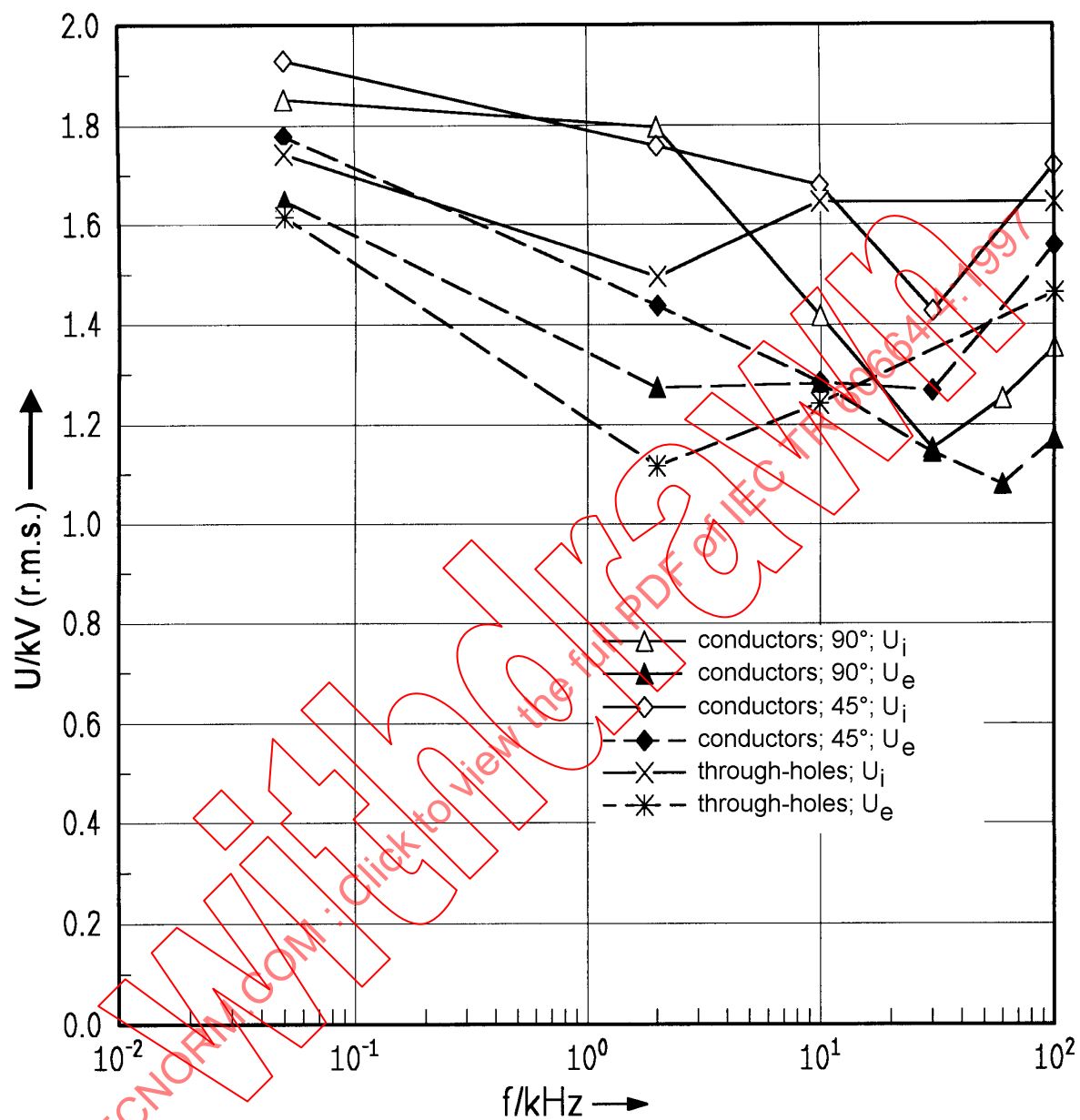
$d = 0,3 \text{ mm}$

Figure 13 – Partial discharge at high frequency, coated printed circuit board [15]



$d = 0,2 \text{ mm}$

Figure 14 – Décharge partielle à haute fréquence, circuit imprimé revêtu [15]



$d = 0,2 \text{ mm}$

Figure 14 – Partial discharge at high frequency, coated printed circuit board [15]

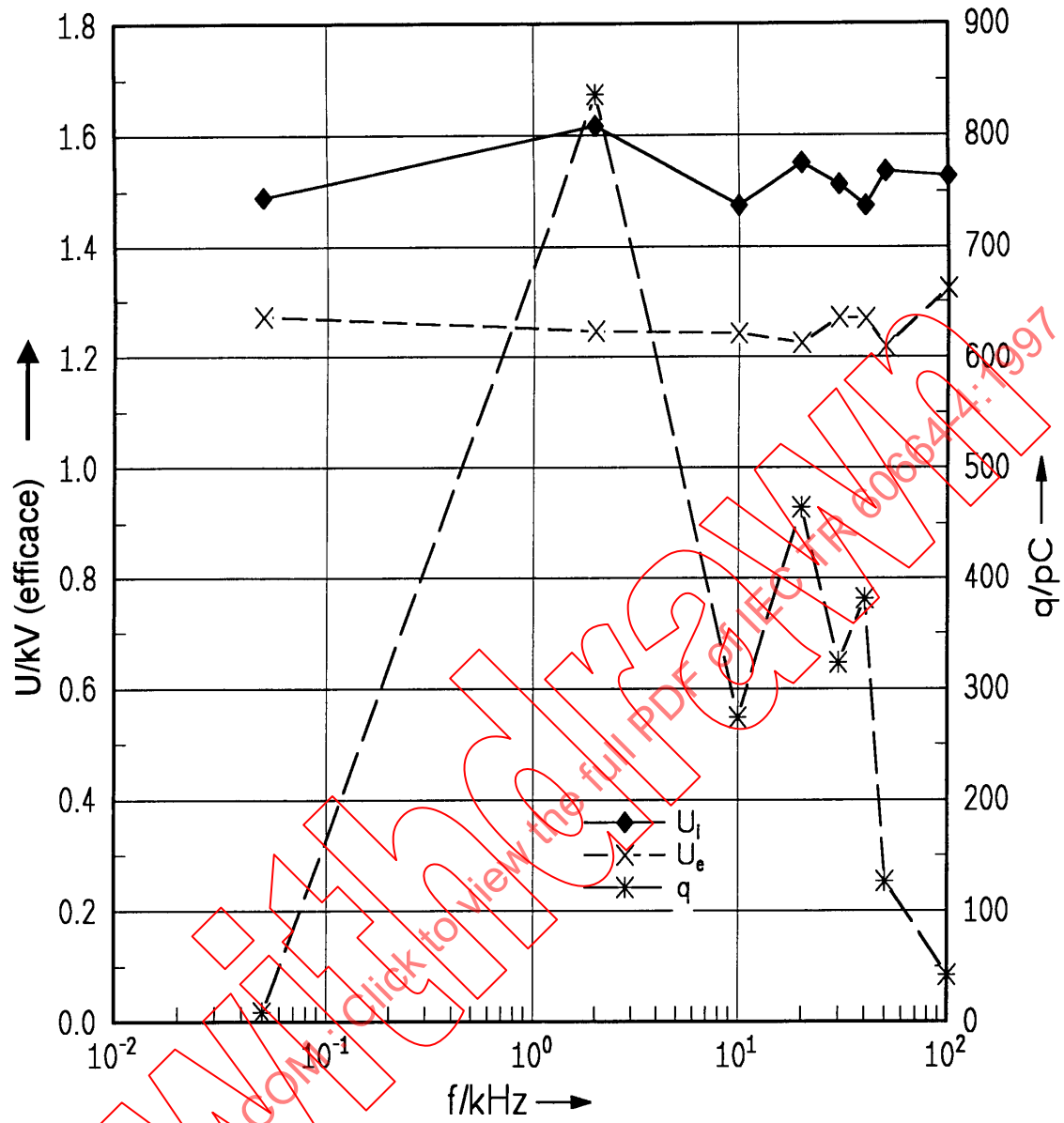


Figure 15 - Décharge partielle à haute fréquence, optocoupleur [15]

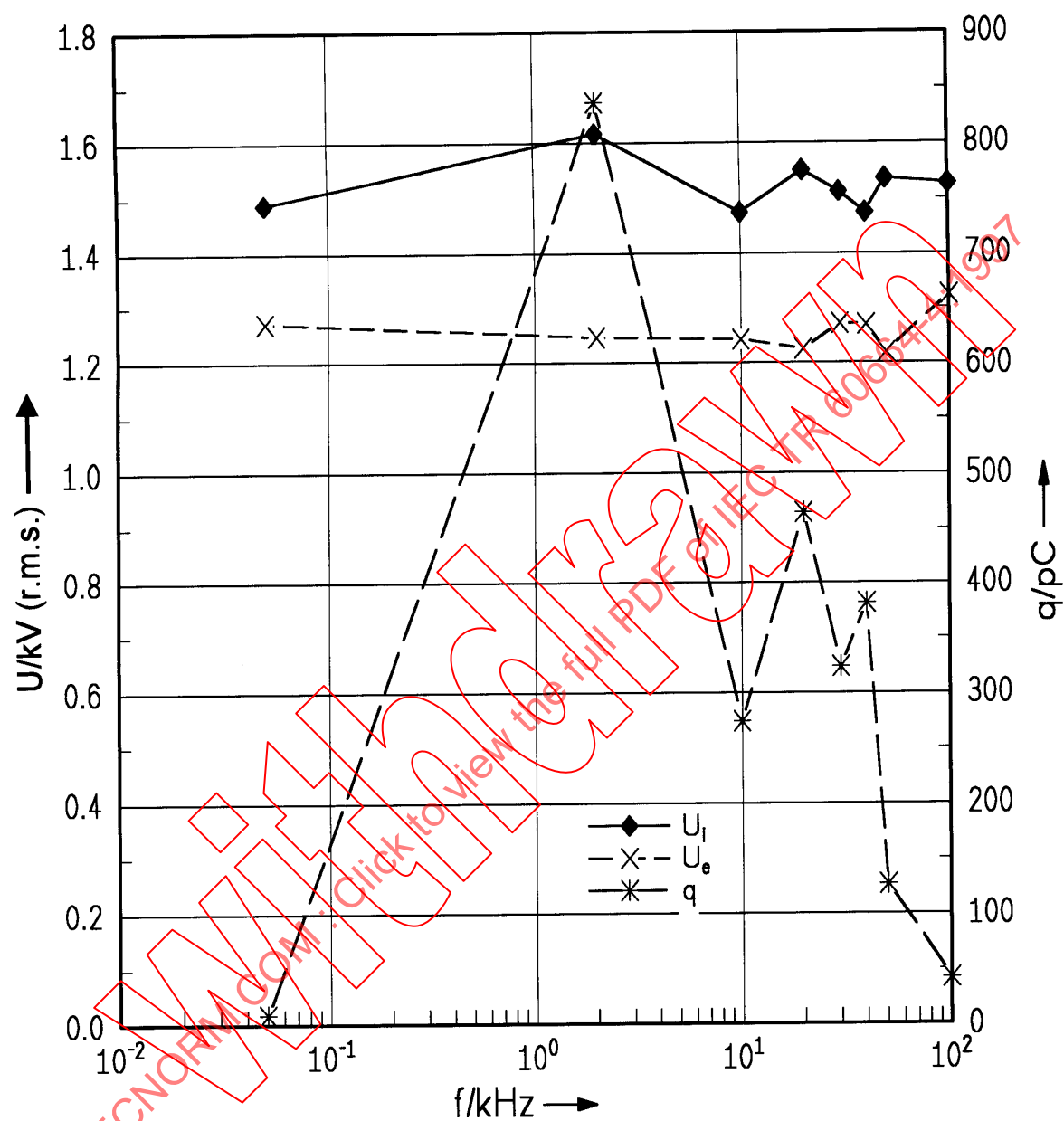


Figure 15 – Partial discharge at high frequency, optocoupler [15]

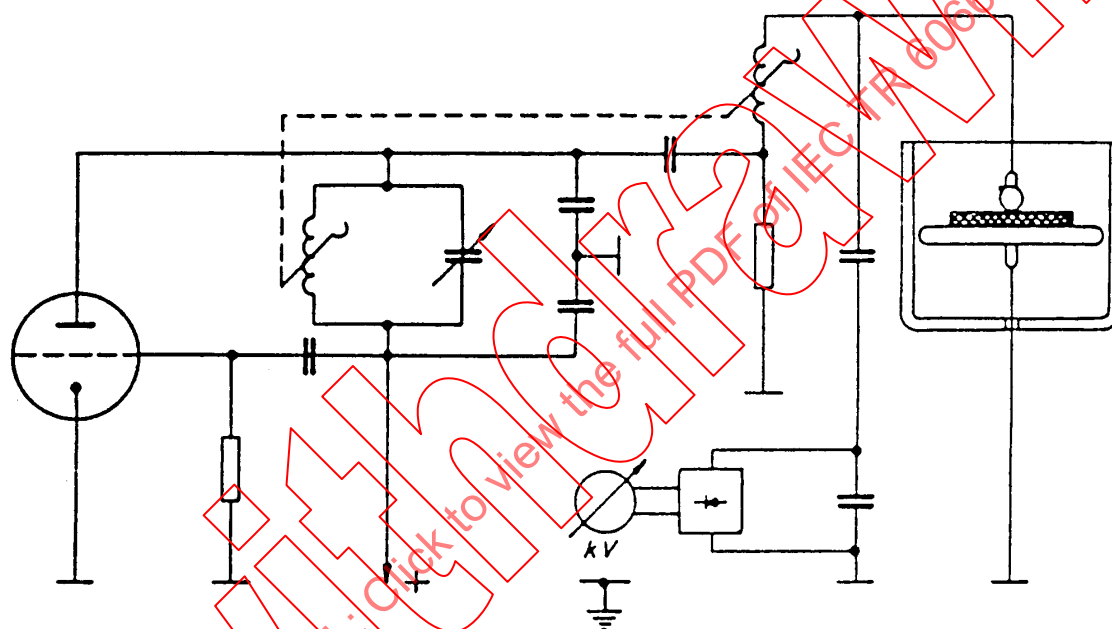


Figure 16 – Circuit de principe d'un oscillateur HF de puissance (circuit colpitt)