

**NORME  
INTERNATIONALE  
INTERNATIONAL  
STANDARD**

**CEI  
IEC**

**885-3**

Première édition  
First edition  
1988

---

---

**Méthodes d'essais électriques pour les câbles  
électriques**

**Troisième partie:**

Méthodes d'essais pour mesures de décharges  
partielles sur longueurs de câbles de puissance  
extrudés

**Electrical test methods for electric cables**

**Part 3:**

Test methods for partial discharge measurements  
on lengths of extruded power cable



Numéro de référence  
Reference number  
CEI/IEC 885-3: 1988

## 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 auprès du Bureau Central 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**  
Publié annuellement
- **Catalogue des publications de la CEI**  
Publié annuellement et mis à jour régulièrement

## Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 50: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI), qui se présente sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini. Des détails complets sur le VEI peuvent être obtenus sur demande. Voir également le dictionnaire multilingue de la CEI.

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit tirés du VEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

## Symboles graphiques et littéraux

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera:

- la CEI 27: *Symboles littéraux à utiliser en électro-technique;*
- la CEI 417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles;*
- la CEI 617: *Symboles graphiques pour schémas;*

et pour les appareils électromédicaux,

- la CEI 878: *Symboles graphiques pour équipements électriques en pratique médicale.*

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit tirés de la CEI 27, de la CEI 417, de la CEI 617 et/ou de la CEI 878, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

## 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.

## 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 from the IEC Central Office.

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**  
Published yearly
- **Catalogue of IEC publications**  
Published yearly with regular updates

## Terminology

For general terminology, readers are referred to IEC 50: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field. Full details of the IEV will be supplied on request. See also the IEC Multilingual Dictionary.

The terms and definitions contained in the present publication have either been taken from the IEV or have been specifically approved for the purpose of this publication.

## Graphical and letter symbols

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications:

- IEC 27: *Letter symbols to be used in electrical technology;*
- IEC 417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets;*
- IEC 617: *Graphical symbols for diagrams;*

and for medical electrical equipment,

- IEC 878: *Graphical symbols for electromedical equipment in medical practice.*

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC 27, IEC 417, IEC 617 and/or IEC 878, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

## 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.

NORME  
INTERNATIONALE

CEI  
IEC

INTERNATIONAL  
STANDARD

885-3

Première édition  
First edition  
1988

---

---

**Méthodes d'essais électriques pour les câbles  
électriques**

**Troisième partie:**

Méthodes d'essais pour mesures de décharges  
partielles sur longueurs de câbles de puissance  
extrudés

**Electrical test methods for electric cables**

**Part 3:**

Test methods for partial discharge measurements  
on lengths of extruded power cable

© CEI 1988 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

Bureau central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembe Genève Suisse

---

---



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
PRÉAMBULE . . . . .	4
PRÉFACE . . . . .	4
<b>SECTION UN — GÉNÉRALITÉS</b>	
Articles	
1.1 Domaine d'application . . . . .	6
1.2 Objet . . . . .	6
<b>SECTION DEUX — ESSAIS DE DÉCHARGES PARTIELLES</b>	
2.1 Définitions . . . . .	6
2.2 Appareillage d'essai . . . . .	6
2.2.1 Matériel . . . . .	6
2.2.2 Circuit d'essai et instruments . . . . .	6
2.2.3 Générateur à double impulsion . . . . .	8
2.2.4 Impédance terminale (impédance caractéristique) . . . . .	8
2.2.5 Suppresseur de réflexion . . . . .	8
2.3 Détermination des propriétés caractéristiques du circuit d'essai . . . . .	8
2.3.1 Superposition . . . . .	8
2.3.2 Impédance terminale . . . . .	8
2.3.3 Suppresseur de réflexion . . . . .	8
2.3.4 Charge d'étalonnage . . . . .	10
2.3.5 Sensibilité . . . . .	10
2.4 Méthodes de mesures . . . . .	12
2.4.1 Courtes longueurs de câble y compris les longueurs pour essai de type . . . . .	12
2.4.2 Grandes longueurs de câble sans impédance terminale . . . . .	12
2.4.3 Grandes longueurs de câble essayées avec une impédance terminale . . . . .	14
2.4.4 Grandes longueurs de câble essayées avec un suppresseur de réflexion . . . . .	16
2.5 Niveaux de tension/limites des décharges partielles . . . . .	16
2.6 Tracé des diagrammes de double impulsion . . . . .	16
2.7 Prescriptions pour l'impédance terminale . . . . .	18
<b>SECTION TROIS — GUIDE D'APPLICATION</b>	
3.1 Information de base . . . . .	22
3.1.1 Introduction . . . . .	22
3.1.2 Superposition et atténuation . . . . .	26
3.2 Procédures et paramètres . . . . .	28
3.2.1 Détermination des propriétés caractéristiques du circuit d'essai . . . . .	28
3.2.2 Méthodes de mesures . . . . .	32
3.3 Bibliographie . . . . .	38
Liste des symboles . . . . .	40
FIGURES . . . . .	41

## CONTENTS

	Page
FOREWORD .....	5
PREFACE .....	5
<b>SECTION ONE — GENERAL</b>	
Clause	
1.1 Scope .....	7
1.2 Object .....	7
<b>SECTION TWO — PARTIAL DISCHARGE TESTS</b>	
2.1 Definitions .....	7
2.2 Test apparatus .....	7
2.2.1 Equipment .....	7
2.2.2 Test circuit and instruments .....	7
2.2.3 Double pulse generator .....	9
2.2.4 Terminal impedance (characteristic impedance) .....	9
2.2.5 Reflection suppressor .....	9
2.3 Determination of characteristic properties of the test circuit .....	9
2.3.1 Superposition .....	9
2.3.2 Terminal impedance .....	9
2.3.3 Reflection suppressor .....	9
2.3.4 Calibration charge .....	11
2.3.5 Sensitivity .....	11
2.4 Measurement procedures .....	13
2.4.1 Short cable lengths including type test lengths .....	13
2.4.2 Long cable lengths tested without a terminal impedance .....	13
2.4.3 Long cable lengths tested with a terminal impedance .....	15
2.4.4 Long cable lengths tested with a reflection suppressor .....	17
2.5 Voltage levels/partial discharge limits .....	17
2.6 Plotting double pulse diagrams .....	17
2.7 Requirements for the terminal impedance .....	19
<b>SECTION THREE — APPLICATION GUIDE</b>	
3.1 Background information .....	23
3.1.1 Introduction .....	23
3.1.2 Superposition and attenuation .....	27
3.2 Procedures and parameters .....	29
3.2.1 Determination of characteristic properties of the test circuit .....	29
3.2.2 Measurement procedures .....	33
3.3 Bibliography .....	39
List of symbols .....	40
FIGURES .....	41

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MÉTHODES D'ESSAIS ÉLECTRIQUES POUR LES CÂBLES ÉLECTRIQUES

Troisième Partie: Méthodes d'essais pour mesures de décharges partielles sur longueurs de câbles de puissance extrudés

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

PRÉFACE

La présente norme a été établie par le Sous-Comité 20A: Câbles de haute tension, du Comité d'Etudes n° 20 de la CEI: Câbles électriques.

Elle constitue la troisième partie de la Publication 885 de la CEI.

Le texte de la présente norme est issu des documents suivants:

Règle des Six Mois	Rapport de vote
20A(BC)101	20A(BC)106

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

La publication suivante de la CEI est citée dans la présente norme:

Publication n° 270 (1981): Mesure des décharges partielles.

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**ELECTRICAL TEST METHODS FOR ELECTRIC CABLES****Part 3: Test methods for partial discharge measurements  
on lengths of extruded power cable**

## FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

## PREFACE

This standard has been prepared by IEC Sub-Committee 20A: High-voltage Cables, of IEC Technical Committee No. 20: Electric Cables.

It forms Part 3 of IEC Publication 885.

The text is based on the following documents:

Six Months' Rule	Report on Voting
20A(CO)101	20A(CO)106

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the Voting Report indicated in the above table.

*The following IEC publication is quoted in this standard:*

Publication No. 270 (1981): Partial discharge measurements.

# MÉTHODES D'ESSAIS ÉLECTRIQUES POUR LES CÂBLES ÉLECTRIQUES

## Troisième partie: Méthodes d'essais pour mesures de décharges partielles sur longueurs de câbles de puissance extrudés

### SECTION UN — GÉNÉRALITÉS

#### 1.1 Domaine d'application

La présente norme spécifie les prescriptions essentielles pour les mesures de décharges partielles sur des longueurs de câbles de puissance extrudés.

Il est fait référence à la Publication 270 de la CEI qui donne les techniques et considérations générales applicables aux mesures de décharges partielles. La première édition de la Publication 270 de la CEI a été publiée en 1968. Dans la présente norme, toutes les références s'appliquent à la deuxième édition (1981).

#### 1.2 Objet

L'objet de l'essai est de déterminer l'amplitude des décharges ou de vérifier que l'amplitude des décharges ne dépasse pas une valeur prescrite à une tension spécifiée pour une sensibilité donnée.

### SECTION DEUX — ESSAIS DE DÉCHARGES PARTIELLES

#### 2.1 Définitions

Les définitions données dans la Publication 270 de la CEI s'appliquent.

#### 2.2 Appareillage d'essai

##### 2.2.1 Matériel

Le matériel est constitué par une source haute tension ayant une puissance en kilovolt-ampères correspondant à la longueur du câble en essai, par un voltmètre haute tension, un circuit de mesure, un dispositif d'étalonnage de décharges, un générateur à double impulsion et, si nécessaire, une impédance terminale ou un suppresseur de réflexion. Tous les composants de l'appareillage d'essai doivent avoir un niveau de bruit suffisamment faible pour arriver à la sensibilité requise.

La fréquence de l'alimentation d'essai est supposée être celle du réseau de puissance a.c. 49 Hz à 61 Hz de forme sensiblement sinusoïdale, le rapport de la valeur de crête à la valeur efficace étant de  $\sqrt{2}$  avec une tolérance de  $\pm 7\%$ . Les principaux points considérés dans la présente norme, étalonnage et atténuation des impulsions de décharges partielles, ne sont pas affectés en utilisant des fréquences différentes de celle du réseau de puissance. Par contre, les caractéristiques des décharges partielles sont affectées par la fréquence d'essai et la méthode de mesure prend ce fait en considération.

##### 2.2.2 Circuit d'essai et instruments

Le circuit d'essai comprend l'objet en essai, le condensateur de couplage et le circuit de mesure. Le circuit de mesure comprend l'impédance de mesure (impédance d'entrée de l'instrument de mesure et l'unité d'entrée qui est choisie pour accorder l'impédance caractéristique du câble), le

## ELECTRICAL TEST METHODS FOR ELECTRICAL CABLES

### Part 3: Test methods for partial discharge measurements on lengths of extruded power cables

#### SECTION ONE - GENERAL

##### 1.1 Scope

This standard specifies the essential requirements for partial discharge measurements on lengths of extruded power cable.

Reference is made to IEC Publication 270 which gives the techniques and considerations applicable to partial discharge measurements in general. The first edition of IEC Publication 270 appeared in 1968. All references in this standard apply to the second edition (1981).

##### 1.2 Object

The object of the test is to determine the discharge magnitude, or to check that the discharge magnitude does not exceed a specified value, at a specified voltage with a given sensitivity.

#### SECTION TWO — PARTIAL DISCHARGE TESTS

##### 2.1 Definitions

The definitions given in IEC Publication 270 apply.

##### 2.2 Test apparatus

###### 2.2.1. *Equipment*

The equipment consists of a high-voltage power supply having a kilovolt-ampere capability adequate for the length of cable under test, a voltmeter for high voltages, a measuring circuit, a discharge calibrator, a double pulse generator and, if necessary, a terminal impedance or reflection suppressor. All components of the test equipment shall have a sufficiently low noise level to achieve the required sensitivity.

The frequency of the test supply is assumed to be the power frequency a.c. 49 Hz to 61 Hz of approximately sine-wave form, the ratio peak value/r.m.s. being equal to  $\sqrt{2}$  with a tolerance of  $\pm 7\%$ . The main subjects considered in this standard, calibration and attenuation of partial discharge pulses, are not affected by using different frequencies of the power supply. However, the partial discharge characteristics are affected by the test frequency; the measurement procedure should take this fact into consideration.

###### 2.2.2 *Test circuit and instruments*

The test circuit includes the test object, the coupling capacitor and the measuring circuit. The measuring circuit consists of the measuring impedance (input impedance of the measuring instrument and the input unit which is selected to match the cable impedance), the connecting lead and

conducteur de connexion et l'instrument de mesure. L'instrument de mesure ou détecteur comprend un dispositif d'amplification adapté, un oscilloscope et, si nécessaire, un instrument additionnel pour indiquer l'existence de décharges partielles et pour mesurer la charge apparente.

### 2.2.3 Générateur à double impulsion

Les propriétés du circuit d'essai pour les décharges partielles sont contrôlées au moyen d'un générateur à double impulsion, produisant deux impulsions égales (même charge apparente), séparées par un intervalle de temps variable de façon continue de 0,2  $\mu$ s à 100  $\mu$ s. Le temps de montée des impulsions ne doit pas excéder 20 ns (10% à 90% de la valeur de crête); le temps entre les valeurs 10% des temps de front et de queue ne doit pas excéder 150 ns. Les impulsions peuvent être synchronisées avec la fréquence du réseau.

### 2.2.4 Impédance terminale (impédance caractéristique)

Une impédance terminale égale à la valeur de l'impédance caractéristique de l'objet en essai peut être connectée à l'extrémité ouverte du câble éloignée du détecteur. Cela supprime la réflexion des impulsions à cette extrémité.

### 2.2.5 Suppresseur de réflexion

Pour éviter les effets de superposition lors des essais sans impédance terminale, un supprimeur de réflexion peut être utilisé. C'est un commutateur électronique qui, dans la plupart des cas, peut isoler l'entrée du détecteur des impulsions réfléchies en provenance de l'extrémité ouverte du câble. Cependant, quand la source de décharge partielle est située au niveau ou près de l'extrémité ouverte, certaines superpositions positives sont inévitables.

## 2.3 Détermination des propriétés caractéristiques du circuit d'essai

Les propriétés caractéristiques du circuit d'essai doivent être déterminées dans les conditions d'emploi. Les circuits d'essais normalement utilisés pour les connexions à une seule extrémité du câble sont ceux des figures 1, 2, 3, 4 et 5. Des circuits d'essais similaires sont aussi applicables quand les deux extrémités de l'âme du câble sont connectées ensemble. Ici les deux extrémités de l'écran doivent aussi être connectées ensemble.

### 2.3.1 Superposition

Si une impédance terminale n'est pas utilisée, il est nécessaire de déterminer les propriétés du circuit d'essai en tenant compte des superpositions des ondes progressives. Un générateur à double impulsion est connecté selon la figure 6 et un diagramme de double impulsion est tracé (voir paragraphe 2.6 et figures 7, 8 et 9). Ce contrôle doit être effectué au moins une fois par an et aussi sur demande, et lorsque n'importe quel composant important du circuit aura été réparé ou changé.

### 2.3.2 Impédance terminale

Si une impédance terminale est utilisée (voir figure 4) on démontre sa validité pour le type de câble en essai, en utilisant la procédure décrite au paragraphe 2.7. Ce contrôle est effectué au moins une fois par an, ainsi que sur demande, et lorsque n'importe quel composant important du circuit a été réparé ou changé.

### 2.3.3 Suppresseur de réflexion

L'utilisation de ce dispositif vise à obtenir un diagramme de double impulsion du type 1 correspondant à la figure 7. En utilisant le montage de la figure 10, on vérifie l'efficacité du supprimeur de réflexion au moins une fois par an, ainsi que sur demande, et lorsque n'importe quel composant du circuit a été réparé ou changé.

the measuring instrument. The measuring instrument or detector includes a suitable amplifying device, an oscilloscope and, if desired, an additional instrument to indicate the existence of partial discharges and to measure the apparent charge.

### 2.2.3 *Double pulse generator*

The properties of the partial discharge test circuit shall be checked by means of a double pulse generator, producing two equal pulses (same apparent charge) following each other within a continuously variable time interval of 0.2  $\mu$ s to 100  $\mu$ s. The rise time of the pulses shall not exceed 20 ns (10% to 90% of peak value); the time between 10% values of the front and the tail shall not exceed 150 ns. The pulses may be synchronized with the power frequency.

### 2.2.4 *Terminal impedance (characteristic impedance)*

A terminal impedance equal in value to the characteristic impedance of the test object may be connected to the open end of the cable remote from the detector. This will suppress the reflection of pulses at this end.

### 2.2.5 *Reflection suppressor*

To avoid superposition effects when testing without a terminal impedance, a reflection suppressor may be used. This is an electronic switch which in most cases can block the input of the detector from pulses reflected from the open end of the cable. However, when the partial discharge source is located at or near the open end some positive superposition is unavoidable.

## 2.3 **Determination of characteristic properties of the test circuit**

The characteristic properties of the test circuit should be determined under the conditions to be used. The test circuits normally used for connections to a single cable end are those shown in Figures 1, 2, 3, 4 and 5. Similar test circuits are also applicable when both ends of the cable conductor are connected together. Here the two ends of the screen must also be connected together.

### 2.3.1 *Superposition*

If a terminal impedance is not used it is necessary to determine the properties of the test circuit with respect to superposition of travelling waves. A double pulse generator is connected according to Figure 6 and a double pulse diagram is plotted (see Clause 2.6 and Figures 7, 8 and 9). This check should be carried out at least once a year and also upon request and when any significant circuit component has been repaired or changed.

### 2.3.2 *Terminal impedance*

If a terminal impedance is used (see Figure 4) its suitability for the type of cable under test should be demonstrated using the procedure described in Sub-clause 2.7. This check should be carried out at least once a year and also upon request and when any significant circuit component has been repaired or changed.

### 2.3.3 *Reflection suppressor*

The purpose of using this device is to obtain a double pulse diagram of Type 1 corresponding to Figure 7. Using the arrangement shown in Figure 10, the efficiency of the reflection suppressor should be checked at least once per year and also upon request and when any significant circuit component has been repaired or changed.

### 2.3.4 Charge d'étalonnage

La méthode d'étalonnage par «transfert de charge» est utilisée conformément au paragraphe 5.2.1. de la Publication 270 de la CEI. Des informations plus complètes sur l'utilisation des dispositifs d'étalonnage de décharge sont données dans le rapport CIGRÉ 1968 21-01, Annexe III. Dans cette méthode, un dispositif d'étalonnage est connecté directement à une extrémité du câble en essai pour injecter de courtes impulsions de courant des charges d'amplitude prédéterminées dans l'objet en essai comme indiqué au paragraphe 2.4. L'impulsion résultante devra avoir une hauteur d'au moins 10 mm sur l'oscilloscope.

A moins que le condensateur d'étalonnage ne soit dimensionné pour être utilisé aux tensions d'essai mises en jeu, il est nécessaire que le circuit d'étalonnage soit déconnecté avant que le transformateur d'essai haute tension soit mis sous tension. Le gain de l'amplificateur n'est pas réajusté après cette opération à moins que l'on ne dispose d'un moyen pour un affichage permanent d'un signal d'étalonnage convenable pendant toute la durée de l'essai.

Un tel moyen peut être obtenu comme suit:

- a) le condensateur d'étalonnage peut être dimensionné pour la pleine tension et faire partie du circuit d'essai. Il n'a pas besoin, dans ce cas, d'être déconnecté avant que le transformateur haute tension soit mis sous tension, ou
- b) un dispositif d'étalonnage secondaire peut être utilisé additionnellement. Ce dispositif est connecté à l'entrée du détecteur. Dans ce cas, l'amplitude de la réponse de l'impulsion secondaire est préétalonnée sur le circuit primaire d'étalonnage avant que ce dernier circuit soit déconnecté et que le transformateur d'essai haute tension soit mis sous tension selon le rapport CIGRÉ 1968-21-01, Annexe III, Section I, paragraphe 1.2.

La décharge d'étalonnage  $q_{cal}$  (en picocoulombs), est égale au produit de l'amplitude de l'impulsion d'étalonnage  $\Delta U$  (en volts) par la capacité d'étalonnage  $C_{cal}$  (en picofarads), du dispositif d'étalonnage pour autant que cette capacité soit petite par rapport à la capacité de l'objet en essai  $C_x$ .

$$q_{cal} = C_{cal} \cdot \Delta U$$

Les caractéristiques de l'impulsion d'étalonnage doivent satisfaire aux paragraphes 5.2 et 5.3 de la Publication 270 de la CEI et au rapport CIGRÉ 1968-21-01, Annexe III, Section III. Pour les grandes longueurs de câble, il existe une prescription complémentaire précisant que la capacité d'étalonnage ne doit pas être supérieure à 150 pF.

Le facteur d'échelle de l'appareil de mesure,  $k$ , est le facteur par lequel la lecture sur l'appareil est multipliée de façon à obtenir la grandeur de la quantité de décharge injectée dans l'objet en essai pendant son étalonnage. Sa valeur doit être en accord avec le paragraphe 5.2 de la Publication 270 de la CEI.

### 2.3.5 Sensibilité

- a) La sensibilité du circuit d'essai (avec l'alimentation haute tension et les appareils de mesure) est définie comme l'impulsion de décharge minimale détectable,  $q_{min}$ , (en picocoulombs) qui peut être observée en présence de bruit de fond. Les impulsions d'interférences individuelles clairement identifiables peuvent ne pas être prises en compte. Un affichage à l'oscilloscope est nécessaire pour identifier les niveaux de signal bruit puisqu'un picocoulombmètre ne peut identifier la source du signal indiqué. De façon à être détectable, une impulsion de décharge doit être au moins égale à deux fois la hauteur du bruit apparent,  $h_n$  ( $h_n$  est la lecture du bruit sur l'oscilloscope ou sur le picocoulombmètre si celui-ci est utilisé additionnellement).

Donc:

$$q_{min} = 2k \cdot h_n$$

où  $k$  est le facteur d'échelle

- b) Les valeurs de sensibilité sont choisies conformément au paragraphe 2.5.

### 2.3.4 Calibration charge

The "charge transfer" method of calibration shall be used in accordance with Sub-clause 5.2.1 of IEC Publication 270. Further guidance for the use of discharge calibrators is given in CIGRÉ Report 1968-21-01, Appendix III. In this method, a calibrator is connected directly across one end of the cable being tested to inject short current pulses of predetermined charge magnitude into the test object as detailed in Sub-clause 2.4. The resulting pulse on the oscilloscope should have a height of at least 10 mm.

Unless the calibrating capacitor is rated for use at the test voltages involved, it is necessary to disconnect it before the high-voltage test transformer is energized. The amplifier gain shall not be re-adjusted after this has been done, unless a means is provided for continuous display of a suitable calibrating signal throughout the test.

Such a means may be as follows:

- a) the calibrating capacitor may be full voltage rated and may form part of the test circuit. It need not, in this case, be disconnected before the high-voltage test transformer is energized, or
- b) a secondary calibrator can be used additionally. This calibrator is connected to the input of the detector. In this case, the amplitude of the secondary pulse response shall be pre-calibrated against the primary calibrator before the latter is disconnected and the high-voltage test transformer is energized in accordance with CIGRÉ Report 1968-21-01, Appendix III, Section I, Sub-clause 1.2.

The calibration discharge,  $q_{\text{cal}}$  (in picocoulombs), is equal to the product of the calibration pulse amplitude  $\Delta U$  (in volts) and the calibrating capacitance  $C_{\text{cal}}$  (in picofarads), of the calibrator as long as this capacitance is small compared with the capacitance of the test object,  $C_x$ .

$$q_{\text{cal}} = C_{\text{cal}} \cdot \Delta U$$

The characteristics of the calibrating pulse shall comply with Sub-clauses 5.2 and 5.3 of IEC Publication 270 and CIGRÉ Report 1968-21-01, Appendix III, Section III. For long lengths of cable there is an additional requirement that the calibrating capacitance shall be not larger than 150 pF.

The scale factor of the measuring instrument,  $k$ , is the factor by which the reading of the instrument shall be multiplied in order to obtain the magnitude of the discharge quantity injected into the test object during calibration. Its consistency shall comply with Sub-clause 5.2 of IEC Publication 270.

### 2.3.5 Sensitivity

- a) The sensitivity of the test circuit (with the high-voltage supply and the instruments) is defined as the minimum detectable discharge pulse,  $q_{\text{min}}$ , (in picocoulombs) that can be observed in the presence of background noise. Individual, clearly identifiable interference pulses may be disregarded. An oscilloscope display is required to monitor noise signal levels since a picocoulomb meter does not identify the source of the signal indicated. In order to be detectable, a discharge pulse shall be of at least twice the apparent noise height,  $h_n$  ( $h_n$  is the noise reading on the oscilloscope or the picocoulomb meter if this is used additionally).

Therefore:

$$q_{\text{min}} = 2k \cdot h_n$$

where  $k$  is the scale factor.

- b) The values of sensitivity shall be selected according to Sub-clause 2.5.

## 2.4 Méthodes de mesures

Les essais sont effectués comme essais de type, sur des échantillons de câble courts, et comme essais individuels, sur des longueurs de production.

Le choix du circuit d'essai diffère selon que l'échantillon de câble est considéré comme court (paragraphe 2.4.1) ou comme une grande longueur (paragraphe 2.4.2, 2.4.3 et 2.4.4) en fonction du diagramme de double impulsion (paragraphe 2.6). Le circuit d'essai doit être exempt de décharge pour atteindre la sensibilité requise (voir paragraphe 2.3.5). L'étalonnage ne doit pas nécessairement avoir été fait avec l'alimentation HT connectée (voir paragraphe 2.3.4).

### 2.4.1 Courtes longueurs de câble y compris les longueurs pour essai de type

#### a) Prescriptions

Les câbles de courtes longueurs peuvent être assimilés à une capacité localisée. La limitation en longueur à partir de laquelle cela n'est plus acceptable dépend du circuit d'essai utilisé. La valeur réelle est déterminée en utilisant le diagramme de double impulsion décrit au paragraphe 2.6 et définie comme  $l_k$ .

*Note.* — Cependant, les longueurs jusqu'à  $2 l_k$  sont considérées comme longueurs courtes lorsque les deux extrémités du câble sont connectées ensemble. (Voir paragraphe 2.3.)

Les circuits d'essai normalement utilisés sont ceux des figures 1, 2 et 3.

#### b) Vérification de la sensibilité

Le dispositif d'étalonnage est connecté en parallèle avec le câble et seulement à l'extrémité éloignée du détecteur. La charge d'étalonnage  $q_{cal}$ , est injectée et la valeur de la déviation obtenue mesurée,  $a_2$ , est utilisée pour calculer le facteur d'échelle  $k_2 = q_{cal}/a_2$  (pC/mm) et la sensibilité  $q_{min}$  (pC).

$$q_{min} = 2k_2 \cdot h_n$$

où:

$h_n$  est la déviation (mm) produite par l'interférence du bruit de fond

#### c) Méthode d'essai

La mesure est effectuée seulement à une extrémité du câble. Pour une déviation  $A$  (mm) mesurée, la valeur de la décharge  $q$  (pC) est

$$q = k_2 \cdot A$$

Les niveaux de tension utilisés sont déterminés conformément au paragraphe 2.5.

### 2.4.2 Grandes longueurs de câble sans impédance terminale

#### a) Prescriptions

Pour les longueurs de câble supérieures à  $l_k$  il peut encore être possible de procéder à des essais sans impédance terminale à condition que les phénomènes d'atténuation et de superposition soient pris en compte. Un essai sans impédance terminale est autorisé lorsque le diagramme de double impulsion (paragraphe 2.6) est soit:

- du type 1 (figure 7) ou
- du type 2 et du type 3 (figures 8 et 9) à condition que la longueur  $l$  du câble reste en dehors des limites  $2l_1 \leq l \leq 2l_2$ .

(voir paragraphe 2.6 pour la détermination de  $l_1$  et  $l_2$ .)

Pour les longueurs comprises à l'intérieur de ces limites, un circuit d'essai différent peut être utilisé ou alors on adopte l'une des méthodes décrites aux paragraphes 2.4.3 ou 2.4.4.

Les circuits d'essai normalement utilisés sont ceux des figures 1, 2, 3 et 5.

## 2.4 Measurement procedures

The test shall be carried out as a type test on short cable samples and as a routine test on production lengths.

The selection of the test circuit depends on whether the cable sample may be considered as a short length (Sub-clause 2.4.1) or a long length (Sub-clauses 2.4.2, 2.4.3 and 2.4.4) depending on the double pulse diagram (Sub-clause 2.6). The test circuit has to be discharge free for achieving the required sensitivity (see Sub-Clause 2.3.5). Calibration does not necessarily have to be done with the HV supply on (see Sub-clause 2.3.4).

### 2.4.1 Short cable lengths including type test lengths

#### a) Requirements

For short lengths the cable may be considered similar to a lumped capacitance. The limitation on length where this is not acceptable depends upon the test circuit used. The actual value would be determined using the double pulse diagram described in Sub-clause 2.6 and defined as  $l_k$ .

*Note.* — However, lengths up to  $2l_k$  behave as short lengths when both ends of the cable are connected together. (See Sub-clause 2.3.)

The test circuits normally used are those in Figures 1, 2 and 3.

#### b) Verification of sensitivity

The calibrator shall be connected in parallel with the cable and only at the end remote from the detector. The calibration charge,  $q_{cal}$ , is injected, and the respective measured deflection value  $a_2$ , is used to calculate the scale factor  $k_2 = q_{cal}/a_2$  (pC/mm) and sensitivity,  $q_{min}$  (pC).

$$q_{min} = 2k_2 \cdot h_n$$

where:

$h_n$  is the deflection (mm) from background interference

#### c) Test procedure

The measurement shall be made only at one end of the cable. For the measured deflection  $A$  (mm) the discharge magnitude  $q$  (pC) is

$$q = k_2 \cdot A$$

The voltage levels used shall be selected according to Sub-clause 2.5.

### 2.4.2 Long cable lengths tested without a terminal impedance

#### a) Requirements

For cable lengths in excess of  $l_k$  it may still be possible to test without a terminal impedance provided superposition and attenuation phenomena are taken into account. A test without terminal impedance is permitted where the double pulse diagram (Sub-clause 2.6) is either:

- Type 1 (Figure 7) or
- Type 2 and Type 3 (Figures 8 and 9) but where the cable length,  $l$ , lies outside the limits  $2l_1 \leq l \leq 2l_2$ .

(See Sub-clause 2.6 for the determination of  $l_1$  and  $l_2$ .)

For lengths inside these limits an alternative test circuit should be used or the procedures described in Sub-clause 2.4.3 or 2.4.4 should be adopted.

The test circuits normally used are those shown in Figures 1, 2, 3 and 5.

b) *Vérification de la sensibilité*

Suivant les figures 1, 2, 3 ou 5, le dispositif d'étalonnage est successivement connecté aux deux extrémités en parallèle avec le câble, d'abord à l'extrémité éloignée du détecteur et ensuite, avec le même réglage de l'amplificateur et la même charge d'étalonnage, à l'extrémité proche du détecteur. Les valeurs suivantes sont notées:

- $a_1$  (mm) déviation mesurée avec le dispositif d'étalonnage à l'extrémité proche du détecteur;
- $a_2$  (mm) déviation mesurée avec le dispositif d'étalonnage à l'extrémité éloignée du détecteur.

$a_1$  et la charge d'étalonnage  $q_{cal}$  (pC) sont utilisées pour déterminer le facteur d'échelle  $k_1$  (pC/mm):

$$k_1 = q_{cal}/a_1$$

$a_1$  et  $a_2$  sont utilisées pour déterminer un facteur de correction  $F$  pour tenir compte de l'atténuation. Il est donné par:

$$F = 1 \quad \text{si } a_2 \geq a_1$$

$$F = \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \quad \text{si } a_2 < a_1$$

La sensibilité  $q_{min}$  (pC) est calculée par:

$$q_{min} = 2k_1 \cdot h_n \cdot F$$

c) *Méthode d'essai*

La mesure est effectuée deux fois en connectant l'extrémité haute tension du condensateur de couplage tour à tour à chaque extrémité du câble. Les déviations mesurées  $A_1$  et  $A_2$  sont déterminées et la plus grande valeur  $A_{max}$  (mm) retenue. Avec le facteur d'échelle  $k_1$  (pC/mm) et le facteur de correction  $F$  la valeur de la décharge  $q$  (pC) est:

$$q = k_1 \cdot A_{max} \cdot F$$

Les niveaux de tension utilisés lors de la mesure de la plus grande déviation  $A_{max}$  sont déterminés conformément au paragraphe 2.5.

*Note.* — Seulement si le diagramme de double impulsion est du type 1 (voir figure 7) et  $a_2 \geq a_1$ , une mesure de  $A$  (mm) est suffisante lorsque les deux extrémités du câble sont connectées ensemble (voir paragraphe 2.3). La valeur de la décharge est alors:

$$q = k_1 \cdot A$$

2.4.3 *Grandes longueurs de câble essayées avec une impédance terminale*

a) *Prescriptions*

Pour éliminer les erreurs de superposition, les câbles de longueur supérieure à  $l_k$  peuvent être essayés avec une impédance terminale comme représenté à la figure 4. Cette méthode peut être utilisée avec tous les détecteurs et sur toutes les longueurs de câble, à condition que l'impédance  $Z_w$  satisfasse aux conditions spécifiées au paragraphe 2.7. L'accord de l'impédance avec le câble en essai est démontré en utilisant la procédure décrite au paragraphe 2.7.

b) *Vérification de la sensibilité*

Selon la figure 4, le dispositif d'étalonnage est successivement connecté aux deux extrémités en parallèle avec le câble, d'abord sur l'extrémité éloignée du détecteur et ensuite, avec le même réglage de l'amplificateur et la même charge d'étalonnage, à l'extrémité proche du détecteur. Les valeurs suivantes sont notées:

- $a_1$  (mm) déviation mesurée avec le dispositif d'étalonnage à l'extrémité proche du détecteur. Il n'est pas nécessaire de la déterminer lorsque la procédure du point c ii) est suffisante;
- $a_2$  (mm) déviation mesurée avec le dispositif d'étalonnage à l'extrémité éloignée du détecteur.

b) *Verification of sensitivity*

As shown in Figures 1, 2, 3 or 5, the calibrator shall be connected to each end in turn, in parallel with the cable, at first to the end remote from the detector and then—with the same setting of the amplifier and calibration charge—to the end near the detector. The following values shall be recorded:

- $a_1$  (mm) the deflection measured with the calibrator at the end near to the detector;
  - $a_2$  (mm) the deflection measured with the calibrator at the end remote from the detector.
- $a_1$  and the calibration charge  $q_{\text{cal}}$  (pC) are used to determine the scale factor  $k_1$  (pC/mm):

$$k_1 = q_{\text{cal}}/a_1$$

$a_1$  and  $a_2$  are used to determine a correction factor  $F$  to allow for attenuation. It is given by:

$$F = 1 \quad \text{if } a_2 \geq a_1$$

$$F = \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \quad \text{if } a_2 < a_1$$

The sensitivity  $q_{\text{min}}$  (pC) is calculated by:

$$q_{\text{min}} = 2k_1 \cdot h_n \cdot F$$

c) *Test procedure*

The measurement shall be made twice by connecting the high voltage end of the coupling capacitor to each end of the cable in turn. The measured deflections  $A_1$  and  $A_2$  shall be determined and the higher value  $A_{\text{max}}$  (mm) selected. With the scale factor  $k_1$  (pC/mm) and the correction factor  $F$  the discharge magnitude  $q$  (pC) is:

$$q = k_1 \cdot A_{\text{max}} \cdot F$$

The voltage levels used when measuring the highest deflection  $A_{\text{max}}$  shall be selected according to Sub-clause 2.5.

*Note.* — Only if the double pulse diagram is of type 1 (see Figure 7) and  $a_2 \geq a_1$ , a measurement of  $A$  (mm) is sufficient when both cable ends are connected together (see Sub-clause 2.3). The discharge magnitude is then:

$$q = k_1 \cdot A$$

### 2.4.3 Long cable lengths tested with a terminal impedance

a) *Requirements*

To eliminate superposition errors, cables of length greater than  $l_k$  may be tested with a terminal impedance as shown in Figure 4. This method may be used with all detectors and all cable lengths provided that the impedance  $Z_w$  meets the requirements specified in Sub-clause 2.7. The suitability of the impedance for the cable under test shall be demonstrated using the procedure described in Sub-clause 2.7.

b) *Verification of sensitivity*

As shown in Figure 4 the calibrator should be connected to each end in parallel with the cable at first to the end remote from the detector and then—with the same amplifier setting and calibration charge—to the end near to the detector.

The following values shall be recorded:

- $a_1$  (mm) the deflection measured with the calibrator at the end near to the detector. This need not be measured if the following procedure of Item c ii) is sufficient;
- $a_2$  (mm) the deflection measured with the calibrator at the end remote from the detector.

Le facteur d'échelle  $k_2$  (pC/mm) est déterminé et la sensibilité  $q_{\min}$  (pC) calculée:

$$k_2 = q_{\text{cal}}/a_2$$

$$q_{\min} = 2 k_2 \cdot h_n$$

c) *Méthode d'essai*

- i) Lorsqu'il est nécessaire de déterminer la valeur des décharges partielles aussi précisément que possible, l'extrémité haute tension du condensateur de couplage est connectée à chaque extrémité du câble, tour à tour, et les déviations  $A_1$  et  $A_2$  (mm) sont mesurées. La valeur  $q$  (pC) de la décharge est donnée par:

$$q = q_{\text{cal}} \cdot \sqrt{\frac{A_1 \cdot A_2}{a_1 \cdot a_2}}$$

- ii) Lorsqu'il est suffisant de s'assurer que la valeur de la décharge ne dépasse pas une valeur spécifiée, la mesure peut être faite avec l'extrémité haute tension du condensateur de couplage connectée à une seule extrémité du câble. Dans ce cas l'impulsion d'étalonnage est injectée seulement à l'extrémité du câble connectée à l'impédance terminale éloignée du détecteur ( $a_2$ ). Avec la déviation  $A_1$  (mm) et le facteur d'échelle  $k_2$  (pC/mm), la valeur  $q$  (pC) de la décharge est donnée par:

$$q = k_2 \cdot A_1$$

Les niveaux de tension utilisés lors de la mesure des déviations  $A_1$  et, si nécessaire,  $A_2$  sont déterminés conformément au paragraphe 2.5.

2.4.4 *Grandes longueurs de câble essayées avec un supprimeur de réflexion*

La connexion du supprimeur de réflexion est représentée à la figure 5.

a) *Prescriptions*

Lorsqu'on utilise un supprimeur de réflexion, le diagramme de double impulsion doit correspondre au type 1 (voir figure 7).

b) et c) *Vérification de la sensibilité et méthode d'essai*

Comme pour l'essai des grandes longueurs sans impédance terminale (voir paragraphe 2.4.2).

2.5 **Niveaux de tension/limites des décharges partielles**

La tension, la sensibilité et les limites des décharges partielles sont déterminées selon les prescriptions de la norme applicable au type de câble considéré.

2.6 **Tracé des diagrammes de double impulsion**

Un générateur à double impulsion est connecté aux éléments du circuit de mesure comme représenté à la figure 6.

Le diagramme de double impulsion est affecté par des variations dans chaque élément du circuit. Il est important que le diagramme de double impulsion soit obtenu dans les conditions retenues pour l'essai à haute tension. Le câble de puissance est remplacé par une charge résistive ayant pour valeur l'impédance caractéristique maximale pour les câbles extrudés ( $R = 50 \Omega$  à  $60 \Omega$ ). Les doubles impulsions sont injectées dans les mêmes conditions que les impulsions d'étalonnage pour les différents circuits d'essai représentés aux figures 1, 2 et 3. Les conditions suivantes sont appliquées:

- a) Le générateur à double impulsion I doit satisfaire aux prescriptions du paragraphe 2.2.3. L'intervalle entre impulsions est déterminé en utilisant un oscilloscope extérieur avec une base de

The scale factor  $k_2$  (pC/mm) is determined, and sensitivity  $q_{\min}$  (pC) calculated:

$$k_2 = q_{\text{cal}}/a_2$$

$$q_{\min} = 2 k_2 \cdot h_n$$

*c) Test procedure*

- i) When it is required to determine the value of the partial discharge magnitude as closely as possible, the high voltage end of the coupling capacitor shall be connected to each end of the cable in turn and both measured deflections  $A_1$  and  $A_2$  (mm) determined. The discharge magnitude  $q$  (pC) is given by:

$$q = q_{\text{cal}} \cdot \sqrt{\frac{A_1 \cdot A_2}{a_1 \cdot a_2}}$$

- ii) When it is sufficient to check that the discharge magnitude does not exceed a specified value, the measurement may be made with the high voltage end of the coupling capacitor connected to one end of the cable only. In this case the calibration pulse is injected only at the end of the cable connected to the terminal impedance remote from the detector ( $a_2$ ). With the measured deflection  $A_1$  (mm) and the scale factor  $k_2$  (pC/mm) the discharge magnitude  $q$  (pC) is given by:

$$q = k_2 \cdot A_1$$

The voltage levels used when measuring the deflections  $A_1$  and if necessary  $A_2$  shall be selected according to Sub-clause 2.5.

**2.4.4 Long cable lengths tested with a reflection suppressor**

The connection of the reflection suppressor is shown in Figure 5.

*a) Requirements*

When using a reflection suppressor the double pulse diagram must be Type 1 (see Figure 7).

*b) and c) Verification of sensitivity and test procedure*

These are the same as those indicated for testing long lengths without a terminal impedance (see Sub-clause 2.4.2).

**2.5 Voltage levels/partial discharge limits**

The voltage, sensitivity and partial discharge limits shall be determined in accordance with the requirements in the standard for the type of cable.

**2.6 Plotting double pulse diagrams**

A double pulse generator should be connected to the components of the measuring circuit as shown in Figure 6.

The double pulse plot is affected by variations in each circuit component. It is important that the double pulse plot be obtained for the precise conditions to be used in the high voltage test. The power cable is replaced by a resistive load having the maximum characteristic impedance for extruded cables ( $R = 50 \Omega$  to  $60 \Omega$ ). The double pulses are injected in the same position as the calibration pulses for the various test circuits shown in Figures 1, 2 and 3. The following conditions should apply:

- a)* The double pulse generator I should satisfy the requirements of Sub-clause 2.2.3. Pulse spacing should be determined using an external oscilloscope with calibrated time base. Required

temps étalonnée. Précision requise:  $\pm 3\%$  ou 50 ns, la plus grande des deux valeurs étant applicable. L'impédance de sortie de l'ensemble sera dans la gamme de 50  $\Omega$  à 60  $\Omega$ . Pour satisfaire à cette condition, il peut être nécessaire d'ajouter des résistances extérieures en parallèle ou en série avec la sortie.

L'expérience a montré que le diagramme de double impulsion pouvait être obtenu de façon fiable par les moyens suivants:

- la méthode la plus simple est de connecter le générateur à double impulsion aux bornes du condensateur haute tension  $C_K$  et l'impédance de mesure  $Z_A$  avec des fils pas plus longs que 3 m.
  - pour les connexions plus longues, un câble coaxial est normalement utilisé (voir figure 6). Dans ce cas, deux résistances d'adaptation  $R_1$  et  $R_2$  sont nécessaires pour s'assurer que le système accordé présente une impédance dans la gamme de 50  $\Omega$  à 60  $\Omega$  comme la résistance de charge.
- b) Le condensateur  $C_K$  et les autres éléments haute tension du circuit d'essai doivent être les mêmes et comporter les mêmes connexions que celles à utiliser dans l'essai haute tension.
- c) L'impédance  $Z_A$  de l'unité d'accord ou du détecteur d'impédance à utiliser dans l'essai haute tension doit être utilisée pour obtenir le diagramme de double impulsion.
- d) Le détecteur amplificateur D est utilisé avec l'ajustage du gain et la réponse en fréquence de l'amplificateur, choisis pour l'essai haute tension. Pour la mesure précise des changements dans l'amplitude de l'impulsion causés par des distorsions de superposition, la sortie du détecteur amplificateur D est affichée sur un oscilloscope extérieur (par exemple l'oscilloscope utilisé au point a)).

L'intervalle de temps du générateur à double impulsion est réglé à 100  $\mu$ s et les déviations du détecteur de décharges partielles pour les deux impulsions  $A_{100}$  sont mesurées. L'intervalle de temps est alors réduit de 100  $\mu$ s à 0,2  $\mu$ s; pour différentes valeurs d'un intervalle  $t$  mesuré entre les crêtes maximales des deux impulsions, la déviation maximale  $A_t$  est mesurée. Une attention particulière est apportée aux aires de superposition positive et négative. Les valeurs de  $A_t/A_{100}$  sont tracées en fonction de  $t$  pour obtenir le diagramme de double impulsion. Des exemples de diagrammes sont donnés aux figures 7 à 9.

La valeur  $t_k$  pour laquelle  $A_t/A_{100} = 1,4$  sur la superposition initiale positive est déterminée à partir de la courbe. Les temps  $t_1$  et  $t_2$  pour lesquels  $A_t/A_{100} \leq 1,0$  sur toutes les aires de *superposition négative* sont déterminés. En prenant en compte les erreurs de mesure, les aires de superposition négative d'amplitude maximale jusqu'à  $-10\%$  peuvent être négligées.

Les longueurs de câble  $l_k$ ,  $l_1$  et  $l_2$  correspondant à  $t_k$ ,  $t_1$  et  $t_2$  peuvent être calculées en utilisant la formule  $l = 0,5 \cdot t \cdot v$ . La vitesse de propagation moyenne est  $v$  et les valeurs typiques pour la plupart des câbles extrudés se situent entre 150 m/ $\mu$ s et 170 m/ $\mu$ s. Sur demande, la vitesse de propagation est mesurée en injectant une impulsion d'étalonnage dans un câble n'ayant pas d'impédance terminale et en mesurant le temps de retard entre les impulsions incidente et réfléchie.

Les longueurs de câble  $l < l_k$  peuvent être considérées comme courtes. Ces longueurs peuvent être de l'ordre de 100 m et même dépasser 1000 m.

Les longueurs entre  $2l_1$  et  $2l_2$  sont considérées comme longueurs dans la zone interdite. Ces longueurs doivent être essayées avec une impédance terminale (voir paragraphe 2.4.3) ou avec un circuit d'essai modifié (par exemple D,  $Z_A$ ,  $C_K$ ) pour déplacer  $l_1$  et  $l_2$  vers des valeurs plus convenables. En variante, il est possible de doubler effectivement la valeur de  $l_k$  en connectant les deux extrémités du câble ensemble.

## 2.7 Prescriptions pour l'impédance terminale

L'impédance terminale  $Z_w$  représentée à la figure 4 comporte des éléments RC ou RLC qui sont choisis sur la base d'une évaluation expérimentale.

accuracy:  $\pm 3\%$  or 50 ns whichever is the greater. The overall output impedance should be in the range of 50  $\Omega$  to 60  $\Omega$ . To achieve this it may be necessary to add external resistors in parallel to or in series with the output.

Experience has shown that the double pulse plot may be reliably obtained in the following ways:

- The simplest method is to connect the double pulse generator across the high voltage capacitor  $C_K$  and the measuring impedance  $Z_A$  with wires not longer than 3 m.
  - For longer connections a coaxial cable should be used (see Figure 6). In this case two adapter resistors  $R_1$  and  $R_2$  are necessary to ensure that the matched system presents an impedance in the range 50  $\Omega$  to 60  $\Omega$  as the load resistance.
- b) The capacitor  $C_K$  and the other high voltage components of the test circuit should be the same and have the same connections as those used in the high voltage test.
- c) The matching unit or detector impedance  $Z_A$  to be used in the high voltage test should be used to obtain the double pulse plot.
- d) The detector amplifier D should be used with the gain setting and amplifier frequency response selected for the high voltage test. For accurate measurement of the changes in pulse magnitude caused by superposition distortions, the output of the detector amplifier D should be displayed on an external oscilloscope (for example the oscilloscope used in Item a)).

The time interval of the double pulse generator should be set to 100  $\mu\text{s}$  and the deflections of the partial discharge detector to the two pulses  $A_{100}$  be measured. The time interval should then be reduced from 100  $\mu\text{s}$  to 0.2  $\mu\text{s}$ ; for different values of an interval  $t$  measured between maximum peaks of the two pulses, the maximum deflection  $A_t$  should be measured. Particular attention should be given to areas of positive and negative superposition. Values of  $A_t/A_{100}$  should then be plotted as a function of  $t$  to obtain the double pulse diagram. Examples of diagrams are in Figures 7 to 9.

The value  $t_k$  where  $A_t/A_{100} = 1.4$  on the initial positive superposition should be determined from the plot. Times  $t_1$  and  $t_2$  where  $A_t/A_{100} \leq 1.0$  at all areas of *negative superposition* should be determined. Taking into account the errors of measurement, areas of negative superposition with a maximum magnitude up to  $-10\%$  can be ignored.

The cable lengths  $l_k$ ,  $l_1$  and  $l_2$  corresponding to  $t_k$ ,  $t_1$  and  $t_2$  should be calculated using the formula  $l = 0.5 \cdot t \cdot v$ . The mean propagation velocity is  $v$  and typical values for most extruded cable lie between 150 m/ $\mu\text{s}$  and 170 m/ $\mu\text{s}$ . On request the propagation rate shall be measured by injecting a calibration pulse into a cable not having a terminal impedance and measuring the time delay between incident and reflected pulse.

The cable lengths  $l < l_k$  can be considered as short lengths. These may be as low as 100 m and even higher than 1000 m.

Lengths between  $2l_1$  and  $2l_2$  are considered forbidden lengths. These lengths have to be tested with a terminal impedance (see Sub-clause 2.4.3) or under modified conditions of the test circuit (for example D,  $Z_A$ ,  $C_K$ ) to alter  $l_1$  and  $l_2$  to more suitable values. Alternatively it is possible to effectively double the value of  $l_k$  by connecting both ends of the cable together.

## 2.7 Requirements for the terminal impedance

The terminal impedance  $Z_w$  shown in Figure 4 comprises either RC or RLC elements which are selected on the basis of experimental evaluation.

### *Elément RC*

Les mesures suivantes sont utilisées pour montrer que le condensateur terminal  $C_w$  est correctement adapté.

L'élément RC est connecté en parallèle avec le câble aux bornes de l'extrémité éloignée du détecteur. L'élément capacitif est court-circuité et l'élément ohmique est ajusté pour correspondre à l'impédance caractéristique du câble. Ensuite le dispositif d'étalonnage est aussi connecté à l'extrémité éloignée du détecteur et la déviation  $a_2$  est mesurée.

Avec le même réglage de l'amplificateur, le court-circuit de l'élément capacitif de l'impédance terminale est supprimé.

La suppression du court-circuit du condensateur ( $C_w$ ) ne doit pas modifier la déviation  $a_2$  de plus de  $\pm 15\%$ .

Pour les détecteurs de décharges partielles ayant une fréquence de coupure inférieure à 2 MHz, une estimation raisonnable de la capacité du condensateur  $C_w$  (condensateur de couplage haute tension de  $Z_w$ ) peut être obtenue en utilisant la formule suivante:

$$C_w \geq 0,5 \frac{1}{R_w \cdot f_m}$$

où:

$R_w$  est la composante ohmique de l'impédance terminale (correspondant approximativement à l'impédance caractéristique du câble)

$f_m$  est la fréquence moyenne de mesure du détecteur (moyenne arithmétique des fréquences limites supérieure et inférieure du détecteur)

Pour les instruments mesurant les décharges partielles et ayant un amplificateur à large bande avec une fréquence de coupure supérieure à 2 MHz connecté à un bloc intégrateur électronique,  $C_w$  peut être estimée à partir de la relation:

$$C_w \geq \frac{3 T_J}{R_w}$$

$T_J$  est la durée de l'impulsion de décharge partielle au départ (en général inférieure à 0,2  $\mu$ s).

### *Elément RLC (circuit série résonnant)*

La mesure suivante est utilisée pour établir que le circuit résonnant est correctement adapté à la fréquence de mesure considérée.

L'impédance terminale étant retirée, une résistance ohmique correspondant à l'impédance caractéristique du câble est connectée à l'extrémité éloignée du détecteur en parallèle avec le câble. Ensuite le dispositif d'étalonnage est connecté à l'extrémité éloignée du détecteur et la déviation  $a_2$  est mesurée.

La résistance ohmique est ensuite retirée — le réglage de l'amplificateur restant maintenu constant — et remplacée par l'impédance terminale, constituée par RLC.

A la fréquence de mesure, la composante ohmique de l'impédance terminale doit correspondre à la résistance  $R_w$ .

La déviation  $a_2$  mesurée ne doit pas varier de plus de  $\pm 15\%$  quand l'impédance terminale est connectée.

Les ordres de grandeur des valeurs de capacité  $C_w$  et d'inductance  $L_w$  peuvent être obtenus en utilisant les formules suivantes:

*RC element*

The following measurement shall be used to prove the suitability of the terminal capacitor  $C_w$ .

The RC element shall be connected in parallel with the cable across the end remote from the detector. The capacitive component shall be short-circuited and the ohmic component shall be adjusted to correspond to the characteristic impedance of the cable. Subsequently the calibrator shall also be connected to the end remote from the detector and the measured deflection  $a_2$  shall be determined.

With the same amplifier setting, the short circuit of the capacitive component of the terminal impedance shall be removed.

The removal of the short circuit of the capacitor ( $C_w$ ) shall not change the deflection  $a_2$  by more than  $\pm 15\%$ .

For PD detectors having a cut-off frequency lower than 2 MHz, a reasonable estimate of the capacitor  $C_w$  (high voltage coupling capacitor of  $Z_w$ ) may be obtained using the following formula:

$$C_w \geq 0,5 \frac{1}{R_w \cdot f_m}$$

where:

$R_w$  is the ohmic component of the terminal impedance (corresponding approximately to the characteristic impedance of the cable)

$f_m$  is the mean measuring frequency of the detector (arithmetic mean of the upper and lower limiting frequencies of the detector)

For PD measuring instruments having a wide band amplifier with an upper cut-off frequency more than 2 MHz in connection with an electronic integrator unit,  $C_w$  can be estimated on the basis of the relation:

$$C_w \geq \frac{3 T_J}{R_w}$$

$T_J$  is the time duration of the original PD pulse (in general smaller than 0.2  $\mu$ s).

*RLC element series resonance circuit*

The following measurement shall be used for proving the suitability of the resonant circuit at the respective measuring frequency.

With the terminal impedance removed an ohmic resistor corresponding to the characteristic impedance of the cable shall be connected to the end remote from the detector in parallel with the cable. Furthermore the calibrator shall be connected to the end remote from the detector, and the measured deflection  $a_2$  shall be determined.

Then the ohmic resistor shall be removed—with the setting of the amplifier kept constant—and replaced by the terminal impedance, consisting of RLC.

At the measuring frequency the ohmic component of the terminal impedance shall correspond to the resistance  $R_w$ .

The measured deflection  $a_2$  shall not change by more than  $\pm 15\%$  when the terminal impedance is connected.

Reasonable estimates of the values of the capacitance  $C_w$  and the inductance  $L_w$  may be obtained by using the following formulas:

$$C_w \geq \frac{\Delta f}{2\pi \cdot f_m^2 \cdot R_w}$$

$$L_w = \frac{1}{(2\pi \cdot f_m)^2 \cdot C_w}$$

où:

$R_w$  est la composante ohmique de l'impédance terminale (correspondant approximativement à l'impédance caractéristique du câble)

$f_m$  est la fréquence moyenne de mesure du détecteur (moyenne arithmétique des fréquences limites supérieure et inférieure du détecteur)

$\Delta f$  est la largeur de bande du détecteur (fréquence limite supérieure moins fréquence limite inférieure du détecteur)

## SECTION TROIS — GUIDE D'APPLICATION

Les procédures à adopter pour les essais de décharges partielles sur des longueurs de câbles de puissance extrudés sont décrites dans la section deux. Ce guide a été préparé pour expliquer ou justifier quelques-unes de ces procédures.

### 3.1 Information de base

#### 3.1.1 Introduction

Une mesure de décharges partielles (DP) est utilisée comme un des essais de contrôle de la qualité des câbles extrudés pour la moyenne et la haute tension. La situation normale veut que des décharges partielles ne se produisent pas dans de tels câbles lorsqu'ils sont mis sous tension aux niveaux usuellement prescrits dans les spécifications. Cependant occasionnellement, il existe un défaut ponctuel qui produit effectivement des DP. Le but de cet essai est de caractériser cette situation particulière. Une contrainte essentielle est que cette procédure permet une mesure précise d'une DP en un point restreint, quelle que soit sa position sur la longueur du câble.

Des techniques de mesure sensibles sont utilisées pour détecter la DP qui se produit sous forme d'impulsions à une contrainte de champ spécifique dans des vacuoles à l'intérieur de l'isolation ou dans des zones défectueuses des couches semi-conductrices. Les procédures qui peuvent être utilisées sont décrites dans un document général, la Publication 270 de la CEI. Dans celle-ci, quelques-unes des difficultés, telles que des restrictions de sensibilité causées par des interférences électriques et les méthodes pour s'en affranchir, sont évoquées. Cependant, il existe d'autres problèmes spécifiques aux grandes longueurs de câble, qui sortent du domaine d'application de la Publication 270 de la CEI. C'est à ces problèmes que la présente norme s'applique.

Les transitoires électriques engendrés à l'endroit d'une décharge sur une grande longueur de câble engendrent des ondes progressives se propageant vers les deux extrémités du câble. Un détecteur de *PD* situé à une extrémité répond à la fois à l'onde arrivant directement et à l'onde arrivant après réflexion à l'autre extrémité du câble. L'arrivée des deux trains d'ondes peut conduire à une superposition et la réponse en résultant peut être plus grande ou plus petite que l'onde initiale. Si la réponse est plus grande que l'onde initiale, cette erreur de superposition positive conduira à une surestimation de la grandeur de la décharge. Dans ce cas, la validité de l'essai n'est pas altérée. Cependant, une sous-estimation se produira si la réponse est plus petite que l'onde initiale. Une telle erreur négative peut conduire à ne pas détecter certains défauts. La stratégie de cette norme est de permettre les erreurs positives et de maintenir les erreurs négatives à l'intérieur de limites acceptables.

$$C_w \geq \frac{\Delta f}{2\pi \cdot f_m^2 \cdot R_w}$$

$$L_w = \frac{1}{(2\pi \cdot f_m)^2 \cdot C_w}$$

where:

$R_w$  is the ohmic component of the terminal impedance (corresponding approximately to the characteristic impedance of the cable)

$f_m$  is the mean measuring frequency of the detector (arithmetic mean of the upper and lower limiting frequencies of the detector)

$\Delta f$  is the bandwidth of the detector (upper limiting frequency minus the lower limiting frequency of the detector)

### SECTION THREE—APPLICATION GUIDE

The procedures to be adopted during partial discharge tests on lengths of extruded power cable are described in Section 2. This guide has been prepared to explain or justify some of the procedures.

#### 3.1 Background information

##### 3.1.1 Introduction

A partial discharge (PD) measurement is used as one of the quality control tests for extruded cables in the medium and high voltage range. The normal situation would be that partial discharges would not occur in such cables when energized to stresses usually required in specifications. Occasionally, however, there will be an isolated defect which does produce PD. The purpose of the test is to identify this particular situation. An essential requirement is that the procedures allow an accurate measurement of PD from a single site regardless of its position in the cable length.

Sensitive measurement techniques are used to detect the PD which occur in the form of pulses at a specific field strength in voids within the insulation or in defective areas of the semi-conducting layers. The procedures which may be used are described in a general document, IEC Publication 270. In this, some of the difficulties, such as restrictions in sensitivity caused by electrical interference, and methods of overcoming them are discussed. However, there are other problems specific to long lengths of cable which are outside the scope of IEC Publication 270. It is to these problems that this standard is addressed.

The electrical transient at a discharge site within a long cable length sets up travelling waves propagating to both ends of the cable. A PD detector located at one end will respond both to the wave arriving directly and the wave arriving after reflection at the other end of the cable. The arrival of the two wave trains can lead to superposition and the resulting response may be greater or less than the initial wave. If the response is greater than the initial wave this positive superposition error will lead to an overestimate of the discharge magnitude. As such it would not limit the effectiveness of the test. However, an underestimate will occur if the response is less than the initial wave. Such a negative error could lead to faults being undetected. The strategy of this standard is to permit positive errors and to keep negative errors to within acceptable limits.

La réponse et les erreurs associées sont déterminées à la fois par la longueur du câble et par les caractéristiques du circuit d'essai. Les procédures requises pour prendre en compte ces erreurs et celles qui sont dues à l'atténuation ne sont pas prises en considération dans la Publication 270 de la CEI. Ces phénomènes ont été pris en considération par la CIGRÉ il y a quelques années (rapport CIGRÉ 1968-21.01, Annexe IV), et, plus récemment, les normes CEI pour les essais de câble extrudé ont recommandé l'utilisation conjointe de ce rapport et de la Publication 270 de la CEI. Cependant, l'expérience à l'usine a, depuis, indiqué trois résultats importants:

- a) Quelques-unes de ces techniques recommandées par la CIGRÉ sont trop compliquées, prennent trop de temps et sont donc trop chères, en particulier pour les câbles à haute tension. En conséquence, il peut être intéressant de mener les essais avec à la fois apparition d'atténuation et de superposition, mais cela doit être fait de telle façon que les erreurs maximales soient définies et comprises dans des limites acceptables, telles qu'elles sont spécifiées dans la section deux.
- b) Les conditions d'apparition d'erreurs de superposition négative et positive dépendent du circuit d'essai complet. La description d'une réponse\*  $\alpha$  ou  $\beta$  d'un détecteur de DP particulier, avec les méthodes de mesure qui en découlent, a conduit à des résultats inattendus et non comparables. Ce n'est donc pas la meilleure méthode. Cette norme recommande une méthode fondée sur la détermination des propriétés caractéristiques du circuit de mesure complet en traçant ce qui est dénommé le «diagramme de double impulsion». C'est sur la base de ce diagramme de double impulsion que la méthode d'essai la plus économique est choisie.
- c) Le rapport CIGRÉ avait pour conséquence de préférer toujours comme conditions une réponse  $\alpha$  ou une superposition positive. L'expérience a montré que le circuit d'essai le plus économique existait lorsque le câble est considéré comme suffisamment court pour qu'il soit essayé comme une capacité localisée. La situation peut se présenter lorsque des longueurs normalement essayées peuvent être considérées comme courtes avec une réponse  $\beta$  mais non avec un circuit à réponse  $\alpha$ . En établissant les diagrammes de double impulsion respectifs, il peut être établi que la réponse  $\beta$  est alors préférée.

La présente norme est donc complémentaire de la Publication 270 de la CEI et traite spécifiquement des problèmes d'essais de décharge pour les câbles de puissance. Son but essentiel est la détermination de la méthode d'essai la plus économique pour une longueur particulière de câble sur la base du diagramme de double impulsion. Cette procédure d'étalonnage permet de déterminer les erreurs en fonction de la longueur du câble et de spécifier une méthode pour maintenir ces erreurs dans des limites acceptables.

La première considération est d'établir quelles longueurs peuvent être considérées comme courtes ou longues pour un circuit d'essai particulier, car la méthode la plus économique consiste à les essayer comme longueur courte. Une longueur courte peut être aussi petite que 100 m et peut atteindre jusqu'à 1000 m selon le circuit d'essai. Pour les grandes longueurs une possibilité est de terminer l'extrémité éloignée du câble avec son impédance caractéristique, cela pour éviter les réflexions d'impulsion et éliminer la source d'erreur. Il est aussi possible de détecter les deux impulsions et de supprimer électroniquement les impulsions réfléchies.

Les méthodes de prévention et de suppression requièrent chacune des essais spéciaux pour démontrer leur efficacité. Finalement la méthode la plus économique pour les grandes longueurs est de les essayer sans prévenir les réflexions ni supprimer les impulsions réfléchies. Cependant, pour certains circuits d'essais, les erreurs sont trop grandes et cette méthode n'est pas acceptable pour des essais sur des longueurs particulières de câble. Dans ces cas, il sera nécessaire de les essayer avec une impédance caractéristique ou avec un suppresseur, ou encore de remplacer le circuit d'essai par un autre ayant une réponse différente et un diagramme de double impulsion mieux adapté.

\* La plupart des détecteurs produisent une onde oscillatoire hautement amortie. Avec une réponse  $\alpha$  le premier pic a la plus grande déviation; avec une réponse  $\beta$  le second pic ou un pic suivant est le plus grand.

The response and associated errors are determined by both the length of cable and the characteristics of the test circuit. The procedures required to take account of these errors and those due to attenuation are not considered in IEC Publication 270. The phenomena were considered by CIGRÉ some years ago (CIGRÉ Report 1968-21.01, Appendix IV), and earlier IEC standards for tests on extruded cable have recommended the use of this Report in conjunction with IEC Publication 270. However, factory experience has subsequently indicated three important results:

- a) Some of the techniques recommended by CIGRÉ are too complicated and time-consuming and therefore too expensive, particularly for higher voltage cables. Consequently it can be attractive to test with both attenuation and superposition occurring, but to do this in such a way that maximum errors are defined and contained within acceptable limits as specified in Section Two.
- b) The conditions producing negative and positive superposition errors depend upon the complete test circuit. To describe a particular PD detector as having an  $\alpha$  or  $\beta$  response\* with consequential measurement strategies has led to unexpected and incomparable results. This is not the best method, therefore. This standard recommends a method based upon the determination of the characteristic properties of the complete test circuit by plotting the so-called "double pulse diagram". It is on the basis of this double pulse diagram that the most economic test method should be chosen.
- c) There was an implication in the CIGRÉ report that an  $\alpha$  or positive superposition condition was always to be preferred. Experience has shown the most economic test circuit to be where a cable can be considered sufficiently short that it may be tested as a lumped capacitance. The situation may arise where lengths normally tested can be considered short with a  $\beta$  response but not with an  $\alpha$  response circuit. By evaluating the relevant double pulse diagrams it could be stated that the  $\beta$  response would then be preferred.

This standard is, therefore, complementary to IEC 270 and relates specifically to the problems of discharge tests for power cables. Its essential theme is the determination of the most economic test method for a particular length of cable on the basis of the double pulse diagram. This calibration procedure enables the errors to be determined as a function of cable length and to specify methods for keeping the errors within acceptable limits.

The first consideration is to establish what lengths may be considered short or long for a particular test circuit since to test as a short length is the most economic test method. A short length might be as little as 100 m and can be as much as 1000 m depending on the test circuit. For long lengths one possibility is to terminate the far end of the cable with the characteristic impedance. This will prevent the reflection of pulses and eliminate this source of error. Another possibility considered is to allow both pulses to be detected and suppress the reflected pulses electronically.

Both prevention and suppression methods require special checks to demonstrate their effectiveness. Finally the most economic method for long lengths is to test without preventing the reflection or suppressing the reflected pulses. However for some test circuits, the errors are too large and this method is not acceptable for tests on particular lengths of cable. In these cases, it would be necessary to test with a characteristic impedance, or with a suppressor, or change to an alternative test circuit having a different and more suitable double pulse diagram.

\* Most detectors produce a highly damped oscillatory wave. With an  $\alpha$  response the first peak has the largest deflection; with a  $\beta$  response the second or a subsequent peak is the largest.

### 3.1.2 Superposition et atténuation

Le transfert de charge produit par une décharge partielle en un point sur une grande longueur de câble donne naissance à deux ondes progressives qui se propagent vers les deux extrémités du câble. Les ondes sont produites pendant le transfert de charge et, en conséquence, sont des transitoires de courte durée. La charge contenue dans chacune correspond à la moitié de la grandeur de la décharge et se propage vers les deux extrémités du câble à la vitesse  $v$  approximativement donnée par  $c/\sqrt{\epsilon}$  ( $c$  est la vitesse de la lumière et  $\epsilon$  la permittivité relative du diélectrique). L'unité d'entrée du détecteur  $Z_A$  représentée aux figures 1 à 3 est choisie pour s'accorder à l'impédance caractéristique du câble.

En conséquence, les impulsions réfléchies à l'extrémité du câble côté détecteur, sont négligeables. Le phénomène de réflexion est relatif à une réflexion simple à l'extrémité du câble éloignée du détecteur. Pour une DP située exactement à l'extrémité éloignée du câble, il se produirait seulement une impulsion qui contiendrait la totalité de la charge (voir figure 11). Dans ce cas spécial, l'influence des phénomènes de réflexion et de superposition est sans objet.

La situation courante d'un point de décharge situé en pleine longueur et d'un détecteur à une extrémité est montrée en a) et b) de la figure 12, avant et après réflexion. L'onde est réfléchie à son arrivée à l'extrémité ouverte du câble et éloignée du détecteur; il se produit alors une onde progressive dans la même direction que l'onde non réfléchie avec un retard  $t$ . Plus grande est la distance de la source DP de l'extrémité du câble éloignée du détecteur, plus grand sera le retard  $t$ .

Le circuit de mesure répond à chaque onde pour produire une impulsion de tension. Pour une impulsion de décharge, la réponse du circuit de mesure est proportionnelle à la tension de crête ou à la charge, et le facteur de proportionnalité dépend de la gamme de fréquences et des autres paramètres du circuit. Si une impulsion arrive au circuit de mesure dans l'intervalle de temps pendant lequel le dispositif de mesure répond à une impulsion antérieure, l'impulsion de tension résultante est la somme des deux réponses superposées produites par les deux impulsions individuelles avec leur retard  $t$ . Etant donné cette superposition, le résultat mesuré est modifié en conséquence, et une erreur proportionnelle à l'impulsion de la DP est introduite dans celui-ci. C'est l'erreur de superposition qui, dépendant à la fois du retard  $t$  (c'est-à-dire de l'emplacement de la DP sur la longueur) et des caractéristiques du circuit de mesure, pourra engendrer un accroissement ou une diminution, un effet positif ou négatif comme montré aux figures 13 et 14.

En conséquence, une mesure faite sur câble ne pourra être évaluée correctement qu'avec une connaissance exacte de l'influence de ces phénomènes de réflexion et de superposition.

L'effet des erreurs de superposition peut être montré en injectant des impulsions d'étalonnage dans un câble à différents endroits sur sa longueur pour produire des réponses telles que celles des figures 13 et 14 ou en simulant la séquence de deux impulsions se déplaçant dans le même sens avec un retard  $t$  constant. Cette dernière possibilité peut être aisément réalisée en injectant deux impulsions successives de forme similaire aux impulsions de DP dans le circuit de mesure. Cela est montré à la figure 6. En faisant varier le retard  $t$  entre ces impulsions, tous les endroits de source de DP possibles sur la longueur du câble sont pris en considération. En traçant la grandeur de la tension au détecteur en fonction du retard  $t$  entre les deux impulsions, on obtient le diagramme de double impulsion (voir exemples aux figures 7, 8 et 9). Cela décrit les propriétés caractéristiques du circuit d'essai et constitue la base pour choisir la méthode d'essai appropriée pour chaque longueur de câble.

L'autre effet majeur influençant le résultat de mesure est l'atténuation. Il dépend de la longueur du câble, de la construction et de la réponse en fréquence du circuit de mesure. Il peut être évalué en utilisant l'équation :

$$a(x) = a_1 \exp(-\gamma x)$$

où :

$a$  est la valeur mesurée en  $x$

$a_1$  est la valeur mesurée en  $x = 0$  (voir figure 13)

### 3.1.2 Superposition and attenuation

The transfer of charge within a PD at a site within a long cable length sets up two travelling waves which propagate to both ends of the cable. The waves are generated during the charge transfer and consequently are transients of short duration. The charge contained within each corresponds to half the discharge magnitude and propagates to the cable ends at a velocity  $v$  approximately given by  $c/\sqrt{\epsilon}$  ( $c$  is the velocity of light and  $\epsilon$  the relative dielectric permittivity). The detector input unit  $Z_A$  shown in Figures 1 to 3 is selected to match the cable's characteristic impedance.

Consequently pulses reflected at the detector end of the cable are negligible. Reflection phenomena relate to a single reflection at the cable end remote from the detector. For a PD site exactly at the remote cable end there would be only one pulse which would contain the whole charge (see Figure 11). In this special case the influence of reflection and superposition phenomena has no relevance.

The conventional situation of a site within the length and a detector at one end is shown prior to and after reflection in a) and b) of Figure 12. At the open cable end remote from the detector, the wave is reflected on arrival; it then travels in the same direction as the unreflected wave with a time delay  $t$ . The greater the distance of the PD source from the cable end remote from the detector, the greater will be the time delay  $t$ .

The measurement circuit responds to each wave to produce a voltage pulse. For a discharge pulse the response of the measuring circuit is proportional to the peak voltage or to the charge, and the proportionality factor depends upon the frequency range and other parameters of the circuit. If a pulse arrives at the measuring circuit within the time the measuring device is responding to an earlier pulse, the resulting voltage pulse is the sum of the two superposed responses caused by the two individual pulses with their time delay  $t$ . Due to this superposition, the measured result is correspondingly modified and an error introduced in its proportionality to the PD pulse. This is the superposition error which, depending upon both the time delay  $t$  (i.e. site of the PD in the length) and the characteristic of the measuring circuit, may cause an increase or a decrease, a positive or a negative effect as shown in Figures 13 and 14.

Consequently, a cable measurement can be evaluated correctly only with an exact knowledge of the influence of these reflection and superposition phenomena.

The effect of superposition errors can be shown by injecting calibration pulses into a cable at various positions along the length to produce the responses such as those shown in Figures 13 and 14 or by simulating the sequence of two pulses travelling in the same direction with a constant time delay  $t$ . The latter possibility can easily be realized by injecting two successive pulses with a shape similar to PD pulses into the measuring circuit. This is shown in Figure 6. By varying the time delay  $t$  between these pulses all possible sites of a PD source on the cable length are considered. Plotting the voltage magnitude from the detector versus the time delay  $t$  between the double pulses leads to the double pulse diagram (see examples in Figures 7, 8 and 9). This describes the characteristics properties of the test circuit and is the basis for choosing the appropriate test method for each length of cable.

The other major effect influencing the measured result is attenuation. It depends on cable length, construction and the frequency response of the measuring circuit. It can be estimated using the equation:

$$a(x) = a_1 \exp(-\gamma x)$$

where:

$a$  is the measured value at  $x$

$a_1$  is the measured value at  $x = 0$  (see Figure 13)

$x$  est l'endroit de la source de DP (voir figure 13)

$\gamma$  est une constante, dépendant de la construction du câble et des fréquences du détecteur

L'influence de l'atténuation seule est montrée en trait plein à la figure 13, et avec les effets additionnels de réflexion et de superposition sur la courbe en pointillé. En étalonnant à partir des deux extrémités du câble et en utilisant l'équation précédente, l'erreur d'atténuation peut être calculée et les corrections effectuées. Au paragraphe 2.4.2, cela est réalisé en introduisant un facteur de correction  $F$  qui est calculé à partir de deux étalonnages: en le rattachant à l'équation d'atténuation, son utilisation permettra de s'assurer que l'erreur d'atténuation ne dépasse pas 30%. Deux exemples typiques d'effets d'atténuation et de superposition sont montrés aux figures 14a et 14b. Le dernier cas se produit dans les derniers 600 m ou 640 m: si le câble avait été plus court, tous les sites auraient indiqué une superposition. Pour les longueurs plus grandes, comme dans le cas d'une longueur de 2000 m, les erreurs de superposition seront restreintes aux endroits de DP à l'extrémité 640 m pour l'exemple de la figure 14a et 600 m pour l'exemple de la figure 14b. Pour ces deux exemples, ou en général, les longueurs courtes sont définies par  $l \leq l_k$  où l'erreur est inférieure à moins de 30% lors de l'étalonnage seulement à l'extrémité éloignée du détecteur. La longueur définie comme  $l_k$  où les erreurs atteignent 30% est 440 m, par exemple à la figure 14a et 190 m, par exemple à la figure 14b. Pour ces courtes longueurs,  $l \leq l_k$  une méthode d'essai simple est dérivée au paragraphe 2.4.1.

Pour les plus grandes longueurs  $l > l_k$  deux cas doivent être strictement séparés:

*a) Superposition positive seulement (voir figure 14a)*

Une mesure correcte est possible pour tous les câbles indépendamment de la longueur en essayant à partir de chaque extrémité tour à tour ( $A_1$  et  $A_2$ ) et en choisissant la plus grande valeur  $A_{\max}$  pour évaluation (voir paragraphe 2.4.2, point c)). Des erreurs négatives ( $A_x/A_o < 1$ ) sont produites par atténuation. En aucun cas ces erreurs négatives ne sont augmentées par superposition. Dans certains cas, lorsque l'atténuation est trop grande, une correction peut être nécessaire (voir paragraphe 2.4.2, point b) et paragraphe 3.2.2.2).

*b) Superposition positive et négative (voir figure 14b)*

Pour la superposition négative montrée, par exemple, à la figure 14b entre  $l_1 = 220$  m et  $l_2 = 600$  m, une correction n'est PAS possible. En utilisant la méthode décrite ci-dessus, toutes les longueurs plus grandes que  $2 l_1 = 440$  m et plus courtes que  $2 l_2 = 1200$  m seront désignées comme dans la zone interdite pour ce montage du circuit d'essai. Dans ce cas, une autre méthode d'essai doit être recherchée. Un circuit d'essai avec des propriétés caractéristiques différentes (fréquence du détecteur, unité d'entrée, condensateur de couplage) pourra être utilisé. Pour éliminer la superposition et obtenir les résultats montrés aux points  $x$  de la figure 14, une impédance caractéristique terminale ou un dispositif électronique (suppresseur de réflexion) pourront être utilisés. Toutes les autres longueurs en dehors de la «zone interdite» peuvent être mesurées en utilisant la méthode décrite au point a).

### 3.2 Procédures et paramètres

#### 3.2.1 Détermination des propriétés caractéristiques du circuit d'essai (voir paragraphe 2.3)

##### 3.2.1.1 Superposition (voir paragraphes 2.3.1 et 2.6)

Comme décrit précédemment, le circuit d'essai peut être rapidement et aisément évalué pour les erreurs de superposition par le diagramme de double impulsion obtenu en utilisant un générateur à double impulsion. Le diagramme de double impulsion est affecté par les variations de chaque composant du circuit. Il est important, cependant, que cela soit obtenu avec les conditions précises qui seront utilisées au cours de l'essai à haute tension, comme indiqué aux figures 1 à 3, mais avec le câble remplacé par une charge  $R$  correspondant à l'impédance caractéristique maximale possible du

$x$  is the site of PD source (see Figure 13)

$\gamma$  is a constant, depending on cable construction and detector frequencies

The influence of attenuation alone is shown as the full line in Figure 13, and with additional reflection and superposition effects in the dashed curve. By calibrating from both cable ends and using the above equation the attenuation error can be calculated and corrections made. In Sub-clause 2.4.2 this is achieved by introducing a correction factor  $F$  which is calculated from the two calibrations and, by relating it to the attenuation equation, its use will ensure that the attenuation error does not exceed 30%. In Figures 14a and 14b two typical examples with attenuation and superposition effects are shown. The latter occurs within the last 600 m or 640 m: had the cable been shorter than this all sites would have shown superposition. For longer lengths, as in the case of this 2000 m length, the superposition errors would be restricted to PD sites in the end 640 m, for example, in Figure 14a, and 600 m, for example, in Figure 14b. For both examples, or in general, short lengths are defined by  $l \leq l_k$ , where the error is less than minus 30% when calibrating only at the end remote from the detector. The length defined as  $l_k$  where the errors reach 30% is 440 m, for example, in Figure 14a, and 190 m, for example, in Figure 14b. For these short lengths  $l \leq l_k$  a simple test method is derived in Sub-clause 2.4.1.

For longer lengths  $l > l_k$  two cases have to be strictly separated:

*a) Positive superposition only (see figure 14a)*

A correct measurement is possible for all cables independent of the length by testing from each end in turn ( $A_1$  and  $A_2$ ) and selecting the higher value  $A_{\max}$  for evaluation (see Sub-clause 2.4.2, Item *c*). Negative errors ( $A_x/A_0 < 1$ ) are caused by attenuation. In no cases are these negative errors increased by superposition. In some cases, when the attenuation is too high, correction may be needed (see Sub-clause 2.4.2, Item *b*), and Sub-clause 3.2.2.2).

*b) Positive and negative superposition (see Figure 14b)*

For negative superposition shown for example in Figure 14b between  $l_1 = 220$  m and  $l_2 = 600$  m a correction is *NOT* possible. Using the above-mentioned method, all lengths longer than  $2l_1 = 440$  m and shorter than  $2l_2 = 1200$  m would be designated “forbidden” for this arrangement of the test circuit. In this case some alternative method of test must be sought. A test circuit with different characteristic properties (frequency of detector, input unit, coupling capacitor) could be used. To eliminate superposition and obtain the results shown by points  $x$  in Figure 14, a characteristic impedance termination or an electronic device (reflection suppressor) could be used. All other lengths outside the “forbidden range” can be measured by using the method described in Item *a*).

## 3.2 Procedures and parameters

### 3.2.1 Determination of characteristic properties of the test circuit (see Sub-clause 2.3)

#### 3.2.1.1 Superposition (see Sub-clauses 2.3.1 and 2.6)

As described earlier, the test circuit can be quickly and easily evaluated for superposition errors from the double pulse plot obtained using a double pulse generator. The double pulse plot is affected by variations in each circuit component. It is important, therefore, that it is obtained for the precise conditions to be used in the high voltage test as shown in Figures 1 to 3 but with the cable replaced with a load  $R$  corresponding to the maximum possible characteristic cable impedance. The test circuit comprising this load together with the high voltage components, capacitors, detector, input

câble. Le circuit d'essai comprenant cette charge avec à la fois les composants haute tension, condensateurs, détecteur, unité d'entrée et amplificateur de détection, est caractérisé en injectant deux impulsions avec un retard variable dans la charge.

Les doubles impulsions sont injectées aux mêmes endroits que les impulsions d'étalonnage dans les différents circuits d'essais représentés aux figures 1 à 3. Il pourra être noté que, dans le cas des circuits représentés aux figures 2 et 3, le générateur à double impulsion devra être capable de fonctionner avec les deux extrémités isolées de la terre.

L'impédance caractéristique des câbles haute tension extrudés se situe dans la gamme de  $10 \Omega$  à  $60 \Omega$ . Le pire des cas, pour les effets de superposition, est la valeur la plus haute,  $60 \Omega$ . Il est donc important d'accorder l'impédance de charge de l'ensemble à cette valeur.

Puisque l'impédance de sortie commune des générateurs à double impulsion commercialement disponibles se situe dans la gamme de  $50 \Omega$  à  $60 \Omega$ , la méthode préférée et la plus simple pour obtenir le diagramme de double impulsion est d'utiliser un tel générateur et de connecter la sortie directement aux bornes du condensateur à haute tension  $C_K$  et de l'unité d'entrée  $Z_A$  avec de courtes connexions non blindées. Ces connexions devront être aussi courtes que possible; l'expérience a montré que, jusqu'à 3 m, elles étaient acceptables. Dans ce cas, l'impédance interne du générateur se comporte comme la charge  $R$ . Lorsque l'impédance de sortie n'est pas de  $50 \Omega$  à  $60 \Omega$ , des résistances additionnelles doivent être connectées en série (pour les valeurs inférieures) ou en parallèle (pour les valeurs supérieures) avec les extrémités du générateur. Pour des connexions plus longues, un câble de signalisation coaxial sera utilisé entre le générateur  $C_K$  et  $Z_A$  (voir la figure 6). La partie non blindée des connexions entre le câble de signalisation coaxial et  $C_K$  et  $Z_A$  sera encore maintenue aussi courte que possible et inférieure à 3 m. Pour prévenir les réflexions dans le câble coaxial, celui-ci devra être terminé avec sa propre impédance caractéristique  $R_1$ . Normalement, un câble de  $50 \Omega$  à  $60 \Omega$  devra être utilisé avec un générateur de  $50 \Omega$  à  $60 \Omega$ . Sinon, des résistances extérieures seront nécessaires à la sortie du générateur pour accorder l'impédance de sortie de l'ensemble générateur au câble de signalisation.

Comme l'impédance de l'ensemble du câble de signalisation terminé par  $R_1$  sera la moitié de  $50 \Omega$  à  $60 \Omega$ , il sera nécessaire d'ajouter une résistance additionnelle  $R_2$  en série avec  $R_1$  pour s'assurer que le système accordé présente une impédance dans la gamme  $50 \Omega$  à  $60 \Omega$  comme la résistance de charge.

Le générateur à double impulsion doit produire deux impulsions ayant un temps de séparation variable entre  $0,2 \mu\text{s}$  et  $100 \mu\text{s}$ , avec un temps de montée  $\leq 20 \text{ ns}$  (10% à 90% de la valeur de crête). Ce dernier devra assurer que le transitoire causé par les impulsions de décharge partielle et les doubles impulsions ont les mêmes composantes en fréquence dans la gamme de la largeur de bande de fréquence du détecteur. Le temps entre la valeur de 10% du front et de la queue ne devra pas excéder 150 ns de façon à déterminer la réponse pour les séparations d'impulsion les plus courtes ( $t = 0,2 \mu\text{s}$ ). A  $100 \mu\text{s}$  de séparation, les détecteurs de DP ne doivent présenter aucune superposition, et ainsi la valeur obtenue sur le détecteur est utilisée comme référence.

A  $0,2 \mu\text{s}$  de séparation, les impulsions se superposeront et la valeur sera le double de la référence. Certaines normes restreignent la gamme d'étalonnage entre  $1 \mu\text{s}$  et  $100 \mu\text{s}$ . Cette restriction n'est pas nécessaire. Il y a beaucoup de générateurs à double impulsion commercialement disponibles couvrant la gamme des  $0,2 \mu\text{s}$ ; l'effet de doublé peut être évalué convenablement.

Bien que le diagramme de double impulsion puisse être obtenu en utilisant l'écran oscillographique du détecteur, il est préférable d'utiliser un oscilloscope séparé avec une base de temps ajustable et une échelle verticale étalonnée pour afficher les deux impulsions de manière adéquate. Un tel oscilloscope sera aussi nécessaire pour mesurer le retard puisqu'une lecture directe est inadéquate pour certains générateurs à double impulsion. Les diagrammes typiques sont représentés aux figures 7, 8 et 9, et l'on peut constater qu'ils ont un aspect correspondant à la figure 14. L'intervalle de temps doit être converti en une longueur en utilisant la formule  $l = \frac{1}{2} \cdot t \cdot v$ . Par un tel calcul, il est possible de définir des longueurs importantes  $l_k$ ,  $l_1$  et  $l_2$ .

unit and detector amplifier is evaluated by injecting two pulses of variable time delay into the load.

The double pulses are injected in the same positions as the calibration pulses in the various test circuits shown in Figures 1 to 3. It should be noted that in the case of circuits shown in Figures 2 and 3 the double pulse generator must be capable of operating with both terminals isolated from earth.

The characteristic impedance of extruded high voltage cables is in the range 10  $\Omega$ -60  $\Omega$ . The worst case for superposition effects is the higher value, 60  $\Omega$ . It is important, therefore, to match the overall load impedance to this value.

Since a common output impedance of commercially available double pulse generators is in the range 50  $\Omega$  to 60  $\Omega$ , the simplest and preferred method of obtaining the double pulse plot is to use such a generator and connect the output directly across the high voltage capacitor  $C_K$  and input unit  $Z_A$  with short unscreened connections. These connections should be as short as possible; experience has shown that up to 3 m would be acceptable. In this case the internal impedance of the generator acts as the load  $R$ . Where the output impedance is not 50  $\Omega$  to 60  $\Omega$  then additional resistors must be connected in series (for lower values) or in parallel (for higher values) with the generator terminals. For longer connections, a coaxial signal cable should be used between the generator and  $C_K$  and  $Z_A$  (see Figure 6). The unscreened part of the connections between the coaxial signal cable and  $C_K$  and  $Z_A$  should again be kept as short as possible and less than 3 m. To prevent reflections in the coaxial cable it must be terminated with its own characteristic impedance  $R_1$ . Normally a 50  $\Omega$  to 60  $\Omega$  cable would be used with a 50  $\Omega$  to 60  $\Omega$  generator. Otherwise, external resistors would be needed at the generator output to match the overall generator output impedance to the signal cable.

Since the overall impedance of the signal cable terminated by  $R_1$  would be half of 50  $\Omega$  to 60  $\Omega$  it is necessary to add an additional resistor  $R_2$  in series with  $R_1$  to ensure that the matched system presents an impedance in the range 50  $\Omega$  to 60  $\Omega$  as the load resistor.

The double pulse generator is required to produce two pulses having a time separation variable between 0.2  $\mu\text{s}$  and 100  $\mu\text{s}$ , with a rise time  $\leq 20$  ns (10% to 90% of peak value). The latter should ensure that transients caused by partial discharge pulses and the double pulses have the same frequency components in the range of the detector frequency bandwidth. The time between the 10% value of the front and the tail should not exceed 150 ns in order to determine the response for the shorter pulse separations ( $t = 0.2 \mu\text{s}$ ). At 100  $\mu\text{s}$  separation PD-detectors do not show any superposition and so the value obtained on the detector is used as the reference.

At 0.2  $\mu\text{s}$  separation the pulses will be superposed and the value will be double the reference. Some standards restrict the range of calibration to between 1  $\mu\text{s}$  and 100  $\mu\text{s}$ . This is an unnecessary restriction. There are many commercially available double pulse generators covering the range 0.2  $\mu\text{s}$ ; the doubling effect can be evaluated properly.

Whilst the double pulse plot can be obtained using the oscillographic display of a detector, it is better to use a separate oscilloscope with a time base adjustable to display the two pulses adequately and with a calibrated vertical scale. Such an oscilloscope would also be needed to measure the time delay since a direct reading from some double pulse generators is inadequate. Typical plots are shown in Figures 7, 8 and 9 and these may be seen to correspond to Figure 14. The time interval may be converted to a length by using the formula  $l = \frac{1}{2} \cdot t \cdot v$ . From such a calculation it is possible to define important lengths  $l_k$ ,  $l_1$  and  $l_2$ .

### 3.2.1.2 Impédance terminale (voir paragraphes 2.3.2 et 2.7)

Les erreurs de superposition peuvent être évitées si un câble est équipé avec extrémité haute tension ayant pour valeur l'impédance caractéristique. Il est important que la résistance utilisée ait la valeur correcte et, pour cette raison, il est nécessaire de contrôler l'extrémité de façon régulière pour s'assurer de son efficacité pour le câble en essai. Normalement l'impédance terminale consiste en des composants basse tension en série avec un condensateur à haute tension. Certaines précautions sont nécessaires pour s'assurer que ce dernier n'engendre pas une combinaison réactive et annule, ainsi, l'emploi de l'extrémité. Les formules appropriées sont données au paragraphe 2.7. Il existe une incitation financière à maintenir les condensateurs haute tension à une valeur de capacité aussi basse que possible et en limitant les erreurs totales à moins de 30%, un changement de  $\pm 15\%$  dans la mesure de  $a_2$ , avec ou sans le condensateur, est autorisé.

Cependant, les prescriptions pour l'impédance de terminaison peuvent signifier une haute tension coûteuse. Des condensateurs de valeur élevée sont donc nécessaires. Ces coûts et le temps pour accorder la valeur de la résistance peuvent influencer certains organismes pour utiliser des techniques différentes.

### 3.2.1.3 Suppresseurs de réflexion (voir paragraphe 2.3.3)

C'est seulement récemment que des supprimeurs électroniques efficaces sont devenus disponibles sur le marché. En conséquence, leur utilisation n'est pas répandue et l'expérience est limitée. Cependant, il n'y a pas de raison pour que cette technique ne devienne pas efficace.

### 3.2.1.4 Charge d'étalonnage (voir paragraphe 2.3.4)

La méthode d'étalonnage par transfert de charge est recommandée et le sujet est discuté dans la Publication 270 de la CEI. Le gain des détecteurs du commerce doit être linéaire, mais le paragraphe 2.3.4 demande que l'étalonnage soit fait au réglage de gain à utiliser. Cela préviendra les erreurs de non-linéarité. De plus, certains détecteurs ont une forme d'onde qui est dépendante du gain et puisque c'est la forme d'onde qui détermine les effets de superposition, c'est plus particulièrement pour prévenir les erreurs dues à cela que le gain est stipulé.

### 3.2.1.5 Sensibilité (voir paragraphe 2.3.5)

Les mesures de décharge sur les câbles sont souvent effectuées aux limites de sensibilité que l'on peut atteindre dans un environnement de câblerie. Cela est usuellement déterminé en considérant les interférences extérieures de fond. Le cas d'utilisation d'un picocoulombmètre sera rare. Un affichage à l'oscilloscope permettra une certaine distinction entre signaux de bruit et de décharge.

## 3.2.2 Méthodes de mesures (voir paragraphe 2.4)

### 3.2.2.1 Courtes longueurs de câble $l < l_k$ (voir paragraphe 2.4.1)

#### a) Prescriptions

Les très courtes longueurs de câble, c'est-à-dire jusqu'à 20 m, se comportent comme des condensateurs où les ondes progressives atteignent les deux extrémités du câble pendant la durée de la décharge dans la vacuole. Ainsi il n'y aura pas d'erreurs de superposition. Cependant, les mesures de décharge sont souvent imprécises lorsque l'on tente d'estimer la grandeur de la décharge. On considère que certaines erreurs de superposition peuvent être tolérées sans altérer les erreurs les plus générales, c'est-à-dire que définir une longueur de câble comme courte, lorsque celui-ci se comporte comme un condensateur, est indûment restrictif. On peut considérer qu'une erreur de superposition jusqu'à 30% est acceptable. On attirera l'attention sur le fait que cette définition est un consensus sur les câbles qui peuvent être essayés en tant que longueurs courtes sans plus de complications. Cependant, en acceptant cela, il est possible d'essayer de cette façon des longueurs jusqu'à 1000 m. La valeur réelle dépendra du circuit d'essai. Elle sera déterminée par un diagramme de double impulsion.

### 3.2.1.2 Terminal impedance (see Sub-clauses 2.3.2 and 2.7)

Superposition errors can be avoided if a cable is fitted with a high voltage termination having the characteristic impedance. It is important that the resistance used has the correct value, and for this reason it is necessary to check the termination regularly to ensure its effectiveness for the cable under test. Normally the terminal impedance consists of low voltage components in series with a high voltage capacitor. Some care is needed to ensure that the latter does not produce a reactive combination and so nullify the use of the termination. Appropriate formulae are given in Sub-clause 2.7. There is a financial incentive to keep high voltage capacitors to as low a capacitance value as possible and, in keeping with the overall containment of errors to within 30%, a change in measurement  $a_2$  with and without the capacitor of  $\pm 15\%$  is allowed.

However, the requirements for termination impedance can mean expensive high voltage; high value capacitors are therefore needed. These costs and time to match the resistor value may influence some organizations to use alternative techniques.

### 3.2.1.3 Reflection suppressors (see Sub-clause 2.3.3)

It is only recently that effective electronic suppressors have become commercially available. Consequently, their use is not widespread, and experience is limited. However, there is no reason why this technique should not become an effective one.

### 3.2.1.4 Calibration charge (see Sub-clause 2.3.4)

The charge transfer method of charge calibration is recommended and the background to this is discussed in IEC Publication 270. The gain of commercial detectors should be linear but Sub-clause 2.3.4 requires calibration to be made at the gain setting to be used. This will prevent non-linearity errors. Additionally, some detectors have a wave shape which is gain dependent and since it is the waveshape which determines the superposition effect, it is particularly to prevent errors due to this that the gain requirement is stipulated.

### 3.2.1.5 Sensitivity (see Sub-clause 2.3.5)

Discharge measurements on cables are often made at the limits of sensitivity attainable in the cable factory environment. This is usually determined by external background interference. It will rarely be the case that a picocoulomb meter can be used. An oscilloscope display will allow some identification between noise and discharge signals.

## 3.2.2 Measurement procedures (see Sub-clause 2.4)

### 3.2.2.1 Short cable lengths $l < l_k$ (see Sub-clause 2.4.1)

#### a) Requirements

Very short cable lengths, say up to 20 m, behave as capacitors where the travelling wave reaches both ends of the cable within the duration of the discharge in the void. As such there will be no superposition errors. However, discharge measurements are often imprecise when attempting to estimate discharge magnitude. It is considered that some superposition errors can be tolerated without impairing the more general errors, i.e. that to define a short length such as that where the cable behaves as a capacitor is unjustifiably restrictive. It is considered that a superposition error of up to 30% would be acceptable. It should be emphasized that this is a consensus definition of which cables may be tested as short lengths without further complications. However, by accepting this, it may be possible to test lengths up to 1000 m in this way. The actual value will depend upon the test circuit. It would be determined from a double pulse plot.

Les courtes longueurs de câble sont celles qui correspondent aux extrémités de droite de a) et b) de la figure 14 ou de gauche aux figures 7, 8, et 9. A l'intérieur de la région de superposition positive, la longueur courte  $l = l_k$  est définie comme celle où l'onde de tension résultant de la superposition des trains d'ondes incidents et réfléchis s'est réduite à 70% de la valeur  $a_2$  obtenue par une décharge située à l'extrémité éloignée du détecteur, c'est-à-dire  $A_1/A_{100} = 1,4$  dans les figures 7, 8 et 9. Cependant, les longueurs jusqu'à  $2 l_k$  se comportent comme des longueurs courtes, lorsque les deux extrémités du câble sont connectées ensemble et  $a_2 \geq a_1$  (voir figure 15).

b) *Vérification de la sensibilité*

A des fins d'étalonnage, le dispositif d'étalonnage est connecté à l'extrémité éloignée du détecteur. Cela compensera n'importe quelle atténuation et limitera l'erreur de superposition à moins de 30%.

3.2.2.2 *Grandes longueurs de câble  $l > l_k$  sans impédance terminale (voir paragraphe 2.4.2)*

a) *Prescriptions*

Pour des longueurs supérieures à  $l_k$ , les erreurs seront en général supérieures à 30%. Si le circuit d'essai, le détecteur et la longueur de câble sont essayés dans une région de superposition positive (voir figure 7), l'erreur due à la superposition sera comprise entre 0% et 100%. En effectuant, tour à tour, une détection à chaque extrémité du câble comme montré à la figure 16, il est possible de s'assurer que les erreurs de superposition ne pourront être que surestimées. Une décroissance du signal original sera causée seulement par atténuation et cette réduction pourra être calculée et compensée pour être inférieure à 30% en utilisant une valeur de facteur de correction  $F$  dans l'équation d'étalonnage.

Cependant, dans les régions de superposition négative, une sous-estimation de la grandeur de la décharge apparaît — et l'étendue ne peut être calculée. Bien que certaines normes acceptent une superposition négative de 15%, il existe des possibilités d'éviter ces conditions — en modifiant le circuit d'essai ou la réponse de l'amplificateur — suffisantes pour qu'il ne soit pas nécessaire d'effectuer un quelconque essai lorsqu'une superposition négative peut apparaître. Lorsqu'une superposition négative peut se produire avec n'importe quelle combinaison de circuit d'essai/amplificateur, la recommandation est que les longueurs de câble correspondant à la superposition négative ne soient pas essayées. Les longueurs correspondant à  $t_1$  et  $t_2$ , représentées aux figures 8 et 9, comme  $2 l_2 > l > 2 l_1$  où  $A_1/A_{100} < 1$  sont considérées comme dans la zone interdite pour le circuit d'essai.

Lorsque les deux extrémités du câble sont connectées ensemble, les conditions suivantes doivent être appliquées:

le diagramme de double impulsion doit être du type 1 (voir figure 7);

$$a_2 \geq a_1$$

alors l'erreur maximale due à l'atténuation est toujours inférieure à 30% (voir figure 15).

b) *Vérification de la sensibilité*

Les erreurs d'atténuation peuvent être calculées en utilisant la formule donnée au point b) du paragraphe 2.4.2 avec un facteur de correction  $F$ . Sans atténuation, la valeur mesurée en injectant  $a_2$  à l'extrémité éloignée du détecteur sera  $2 \times a_1$  tandis que, avec atténuation,  $a_2$  devient inférieure à  $2 \times a_1$ . Le critère de validité doit être que l'erreur ne dépasse pas 30%. Comme montré à la figure 16, l'erreur d'atténuation est la plus grande au centre du câble si les mesures sont effectuées à chaque extrémité, tour à tour, et la plus grande valeur est retenue. Le critère est donc que la valeur mesurée soit  $a(x = \frac{1}{2} l) \geq 0,7 a_1$  ( $a_1$  étant la valeur mesurée due à la décharge de l'extrémité la plus proche du détecteur). L'atténuation suit une loi exponentielle, c'est-à-dire:

$$a(x) = a_1 \exp(-\gamma \cdot x)$$

Si la valeur  $a_2$  est mesurée avec superposition pour une décharge à l'extrémité éloignée du détecteur,  $x = l$ , la valeur sans superposition est  $a_2/2$  (comme montré à la figure 13)

c'est-à-dire  $a(x = l) = a_2/2 = a_1 \exp(-\gamma \cdot l)$

Short lengths of cable are those corresponding to the extreme right-hand parts of a) and b) in Figure 14 or the left-hand part of Figures 7, 8 and 9. Within the region of positive superposition the short length  $l = l_k$  is defined as that where the voltage wave resulting from superposition from incident and reflected wavetrains has reduced to 70% of the value  $a_2$  obtained from a discharge at the end remote from the detector, i.e.  $A_l/A_{100} = 1.4$  in Figures 7, 8 and 9. However, lengths up to  $2 l_k$  behave as short lengths when both ends of the cable are connected together and  $a_2 \geq a_1$  (see Figure 15).

b) *Verification of sensitivity*

For calibration purposes the calibrator is connected to the end remote from the detector. This will compensate for any attenuation and limit the error of superposition to less than 30%.

3.2.2.2 *Long cable lengths  $l > l_k$  without a terminal impedance (see Sub-clause 2.4.2)*

a) *Requirements*

For lengths greater than  $l_k$  errors in general will be larger than 30%. If the test circuit, detector and cable length are tested in a positive superposition region (see Figure 7) the error due to superposition would be between 0% and 100%. By detecting from each end of the cable in turn, as shown in Figure 16, it is possible to ensure that superposition errors can only result in an overestimate. A decrease in the original signal can be caused by attenuation only and this reduction can be calculated and compensated to be less than 30% by using a value of a correction factor  $F$  in the calibration equation.

However, in regions of negative superposition, an underestimate of discharge magnitude occurs—and the extent cannot be calculated. Although some standards accept a 15% negative superposition, there are sufficient possibilities for avoiding these conditions—by altering the test circuit or amplifier response—so that there is no need for any test to be made where negative superposition may occur. Where negative superposition can occur with any test circuit/amplifier combination the recommendation is that cable lengths corresponding to negative superposition are not tested. Lengths corresponding to  $t_1$  and  $t_2$  are shown in Figures 8 and 9 as  $2l_2 > l > 2l_1$  where  $A_l/A_{100} < 1$  are considered to be forbidden for the test circuit.

When both ends of the cable are connected together the following conditions shall apply:

the double pulse diagram shall be of type 1 (see Figure 7);

$$a_2 \geq a_1$$

then the maximum error due to attenuation is always smaller than 30% (see Figure 15).

b) *Verification of sensitivity*

Attenuation errors may be calculated using the formulae given in Item b) of Sub-clause 2.4.2 for a correction factor  $F$ . With no attenuation, the value measured by injecting at the end remote from the detector  $a_2$  would be  $2 \times a_1$ , whilst with attenuation,  $a_2$  will become less than  $2 \times a_1$ . The valid criterion must be that the error should not exceed 30%. As shown in Figure 16, the attenuation error is greatest at the centre of the cable if measurements are made from each end in turn and the higher value is considered. The criterion is, therefore, that the value measured is  $a(x = \frac{1}{2}l) \geq 0.7 a_1$  ( $a_1$  being the value measured due to a discharge at the end nearest the detector). Attenuation follows an exponential law, i.e.

$$a(x) = a_1 \exp(-\gamma \cdot x)$$

If the value  $a_2$  is measured with superposition from a discharge at the end remote from the detector,  $x = l$ , the value without superposition is  $a_2/2$  (as shown in Figure 13)

$$\text{i.e. } a(x = l) = a_2/2 = a_1 \exp(-\gamma \cdot l)$$

$$\text{ou } \gamma l = 1_n \left( \frac{2a_1}{a_2} \right)$$

$$\text{et } a(x = 1/2l) = a_1 \exp\left(-1/2 \cdot 1_n \frac{2a_1}{a_2}\right) \geq 0,7 a_1$$

$$\text{c'est-à-dire } \sqrt{\frac{a_1 \cdot a_2}{2}} \geq 0,7 a_1$$

$$\text{ou } a_2 \geq 0,98 a_1$$

Alors, à condition que  $a_2 \geq a_1$ , l'atténuation ne produira pas d'erreur supérieure à 30%. Pour une longueur de câble plus grande, pour laquelle  $a_2 < a_1$ , il est nécessaire de calculer une valeur avec un facteur de correction  $F$  et d'introduire celui-ci dans l'équation d'étalonnage.

$$F \cdot a(x = 1/2l) \geq 0,7 a_1$$

$$F \cdot \sqrt{\frac{a_1 \cdot a_2}{2}} \geq 0,7 a_1$$

$$\text{ou } F = \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}$$

### c) Modalité d'essai

Le paragraphe 2.4.2 prescrit que pour les longueurs  $l > l_k$  un essai de décharge soit effectué d'abord à une extrémité et ensuite à l'autre. Les raisons en sont évidentes si l'on se réfère aux figures 17, 18, 19 et 20. Pour les longueurs  $l > l_1$  (330 m dans cet exemple) une sous-estimation de la grandeur de décharge peut se produire dans la région de superposition négative entre  $l_1$  et  $l_2$ , comme à la figure 17, si la mesure est effectuée seulement à une extrémité. Cependant, en essayant à la deuxième extrémité et en prenant la plus grande valeur de la grandeur de la décharge comme vraie valeur, l'erreur négative peut être évitée (voir la courbe résultante — — de la figure 18). Cela n'est pas le cas pour les longueurs entre  $2l_1$  et  $2l_2$  (les longueurs interdites  $2l_1 \leq l \leq 2l_2$ ) comme représenté à la figure 19: les erreurs de décharge négatives au centre du câble ne peuvent être évitées et cela est la zone interdite. Pour les longueurs  $l \leq 2l_1$  seule la superposition positive pourra se produire (figure 20).

### 3.2.2.3 Grandes longueurs de câble essayées avec une impédance terminale (voir paragraphe 2.4.3)

#### b) Vérification de la sensibilité

Avec un câble correctement terminé, la courbe correspondant aux points  $x$  de la figure 14 est obtenue. La réponse avec le dispositif d'étalonnage à l'extrémité éloignée,  $a_2$  est inférieure à  $a_1$ . Si seule  $a_2$  est utilisée à des fins d'étalonnage, les décharges les plus près du détecteur seront surestimées. Pour une fabrication de haute qualité, il est rare que des décharges soient détectées aux niveaux de la tension spécifiée. Il est donc convenable d'effectuer l'essai en l'absence de décharges pour une sensibilité déterminée à partir de  $a_2$ .

Si des décharges sont détectées, l'étalonnage aux deux extrémités du câble est utilisé de façon à déterminer le niveau réel aussi précisément que possible. La méthode utilisant un facteur de correction  $F$  (voir point *b*) du paragraphe 2.4.2) n'est pas permise parce qu'une erreur possible de  $\pm 15\%$  pour l'impédance terminale doit être prise en compte.

Une décharge de grandeur  $q$  à une position  $x$  peut produire une réponse  $A_1$ . Avec la longueur, l'atténuation suit une loi exponentielle, c'est-à-dire:

$$A_1 = E \cdot q \cdot \exp(-\gamma \cdot x)$$

où  $E$  est une constante de l'appareillage

$$\text{or } \gamma l = 1_n \left( \frac{2a_1}{a_2} \right)$$

$$\text{and } a(x = 1/2l) = a_1 \exp\left(-1/2 \cdot 1_n \frac{2a_1}{a_2}\right) \geq 0.7 a_1$$

$$\text{i.e. } \sqrt{\frac{a_1 \cdot a_2}{2}} \geq 0.7 a_1$$

$$\text{or } a_2 \geq 0.98 a_1$$

Thus provided  $a_2 \geq a_1$  the attenuation will not produce an error greater than 30%. For a longer cable length, for which  $a_2 < a_1$ , it is necessary to calculate a value for a correction factor  $F$  and insert it in the calibration equation.

$$F \cdot a(x = 1/2l) \geq 0.7 a_1$$

$$F \cdot \sqrt{\frac{a_1 \cdot a_2}{2}} \geq 0.7 a_1$$

$$\text{or } F = \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}$$

### c) Test procedure

Sub-clause 2.4.2 requires that for lengths  $l > l_k$  a discharge test is made first from one end and then the other end. The reasons for this can be clearly seen from Figures 17, 18, 19 and 20. For lengths  $l > l_1$  (330 m in this example) an underestimate of discharge magnitude could occur in a region of negative superposition between  $l_1$  and  $l_2$ , as in Figure 17, if the measurement is made from one end only. However, by testing from the second end and by taking the higher value of discharge magnitude as the true value, the negative error can be avoided (see the resulting curve -.- in Figure 18). This is not the case for lengths between  $2l_1$  and  $2l_2$  (the forbidden lengths  $2l_1 \leq l \leq 2l_2$ ) as shown in Figure 19; negative errors from discharges in the centre of the cable cannot be avoided and this is the forbidden region. For lengths  $l \leq 2l_1$  only positive superposition will occur (Figure 20).

### 3.2.2.3 Long cable lengths tested with a terminal impedance (see Sub-clause 2.4.3)

#### b) Verification of sensitivity

With a correctly terminated cable, the curve corresponding to the points  $x$  of Figure 14 is obtained. The response with the calibrator at the far end,  $a_2$  is less than  $a_1$ . If only  $a_2$  is used for calibration purposes, discharges nearer to the detector will be overestimated. With high quality manufacture, it is rare for discharges to be detected at specification voltage levels. It is adequate, therefore, to test establishing discharge freedom to a sensitivity defined from  $a_2$ .

If discharges are detected the calibration from both cable ends is used in order to determine the actual level as accurately as possible. The method using a correction factor  $F$  (see Item b) of Sub-clause 2.4.2) is not permitted because a possible error of  $\pm 15\%$  for the terminal impedance has to be taken into account.

A discharge of magnitude  $q$  at a position  $x$  might produce a response  $A_1$ . Attenuation with length follows an exponential relationship i.e.:

$$A_1 = E \cdot q \cdot \exp(-\gamma \cdot x)$$

where  $E$  is an equipment constant

Avec le détecteur connecté à l'autre extrémité du câble, on trouve une réponse  $A_2$

$$A_2 = E \cdot q \exp(-\gamma(l-x))$$

Si une charge d'étalonnage  $q_{\text{cal}}$  est utilisée à  $x = 0$  et  $x = l$  pour obtenir une réponse  $a_1$  et  $a_2$

$$a_1 = E \cdot q_{\text{cal}} \text{ et } a_2 = E \cdot q_{\text{cal}} \exp(-\gamma l)$$

$$\text{pour laquelle } A_1 A_2 = E^2 \cdot q^2 \exp(-\gamma l)$$

$$\text{et } a_1 a_2 = E^2 \cdot q_{\text{cal}}^2 \exp(-\gamma l)$$

$$\text{ou } q = q_{\text{cal}} \sqrt{\frac{A_1 A_2}{a_1 a_2}}$$

### 3.3 Bibliographie

Publication 885-2 de la CEI (1987): Méthodes d'essais électriques pour câbles électriques, Deuxième partie: Essais de décharges partielles.

ICEA Publication T-24-380 (1980): Guide for partial discharge test procedures.

VDE 0472 Teil 513/07.82 bzw DIN 57472 Teil 513/07.82 Prüfung an Kabeln und isolierten Leitungen, Teilentladungen.

Publication 270 de la CEI (1981): Mesure des décharges partielles.

CIGRÉ Rapport 21-01, Annexe IV (1968): Mesure de décharges sur les grandes longueurs de câbles: Prévention des erreurs dues à la superposition des ondes mobiles.

Electra (mars 1969): Mesure de décharges sur les grandes longueurs de câbles.

Lukaschewitsch, A.; Puff, E.; Messung von Teilentladungen (TE) an langen Kabeln; Energie, Heft 2 (Febr. 1976), S. 32-39.

Van Hove, C.; Lippert, A.; Wiznerowicz, F.; Interferenzerscheinungen bei der Teilentladungsmessung an langen Kabeln; Elektrizitätswirtschaft 73 (1974), S. 776-780.

Borsi, H.; Verfahren zur Messung von Teilentladungen an Hochspannungskabeln unter Berücksichtigung des Einflusses der Kabeldaten; Ankoppelungsvierpole und Meßsysteme, Diss. T.U. Hannover (Juni 1976).

With the detector connected to the other end of the cable a response  $A_2$  is found

$$A_2 = E \cdot q \exp(-\gamma(l-x))$$

If a calibration charge  $q_{\text{cal}}$  is used at  $x = 0$  and  $x = l$  to yield a response  $a_1$  and  $a_2$

$$a_1 = E \cdot q_{\text{cal}} \text{ and } a_2 = E \cdot q_{\text{cal}} \exp(-\gamma l)$$

$$\text{for which } A_1 A_2 = E^2 \cdot q^2 \exp(-\gamma l)$$

$$\text{and } a_1 a_2 = E^2 \cdot q_{\text{cal}}^2 \exp(-\gamma l)$$

$$\text{or } q = q_{\text{cal}} \sqrt{\frac{A_1 A_2}{a_1 a_2}}$$

### 3.3 Bibliography

IEC Publication 885-2 (1987): Electrical test methods for electric cables, Part 2: Partial discharge tests.

ICEA Publication T-24-380 (1980) Guide for partial discharge test procedures.

VDE 0472 Teil 513/07.82 bzw DIN 57472 Teil 513/07.82 Prüfung an Kabeln und isolierten Leitungen, Teilentladungen.

IEC Publication 270 (1981) Partial discharge measurements.

CIGRÉ Report 21-01, Appendix IV (1968) Discharge measurements in long lengths of cable: prevention of errors due to superposition of travelling waves.

Electra (March 1969), Discharge measurement in long lengths of cable.

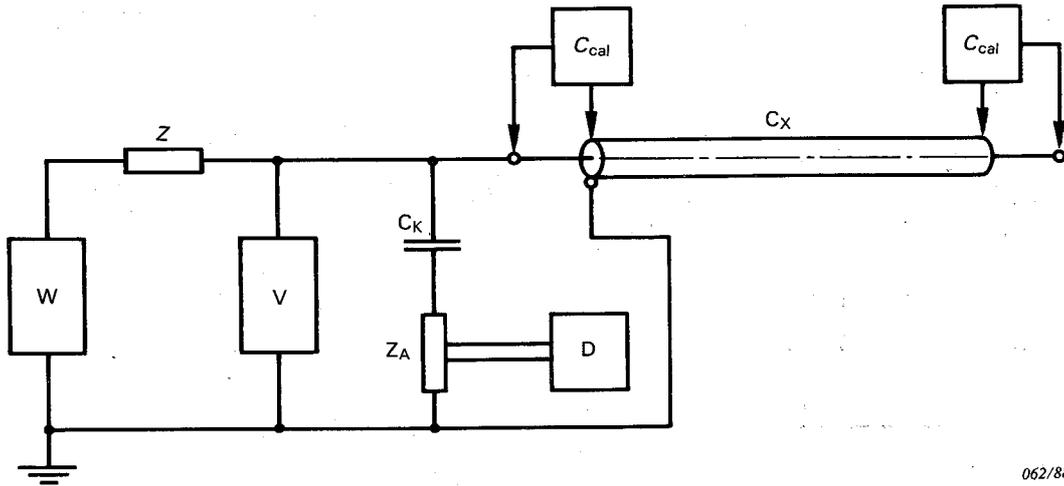
Lukaschewitsch, A., Puff, E., Messung von Teilentladungen (TE) and langen Kabeln, Energie, Heft 2 (Febr. 1976), S.32-39.

Van Hove, C., Lippert, A. Wiznerowicz, F., Interferenzerscheinungen bei der Teilentladungsmessung an langen Kabeln, Elektrizitätswirtschaft 73 (1974), S. 776-780.

Borsi, H., Verfahren zur Messung von Teilentladungen an Hochspannungskabeln unter Berücksichtigung des Einflusses der Kabeldaten, Ankoppelungsvierpole und Meßsysteme, Diss. T.U. Hannover (Juni 1976).

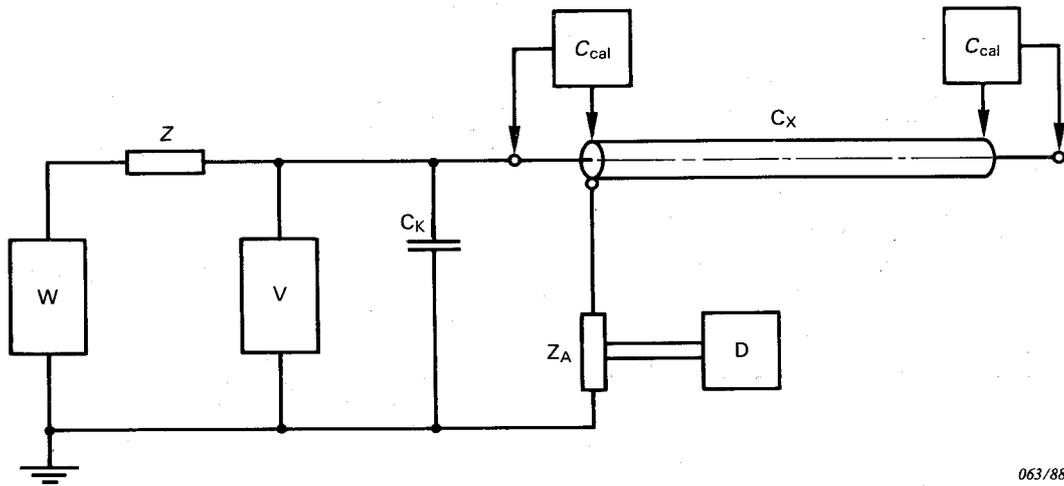
LISTE DES SYMBOLES — LIST OF SYMBOLS

W	=	alimentation de puissance — power supply
V	=	indicateur de tension — voltage indicator
Z	=	impédance / filtre — impedance / filter
Z <sub>A</sub>	=	unité d'entrée — input unit
Z <sub>w</sub>	=	impédance terminale — terminal impedance
C <sub>x</sub>	=	câble de puissance — power cable
C <sub>K</sub>	=	condensateur de couplage — coupling capacitor
D	=	détecteur — detector
C <sub>cal</sub>	=	dispositif d'étalonnage — calibrator
RS	=	suppresseur de réflexion — reflection suppressor
I	=	générateur à double impulsion — double pulse generator
M	=	câble de liaison coaxial — coaxial signal cable
R <sub>1</sub> R <sub>2</sub>	=	résistance d'adaptations — matching resistors



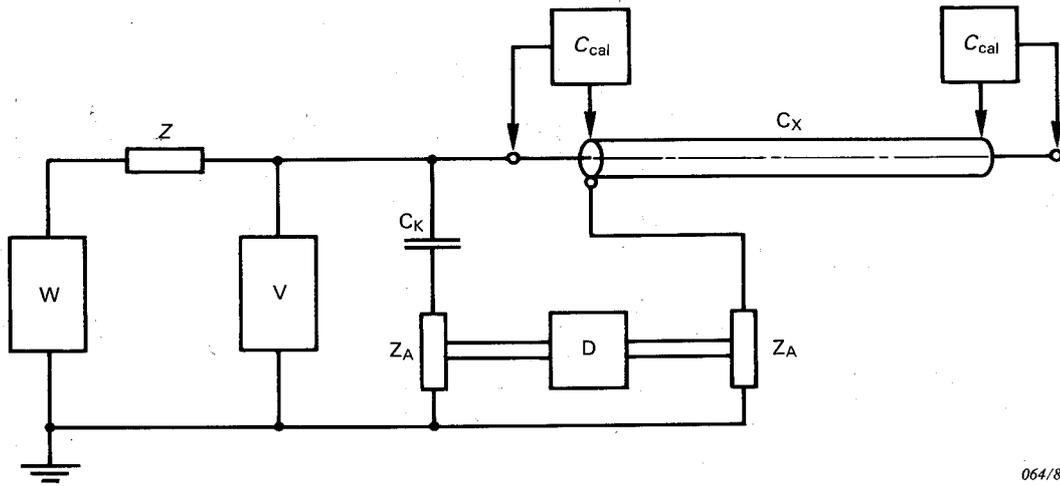
062/88

FIG. 1. — Unité d'entrée  $Z_A$  connectée en série avec le condensateur de couplage,  $C_K$ .  
Input unit  $Z_A$  connected in series with the coupling capacitor,  $C_K$ .



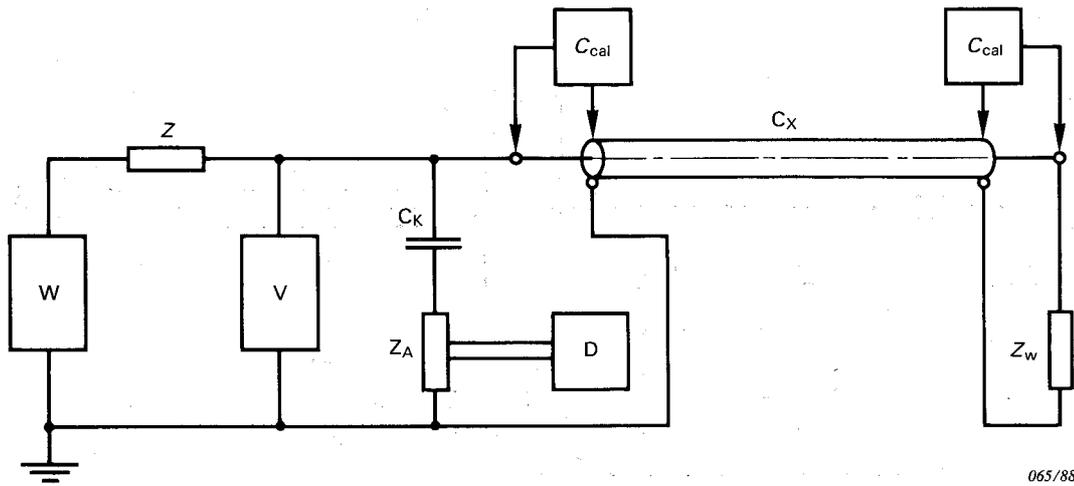
063/88

FIG. 2. — Unité d'entrée  $Z_A$  connectée en série avec le câble,  $C_X$ .  
Input unit  $Z_A$  connected in series with the cable,  $C_X$ .



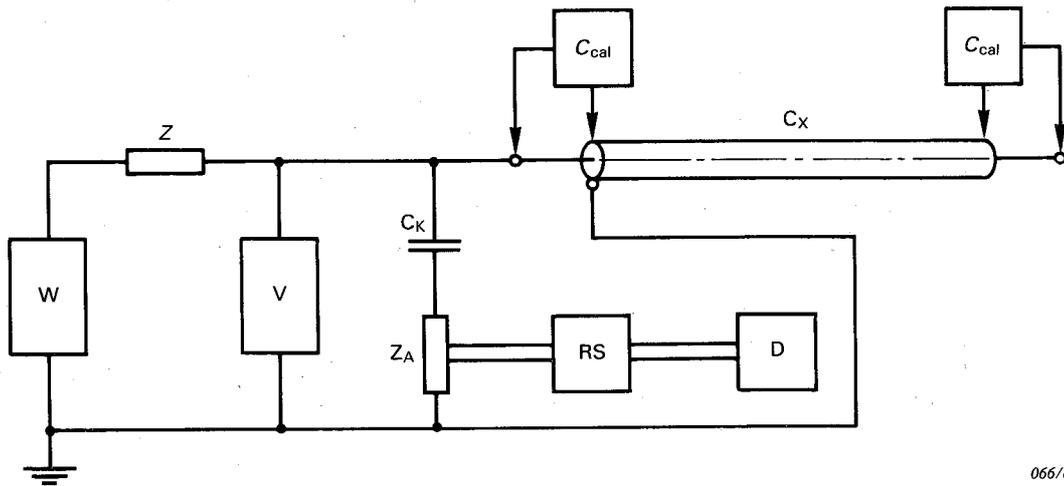
064/88

FIG. 3. — Circuit en pont. — Bridge circuit.



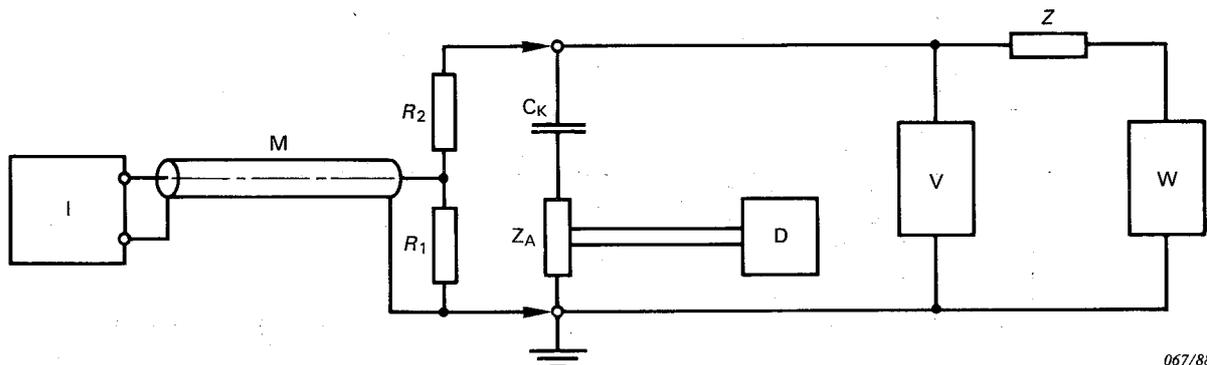
065/88

FIG. 4. — Connexion de l'impédance terminale,  $Z_w$ .  
Connection of the terminal impedance,  $Z_w$ .



066/88

FIG. 5. — Connexion du suppresseur de réflexion, RS.  
Connection of the reflection suppressor, RS.



067/88

$R_1$  = Résistance d'adaptation de valeur correspondant à l'impédance caractéristique du câble de liaison coaxial M  
 $R_2$  = Résistance d'adaptation de valeur  
 $R_2 = R - \frac{R_1}{2}$  (résistance de charge  $R \sim 50 \Omega$  à  $60 \Omega$ )

$R_1$  = Matching resistor with a value corresponding to the characteristic impedance of the coaxial signal cable M  
 $R_2$  = Matching resistor with a value  
 $R_2 = R - \frac{R_1}{2}$  (load resistance  $R \sim 50 \Omega$  to  $60 \Omega$ )

FIG. 6. — Connexion du générateur à double impulsion dans le circuit de mesure illustré à la figure 1.  
Connection of the double pulse generator into the measuring circuit in Figure 1.

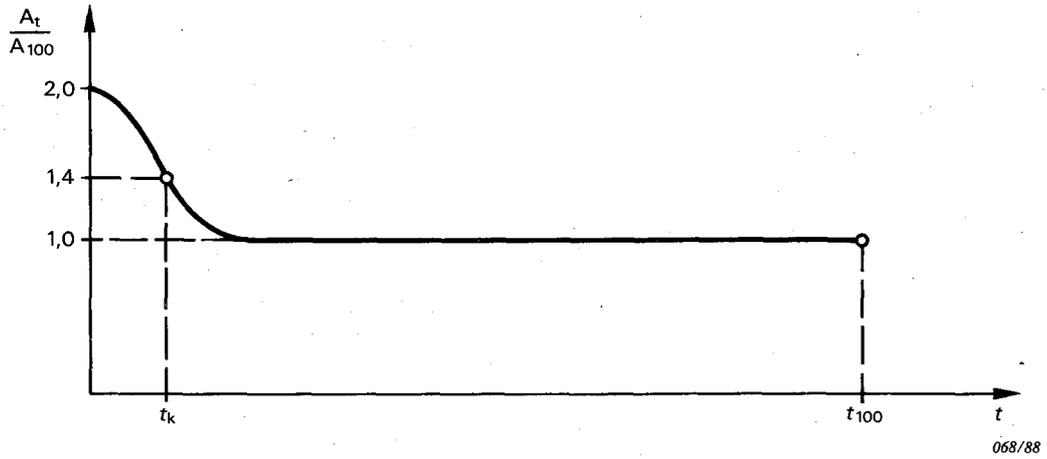


FIG. 7. — Diagramme de double impulsion type 1 sans superposition négative.  
Double pulse diagram type 1 without negative superposition.

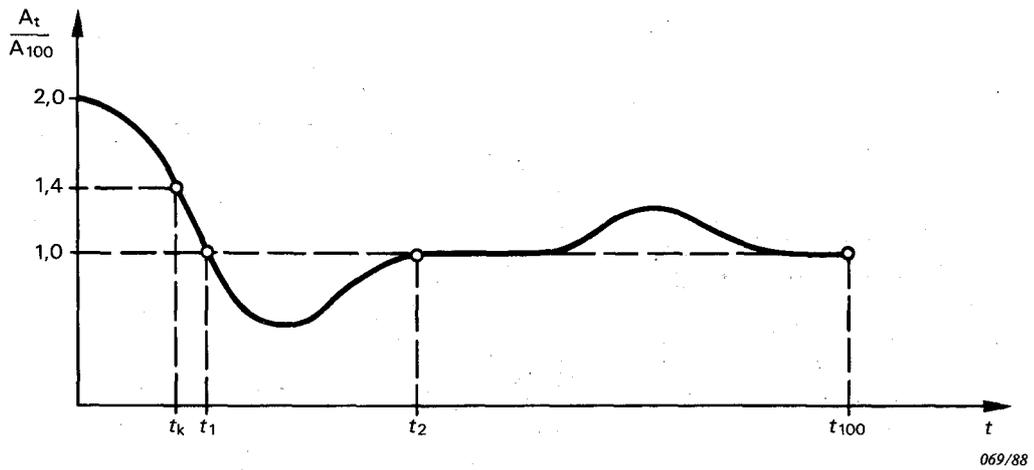


FIG. 8. — Diagramme de double impulsion type 2 avec superposition négative entre  $t_1$  et  $t_2$ . L'influence de la superposition positive entre  $t_2$  et  $t_{100}$  est négligeable.  
Double pulse diagram type 2 with negative superposition between  $t_1$  and  $t_2$ . The influence of the positive superposition between  $t_2$  and  $t_{100}$  is negligible.

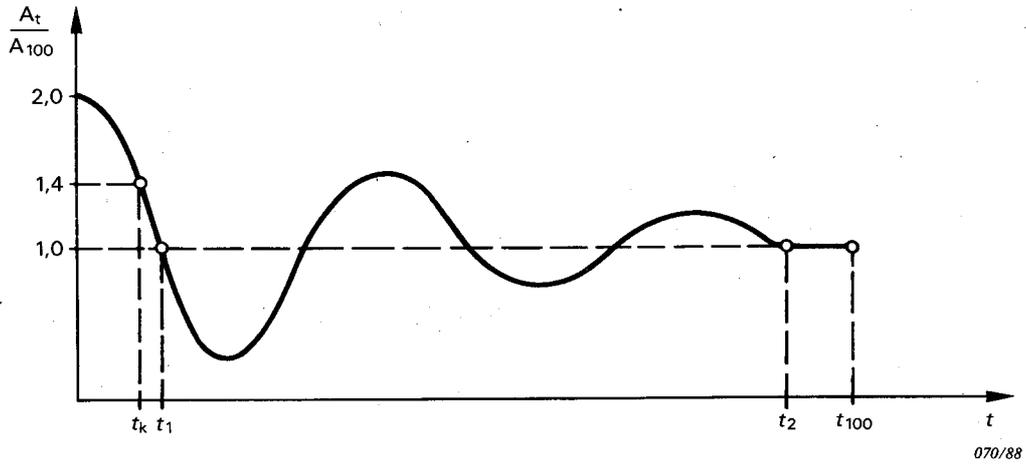


FIG. 9. — Diagramme de double impulsion type 3 avec superpositions négative et positive entre  $t_1$  et  $t_2$ .  
 Double pulse diagram type 3 with negative and positive superpositions between  $t_1$  and  $t_2$ .

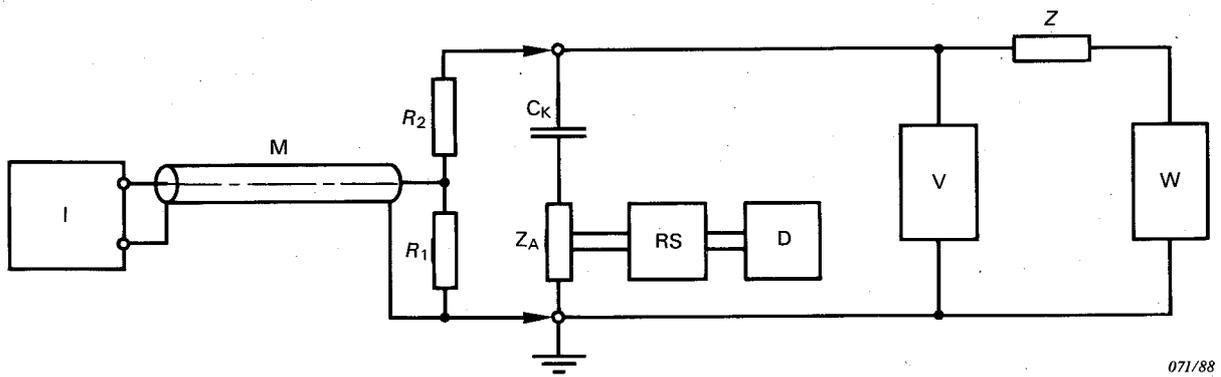


FIG. 10. — Connexion du générateur à double impulsion pour le circuit d'essai illustré à la figure 5 avec le suppresseur de réflexion.  
 Connection of the double pulse generator for the test circuit in Figure 5 with the reflection suppressor.

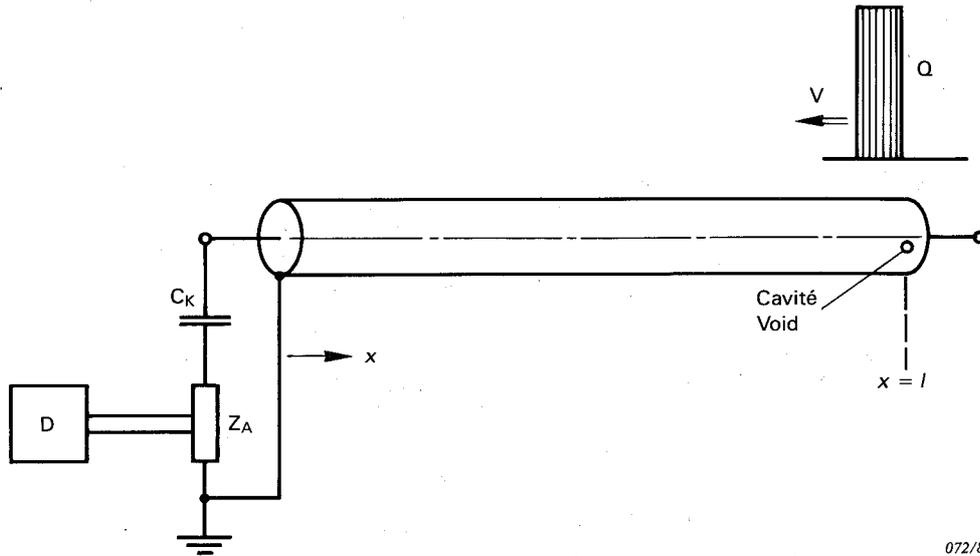


FIG. 11. — Décharge située exactement à l'extrémité du câble éloignée du détecteur ( $x = l$ ).  
Discharge site exactly at the cable end remote from the detector ( $x = l$ ).

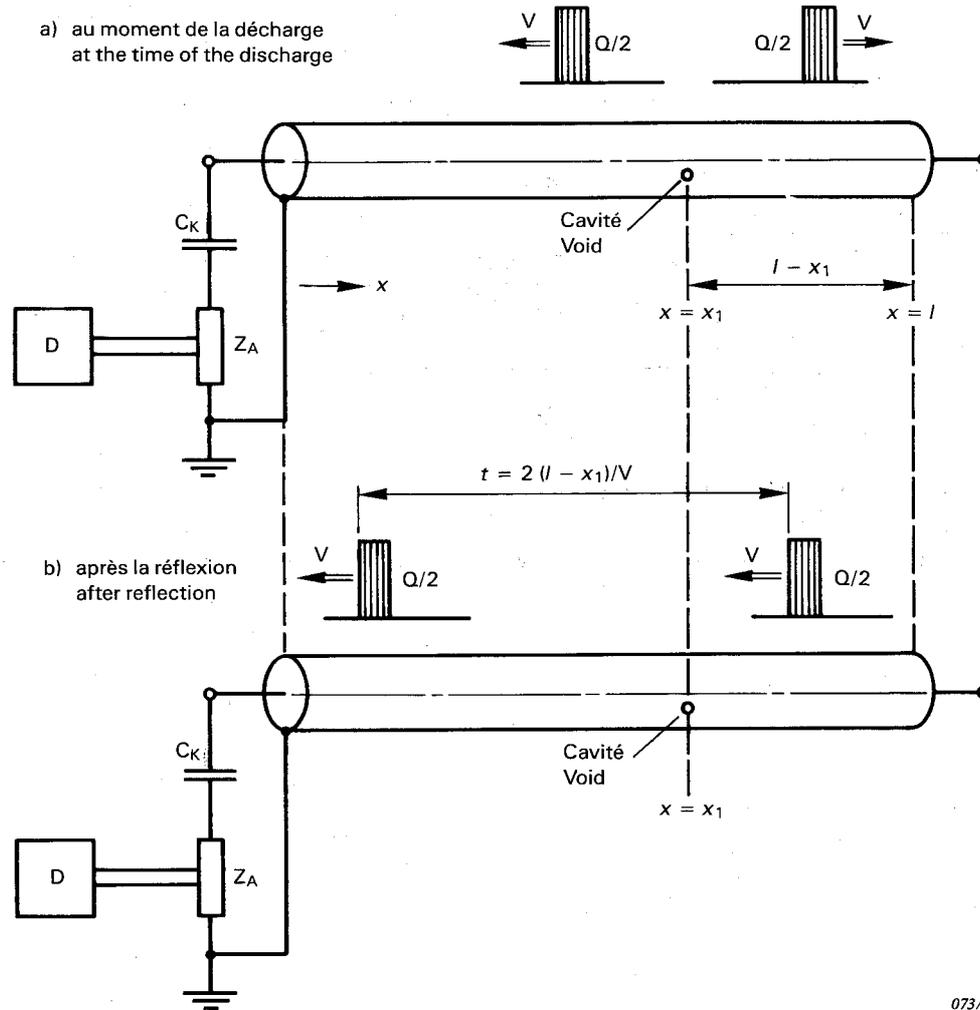


FIG. 12. — Décharge située à une distance  $x = x_1$ . Ondes progressives.  
Discharge site at a distance  $x = x_1$ . Travelling waves.

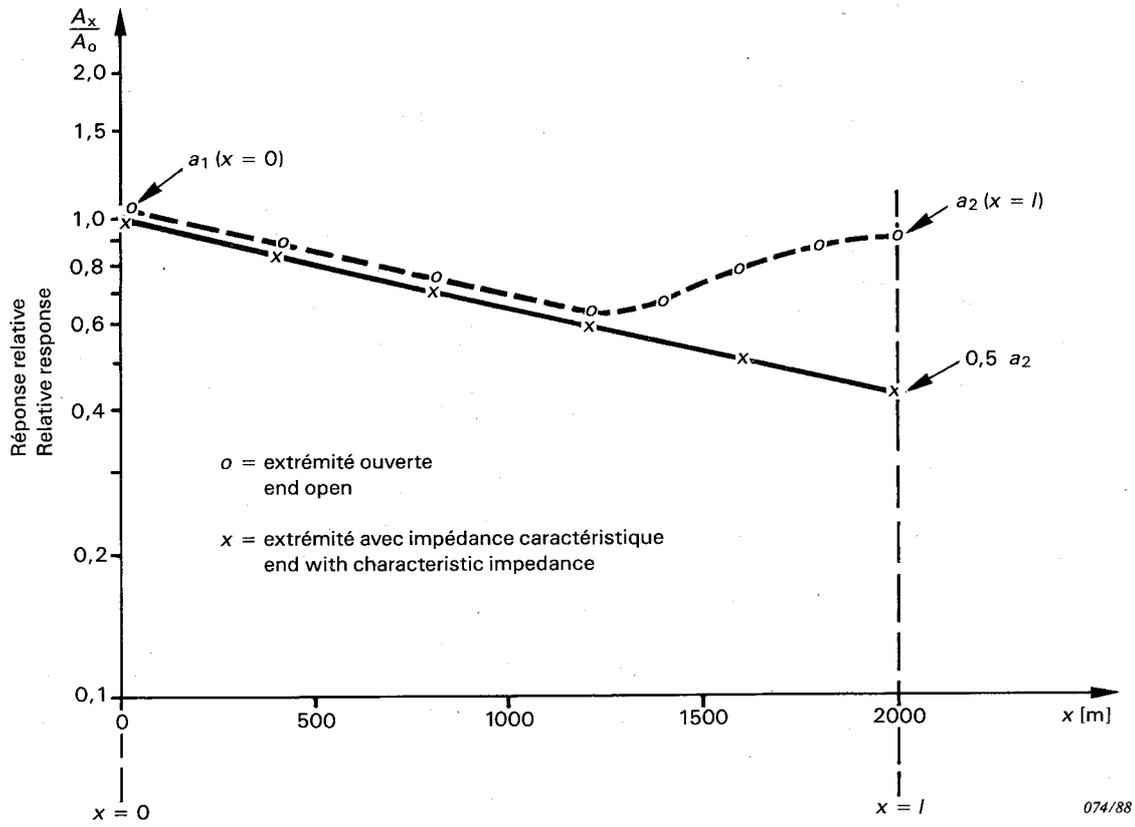


FIG. 13. — Atténuation des impulsions de décharges partielles le long du câble.  
 Attenuation of PD pulses along the cable.

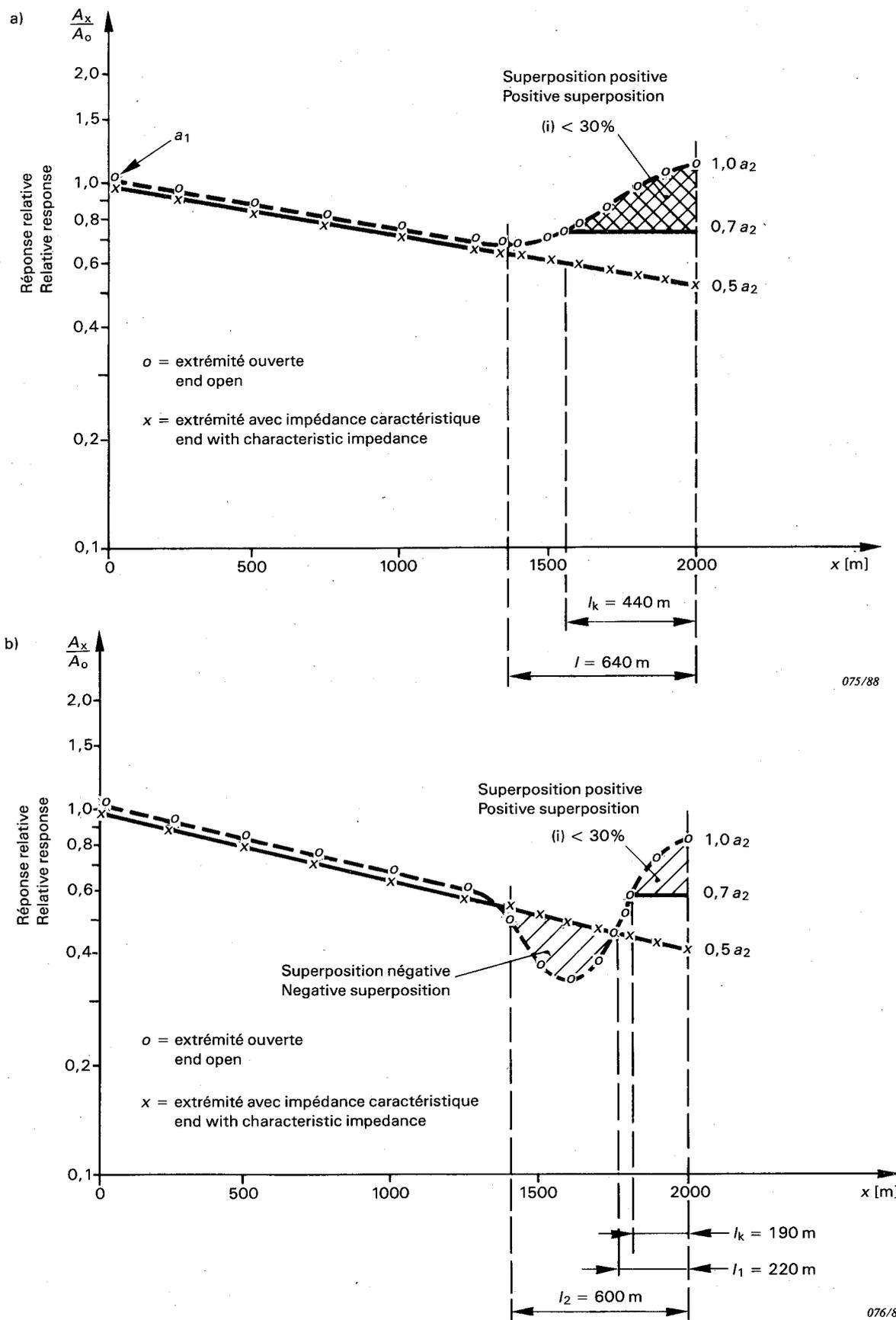


FIG. 14. — Superposition et atténuation des impulsions des décharges partielles.  
Superposition and attenuation of PD pulses.

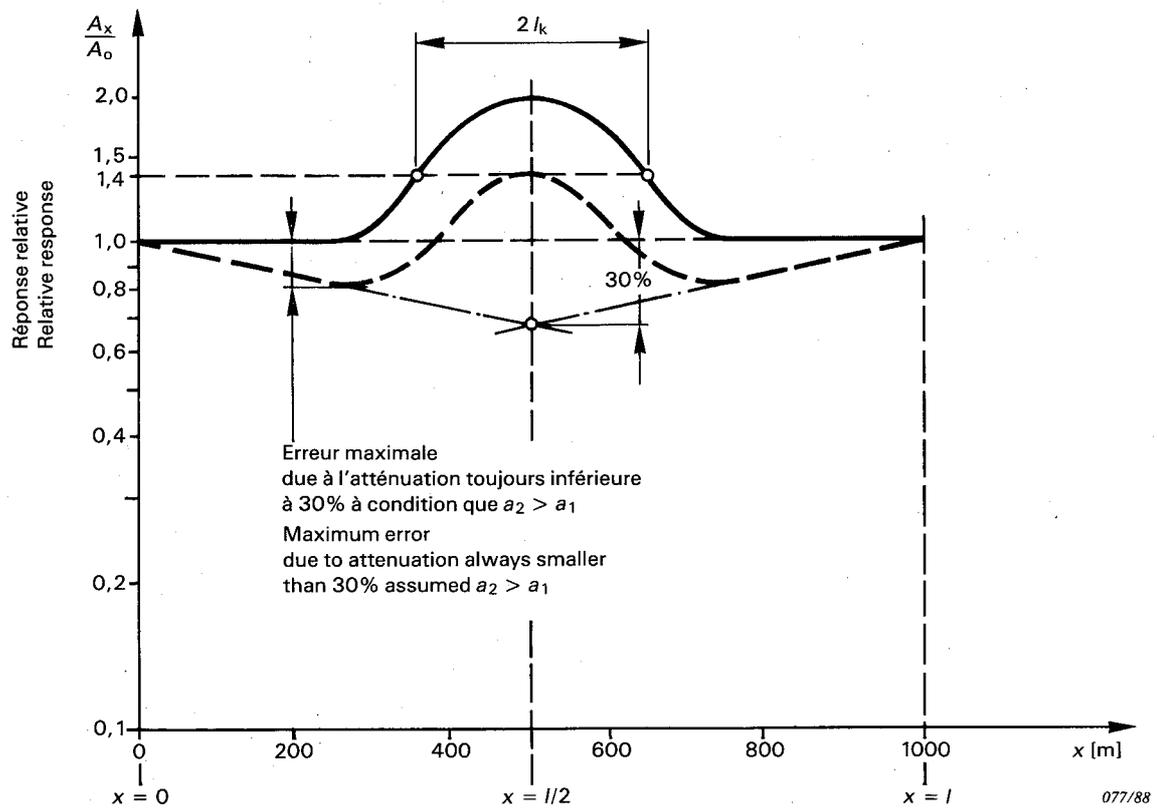


FIG. 15. — Erreur maximale d'atténuation les deux extrémités du câble étant connectées ensemble.  
 Maximum attenuation error, both cable ends connected together.

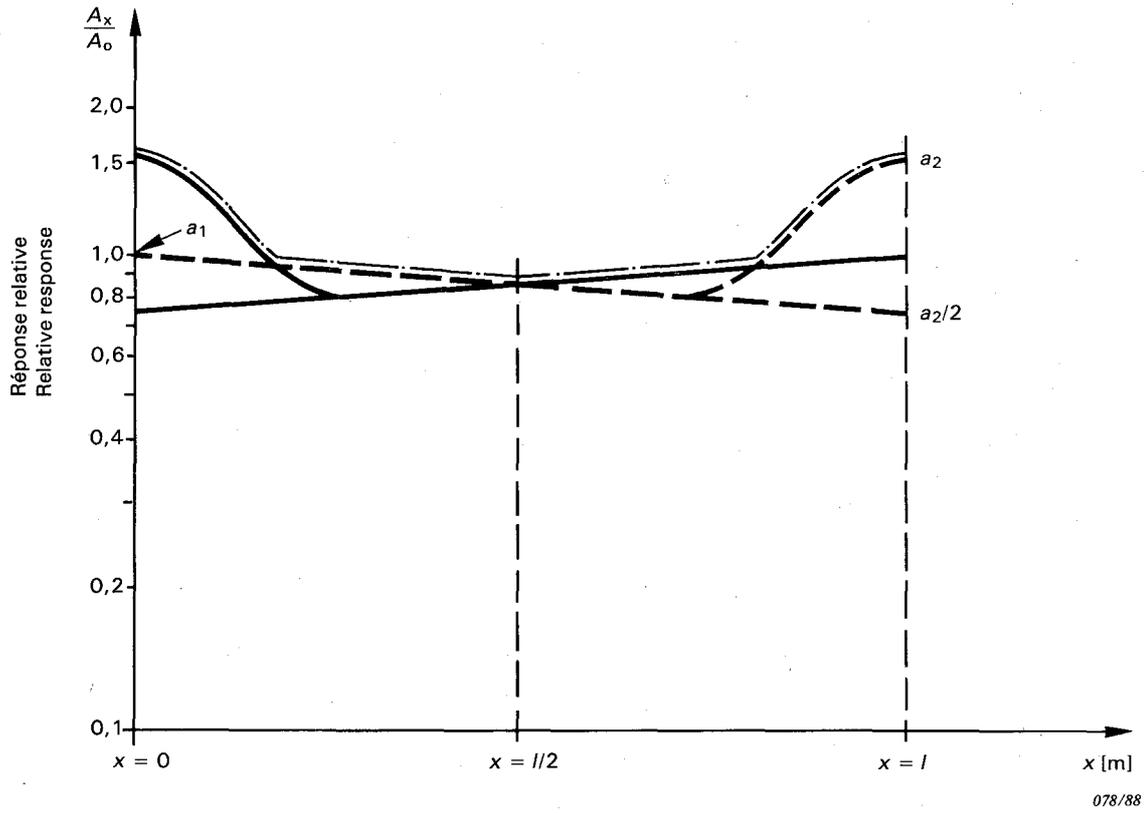


FIG. 16. — Erreur maximale d'atténuation au milieu du câble si les mesures sont effectuées à partir des deux extrémités.  
Maximum attenuation error at the centre of the cable if measurements are made from both ends.

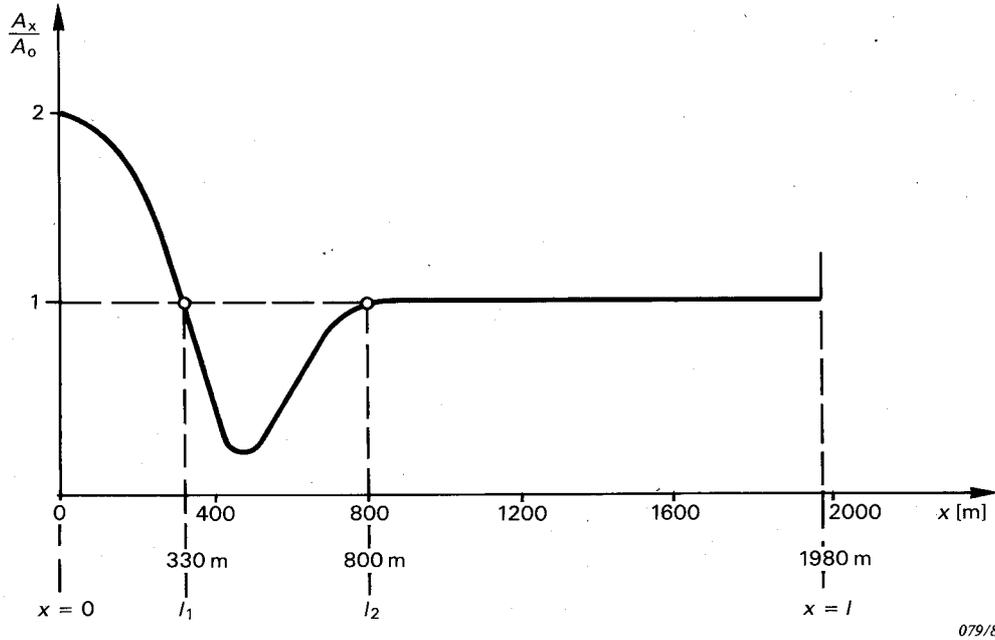


FIG. 17. — Diagramme de double impulsion type 2. Superposition négative entre  $l_1$  et  $l_2$  (longueur dans la zone interdite).  
 Double pulse diagram type 2. Negative superposition between  $l_1$  and  $l_2$  (forbidden length).

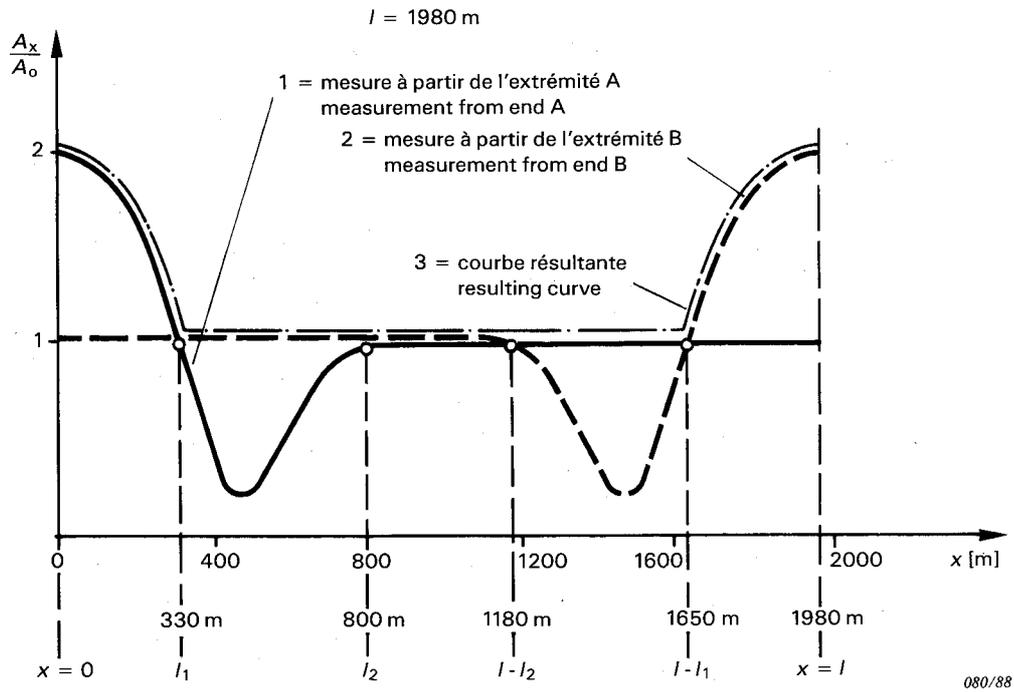


FIG. 18. — Mesure à partir des deux extrémités pour éviter une erreur négative.  
 Measurement from both ends to avoid negative error.

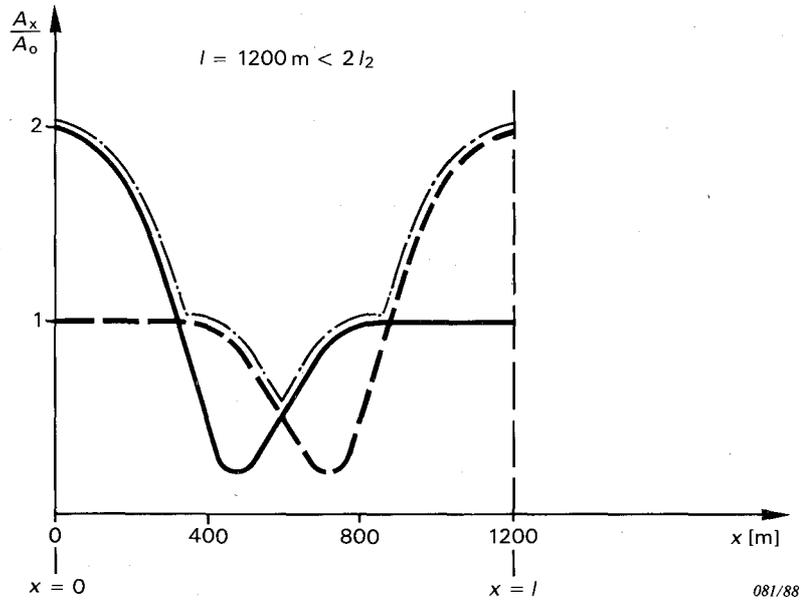


FIG. 19. — Superposition négative pour  $2 l_1 < l < 2 l_2$ .  
Negative superposition for  $2 l_1 < l < 2 l_2$ .

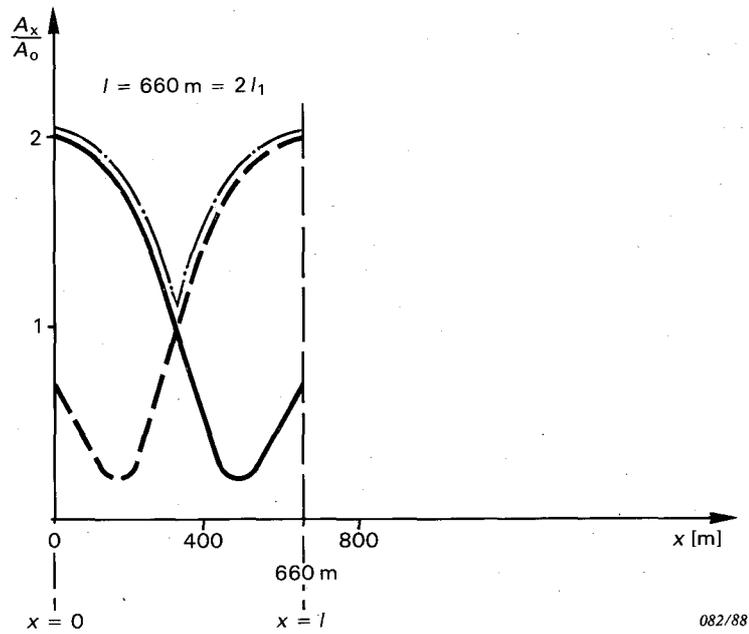


FIG. 20. — Superposition positive seulement pour  $l < 2 l_1$ .  
Only positive superposition for  $l < 2 l_1$ .

LICENSED TO MECON Limited. - RANCHI/BANGALORE  
FOR INTERNAL USE AT THIS LOCATION ONLY, SUPPLIED BY BOOK SUPPLY BUREAU.

---

**ICS 29.060.20**

---