

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
722**

Première édition
First edition
1982

**Guide pour les essais au choc de foudre et
au choc de manoeuvre des transformateurs
de puissance et des bobines d'inductance**

**Guide to the lightning impulse
and switching impulse testing
of power transformers and reactors**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 722: 1982

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 électrotechnique;*
- 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
INTERNATIONAL
STANDARD

CEI
IEC
722

Première édition
First edition
1982

**Guide pour les essais au choc de foudre et
au choc de manoeuvre des transformateurs
de puissance et des bobines d'inductance**

**Guide to the lightning impulse
and switching impulse testing
of power transformers and reactors**

© CEI 1982 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

V

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

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
Articles	
1. Domaine d'application	6
2. Généralités	6
3. Formes d'ondes spécifiées	8
4. Circuit d'essai	8
5. Etalonnage	10
6. Essais au choc de foudre	12
6.1 Formes d'ondes	12
6.2 Chocs coupés sur la queue	12
6.3 Connexions des bornes de l'objet en essai et méthodes de détection de défaut	14
6.4 Modalités d'essai	16
6.5 Enregistrement oscillographique	16
7. Essais au choc de manœuvre	20
7.1 Prescriptions particulières	20
7.2 Transformateurs	20
7.3 Bobines d'inductance	26
8. Interprétation des oscillogrammes	28
8.1 Choc de foudre	28
8.2 Choc de manœuvre	32
FIGURES	34
ANNEXE A — Principes de réglage de la forme d'onde	38
ANNEXE B — Enregistrements oscillographiques caractéristiques	48

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
Clause	
1. Scope	7
2. General	7
3. Specified wave-shapes	9
4. Test circuit	9
5. Calibration	11
6. Lightning impulse tests	13
6.1 Wave-shapes	13
6.2 Impulses chopped on the tail	13
6.3 Terminal connections of the test object and methods of failure detection	15
6.4 Test procedures	17
6.5 Oscillographic recording	17
7. Switching impulse tests	21
7.1 Special requirements	21
7.2 Transformers	21
7.3 Reactors	27
8. Interpretation of oscillograms	29
8.1 Lightning impulse	29
8.2 Switching impulse	33
FIGURES	34
APPENDIX A — Principles of wave-shape control	39
APPENDIX B — Typical oscillographic records	49

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**GUIDE POUR LES ESSAIS AU CHOC DE Foudre
ET AU CHOC DE MANŒUVRE DES TRANSFORMATEURS
DE PUISSANCE ET DES BOBINES D'INDUCTANCE**

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

Le présent guide a été établi par le Comité d'Etudes n° 14 de la CEI: Transformateurs de puissance.

Un premier projet fut discuté lors de la réunion tenue à Helsinki en 1977. Un deuxième projet fut diffusé suivant la Procédure Accélérée, à la suite de quoi le projet, document 14(Bureau Central)50, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en février 1980.

Les Comités nationaux des pays ci-après se sont prononcés explicitement en faveur de la publication:

Afrique du Sud (République d')	Danemark	Pologne
Allemagne	Egypte	Royaume-Uni
Australie	Espagne	Suède
Autriche	France	Suisse
Belgique	Hongrie	Tchécoslovaquie
Bulgarie	Japon	Turquie
Canada	Norvège	Union des Républiques Socialistes Soviétiques
	Pays-Bas	

Autres publications de la CEI citées dans le présent guide:

- Publications n°s 60: Techniques des essais à haute tension.
60-2: Deuxième partie: Modalités d'essais.
60-3: Troisième partie: Dispositifs de mesure.
60-4: Quatrième partie: Guide d'application des dispositifs de mesure.
76-3: Transformateurs de puissance, Troisième partie: Niveaux d'isolement et essais diélectriques.
289: Bobines d'inductance.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

GUIDE TO THE LIGHTNING IMPULSE AND SWITCHING IMPULSE TESTING OF POWER TRANSFORMERS AND REACTORS

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 guide has been prepared by IEC Technical Committee No. 14: Power Transformers.

A first draft was discussed at the meeting held in Helsinki in 1977. A second draft was circulated under the Accelerated Procedure as a result of which the draft, Document 14(Central Office)50, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in February 1980.

The National Committees of the following countries voted explicitly in favour of publication:

Australia	Germany	Sweden
Austria	Hungary	Switzerland
Belgium	Japan	Turkey
Bulgaria	Netherlands	Union of Soviet Socialist Republics
Canada	Norway	United Kingdom
Czechoslovakia	Poland	
Denmark	South Africa	
Egypt	(Republic of)	
France	Spain	

Other IEC publications quoted in this guide:

- Publications Nos. 60: High-voltage Test Techniques.
- 60-2: Part 2: Test Procedures.
- 60-3: Part 3: Measuring Devices.
- 60-4: Part 4: Application Guide for Measuring Devices.
- 76-3: Power Transformers, Part 3: Insulation Levels and Dielectric Tests.
- 289: Reactors.

GUIDE POUR LES ESSAIS AU CHOC DE Foudre ET AU CHOC DE MANŒUVRE DES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE ET DES BOBINES D'INDUCTANCE

1. Domaine d'application

Le but de ce guide est de donner des directives et des explications sur les modalités en vigueur pour les essais aux chocs de foudre et de manœuvre des transformateurs de puissance en complément des prescriptions de la Publication 76-3 de la CEI: Transformateurs de puissance, Troisième partie: Niveaux d'isolement et essais diélectriques. Dans l'ensemble, le contenu de ce guide est aussi applicable à l'essai des bobines d'inductance de la Publication 289 de la CEI: Bobines d'inductance; les modifications à apporter aux modalités propres aux transformateurs sont indiquées s'il y a lieu.

Les renseignements donnés concernent les formes d'onde, les circuits d'essai y compris les schémas d'essai, les modalités de mise à la terre, les méthodes de détection de défaut, les modalités d'essai, les techniques de mesure et l'interprétation des résultats.

Quand elles sont appropriées, les techniques d'essai sont celles qui sont recommandées par la Publication 60 de la CEI: Techniques des essais à haute tension.

2. Généralités

Ce guide est fondé essentiellement sur l'utilisation des générateurs de choc classiques pour les essais aux chocs de foudre et de manœuvre des transformateurs et des bobines d'inductance. La modalité de production d'un choc de manœuvre au moyen de la décharge d'un condensateur séparé dans un enroulement basse tension ou à tension intermédiaire est aussi applicable, mais non la méthode qui emploie une inductance additionnelle en série avec le condensateur.

Note. — Cette dernière méthode, qui donne une surtension en forme d'oscillation légèrement amortie transmise à l'enroulement haute tension, est encore en cours d'élaboration et un examen plus poussé est nécessaire avant qu'elle puisse être recommandée pour un usage général.

Les variantes concernant les moyens de production ou de simulation d'un choc de manœuvre, comme la coupure d'un courant continu dans un enroulement basse tension ou à tension intermédiaire ou l'application d'une portion de période d'une tension à fréquence industrielle, ne sont pas discutées puisque ces méthodes ne sont pas d'application générale.

Les différentes considérations sur le choix des circuits d'essai (connexions des bornes) pour les essais aux chocs de foudre et de manœuvre s'appliquent aux transformateurs et bobines d'inductance. Tous les enroulements des transformateurs et leurs bornes peuvent être essayés au choc de foudre à des niveaux spécifiés et indépendants. Mais l'essai au choc de manœuvre ne peut être réalisé à un niveau d'essai spécifié que sur un enroulement à cause de la tension transmise magnétiquement (voir Publication 76-3 de la CEI).

Alors que l'essai au choc de foudre des bobines d'inductance est identique à celui des transformateurs, c'est-à-dire que toutes les extrémités peuvent être essayées séparément, des considérations tout autres s'appliquent et des problèmes différents se posent pour l'essai au choc de manœuvre. Par suite, dans ce guide, un texte commun traite du choc de foudre des transformateurs et des bobines d'inductance, alors que l'essai au choc de manœuvre est traité séparément pour les deux types de matériel.

GUIDE TO THE LIGHTNING IMPULSE AND SWITCHING IMPULSE TESTING OF POWER TRANSFORMERS AND REACTORS

1. Scope

The purpose of this guide is to give guidance and explanatory comments on the existing procedures for lightning and switching impulse testing of power transformers to supplement the requirements of IEC Publication 76-3: Power Transformers, Part 3: Insulation Levels and Dielectric Tests. The contents of this guide are also generally applicable to the testing of reactors, see IEC Publication 289: Reactors, modifications to power transformer procedures being indicated where required.

Information is given on wave-shapes, test circuits including test connections, earthing practices, failure detection methods, test procedures, measuring techniques and interpretation of results.

Where applicable, the test techniques are as recommended in IEC Publication 60: High-voltage Test Techniques.

2. General

This guide is primarily based on the use of conventional impulse generators for both lightning and switching impulse testing of transformers and reactors. The practice of switching impulse generation with discharge of a separate capacitor into an intermediate or low-voltage winding is also applicable, but not that method which employs an additional inductance in series with the capacitor.

Note. — This last method, which results in an overvoltage in the form of a slightly damped oscillation transferred to the high-voltage winding, is still under development and further study is necessary before it can be recommended for general use.

Alternative means of switching impulse generation or simulation such as d.c. current interruption on an intermediate or low-voltage winding or the application of a part-period of power frequency voltage are not discussed since these methods are not as generally applicable.

Different considerations in the choice of test circuits (terminal connections) for lightning and switching impulse tests apply for transformers and reactors. On transformers, all terminals and windings can be lightning impulse tested to specified and independent levels. In switching impulse testing, however, because of the magnetically transferred voltage, a specified test level may only be obtained on one winding (see IEC Publication 76-3).

Whilst on reactors lightning impulse testing is similar to that on transformers, i.e., all terminals can be tested separately, different considerations apply and different problems arise in switching impulse testing. Hence, in this guide, lightning impulse testing is covered by a common text for both transformers and reactors whilst switching impulse testing is dealt with separately for the two types of equipment.

3. Formes d'ondes spécifiées

Les formes d'ondes de tension à utiliser normalement pendant l'essai au choc de foudre et au choc de manœuvre des transformateurs et des bobines d'inductance sont données dans la Publication 76-3 de la CEI et les méthodes de leur détermination sont données dans la Publication 60-2 de la CEI: Techniques des essais à haute tension, Deuxième partie: Modalités d'essais.

4. Circuit d'essai

La disposition matérielle des équipements d'essai, de l'objet en essai et des circuits de mesure peut être divisée en trois circuits essentiels:

- le circuit principal comprenant le générateur de choc, les composants additionnels de forme d'onde et l'objet en essai;
- le circuit de mesure de la tension;
- le circuit de coupure s'il y a lieu.

Ce montage de base est représenté à la figure 1, page 34.

Les paramètres suivants influencent la forme d'onde de choc:

- a) la capacité et l'inductance équivalentes de l'objet en essai, C_t , L_t :
 C_t est constante pour toute conception donnée et toute forme d'onde donnée,
 L_t peut varier dans certaines limites en fonction des connexions des bornes du transformateur en essai. Plus de détails à ce sujet sont donnés aux paragraphes 6.1 et 6.3 et dans l'annexe A;
- b) la capacité du générateur C_g ;
- c) les composants de forme d'onde à la fois internes et externes au générateur, R_{si} , R_{se} , R_p , C_L (plus, s'il y a lieu, l'impédance d'un diviseur de tension Z_1);
- d) l'inductance et la capacité parasites du générateur et de l'ensemble du circuit d'essai;
- e) l'appareillage de coupure s'il y a lieu.

La durée du front T_1 est déterminée principalement par la combinaison de la capacité de choc équivalente de l'objet en essai, des résistances série et de toute capacité de charge.

La durée jusqu'à mi-valeur T_2 est, pour les essais au choc de foudre, essentiellement déterminée par la capacité du générateur, l'inductance de l'objet en essai et toute résistance parallèle. Toutefois, il y a des cas, par exemple celui des enroulements à très faible inductance, où la résistance série a aussi un effet important sur la queue de l'onde. Pour les chocs de manœuvre, d'autres paramètres interviennent; ils sont traités à l'article 7.

Les équipements d'essai utilisés pour l'application de chocs de foudre et de manœuvre sont essentiellement les mêmes. Les différences concernent seulement des détails comme les valeurs des résistances et des condensateurs (et les connexions des bornes de l'objet en essai).

Pour respecter les différentes prescriptions de forme d'onde pour les chocs de foudre et de manœuvre, il faut accorder une grande importance au choix des paramètres du générateur de choc comme la capacité et les résistances série et de décharge (parallèles). Pour les chocs de manœuvre, des valeurs élevées des résistances séries et/ou des condensateurs de charge peuvent s'avérer nécessaires, ce qui entraîne une réduction notable du rendement.

3. Specified wave-shapes

The voltage wave-shapes to be normally used during lightning and switching impulse testing of transformers and reactors are given in IEC Publication 76-3 and the methods for their determination are given in IEC Publication 60-2: High-voltage Test Techniques, Part 2: Test Procedures.

4. Test circuit

The physical arrangement of test equipment, test object and measuring circuits can be divided into three major circuits:

- the main circuit including the impulse generator, additional wave-shaping components and the test object;
- the voltage measuring circuit;
- the chopping circuit where applicable.

This basic arrangement is shown in Figure 1, page 34.

The following parameters influence the impulse wave-shape:

- a) the effective capacitance and inductance of the test object, C_t , L_t :
 C_t is constant for any given design and any given wave-shape,
 L_t is to some extent variable, depending on the terminal connections of the transformer under test. More details in this respect are given in Sub-clauses 6.1 and 6.3 and in Appendix A;
- b) the generator capacitance C_g ;
- c) wave-shaping components, both internal and external to the generator, R_{si} , R_{se} , R_p , C_L (plus, where applicable, the impedance of a voltage divider Z_1);
- d) the stray inductance and capacitance of the generator and the complete test circuit;
- e) chopping equipment, where applicable.

The front time T_1 is determined mainly by the combination of the effective surge capacitance of the test object, the series resistances and any loading capacitance.

The time to half value T_2 is, for lightning impulses, primarily determined by the generator capacitance, the inductance of the test object and any parallel resistance. However, there are cases, for example windings of extremely low inductance, where the series resistance will have a significant effect also on the wave-tail. For switching impulses, other parameters apply; these are dealt with in Clause 7.

The test equipment used in lightning and switching impulse applications is basically the same. Differences are in details only, such as values of resistors and capacitors (and the terminal connections of the test object).

To meet the different requirements of wave-shape for lightning and switching impulses, due consideration must be given to the selection of the impulse generator parameters, such as capacitance and series and discharge (parallel) resistances. For switching impulses, large values of series resistors and/or load capacitors may be necessary, which will result in significant reduction of the efficiency.

Alors que la tension de sortie du générateur de choc est déterminée par la gamme de valeurs de U_m^* du matériel à essayer, l'énergie nécessaire dépend essentiellement des impédances inhérentes à l'objet en essai.

Une brève explication des principes de réglage de la forme d'onde est donnée dans l'annexe A.

La disposition de l'installation d'essai, de l'objet en essai, des câbles de liaison, des conducteurs de mise à la terre, etc., doivent évidemment tenir compte des dimensions du local d'essai et, en particulier, de l'effet de proximité de toutes structures. Pendant l'essai au choc, il n'est pas possible de maintenir le potentiel zéro dans les réseaux de terre en raison des valeurs élevées et des vitesses de variation des courants et tensions de choc et des impédances finies mises en jeu. Par conséquent, le choix d'une «terre de référence» convenable est important.

Le chemin de retour du courant entre l'objet en essai et le générateur de choc doit être de faible impédance. Il est de bon usage de relier fermement ce chemin de retour de courant au réseau de terre général du local d'essai, de préférence près de l'objet en essai. Ce point de branchement doit être utilisé comme «terre de référence» et, pour obtenir une bonne mise à la terre de l'objet en essai, il doit être connecté à la «terre de référence» au moyen de conducteur(s) de faible impédance. Voir la Publication 60-4 de la CEI: Techniques des essais à haute tension, Quatrième partie: Guide d'application des dispositifs de mesure.

Le circuit de mesure de la tension, qui est une boucle séparée de l'objet en essai dans laquelle ne circule que le courant de mesure et non pas une part importante du courant de choc s'écoulant à travers les enroulements en essai, doit aussi être connecté efficacement à la même «terre de référence».

Pour l'essai au choc de manœuvre, les vitesses de variations des tensions et courants de choc étant considérablement réduites par rapport à l'essai au choc de foudre et le circuit de coupure n'étant pas utilisé, les problèmes liés aux gradients de tension autour du circuit d'essai et à la «terre de référence» sont moins critiques. Néanmoins, par prudence, il est suggéré de suivre les mêmes modalités de mise à la terre que celles qui sont utilisées pour l'essai au choc de foudre.

5. Etalonnage

Il n'entre pas dans le cadre de ce guide de donner des recommandations relatives aux dispositifs de mesure ou à leur étalonnage, mais, bien sûr, le dispositif utilisé doit être approuvé conformément à la Publication 60 de la CEI. Avant tout essai, un contrôle global du circuit d'essai et du dispositif de mesure peut être effectué à une tension inférieure au niveau dit de «tension réduite». Au cours de ce contrôle, il est possible de déterminer la tension au moyen d'un éclateur à sphères ou par une mesure comparative avec un autre dispositif approuvé. Quand on utilise un éclateur à sphères, on doit admettre qu'il ne s'agit là que d'un contrôle et qu'il ne remplace pas l'étalonnage effectué périodiquement du système de mesure approuvé. Après tout contrôle, il est essentiel que ni le circuit de mesure ni le circuit d'essai ne soient modifiés, à l'exception du retrait de tous les dispositifs utilisés pour ce contrôle.

Des informations sur les types de diviseurs de tension, leurs applications, la précision, l'étalonnage et le contrôle sont données dans la Publication 60-3 de la CEI: Techniques des essais à haute tension, Troisième partie: Dispositifs de mesure, et le guide d'application correspondant (voir Publication 60-4 de la CEI).

* U_m = tension la plus élevée pour le matériel.

Whereas the output voltage of the impulse generator is determined by the range of values of U_m^* for the equipment to be tested, the required energy storage capability is essentially dependent on the inherent impedances of the test object.

A brief explanation of the principles of wave-shape control is given in Appendix A.

The arrangement of the test plant, test object and the interconnecting cables, earthing strips, etc., must obviously take account of the limitations of space in the test room and, particularly, the proximity effect of any structures. During impulse testing, zero potential cannot be assumed throughout the earthing systems due to the high values and rates of change of impulse currents and voltages and the finite impedances involved. Therefore, the selection of a proper "reference earth" is important.

The current return path between the test object and the impulse generator should be of low impedance. It is good practice to firmly connect this current return path to the general earth system of the test room, preferably close to the test object. This point of connection should be used as "reference earth" and to attain good earthing of the test object it should be connected to the "reference earth" by conductor(s) of low impedance. See IEC Publication 60-4: High-voltage Test Techniques, Part 4: Application Guide for Measuring Devices.

The voltage measuring circuit, which is a separate loop off the test object only carrying the measuring current and not any major portion of the impulse current flowing through the windings under test, should also be effectively connected to the same "reference earth".

In switching impulse testing, since the rates of change of the impulse voltages and currents are much reduced compared with those in a lightning impulse test and no chopping circuit is involved, the problems of potential gradients around the test circuit and with respect to the "reference earth" are less critical. Nevertheless, it is suggested that, as a precaution, the same earthing practices should be followed as used for lightning impulse testing.

5. Calibration

It is not the intention of this guide to give any recommendation on measuring systems or their calibration but, of course, the apparatus which is used should be approved in accordance with IEC Publication 60. Before a test, an overall check of the test circuit and the measuring system may be performed at a voltage lower than the "reduced voltage" level. In this check, voltage may be determined by means of a sphere gap or by comparative measurement with another approved device. When using a sphere gap, it should be recognized that this is only a check and does not replace the periodically performed calibration of the approved measuring system. After any check has been made, it is essential that neither the measuring nor the test circuit is altered except for the removal of any devices used for checking.

Information on types of voltage dividers, their applications, accuracy, calibration and checking is given in IEC Publication 60-3: High-voltage Test Techniques, Part 3: Measuring Devices, and the relevant application guide (see IEC Publication 60-4).

* U_m = highest voltage for equipment.

6. Essais au choc de foudre

6.1 Formes d'ondes

Il n'est pas toujours possible d'obtenir les valeurs de forme d'onde spécifiées. Dans l'essai des transformateurs ou des bobines d'inductance de grande puissance à enroulement de faible inductance et/ou à grande capacité de choc, on peut accepter de plus larges tolérances.

La capacité de choc d'un transformateur étant constante, il peut être nécessaire de réduire la résistance série afin d'obtenir une durée de front correcte T_1 , mais la réduction ne doit pas être poussée au point d'entraîner des oscillations excessives sur la crête de tension. S'il est considéré comme souhaitable d'avoir une durée de front courte (de préférence dans les limites spécifiées), alors des oscillations et/ou lancés de tension supérieurs à la valeur de $\pm 5\%$ de la tension de crête, autorisée par la Publication 60-2 de la CEI, sont acceptables. Dans un tel cas, un compromis est nécessaire entre l'importance des oscillations admissibles et la durée de front que l'on peut obtenir. Généralement, on doit s'efforcer de ne pas avoir d'oscillations supérieures à $\pm 10\%$, quitte à allonger la durée du front autant qu'il est nécessaire dans des limites à fixer par accord entre constructeur et acheteur. La valeur de la tension d'essai est déterminée conformément aux principes de la Publication 60-2 de la CEI.

Pour les transformateurs de grande puissance et en particulier leurs enroulements à basse tension et à tension intermédiaire, il se peut qu'il ne soit pas possible d'obtenir la durée conventionnelle jusqu'à mi-valeur T_2 , dans les limites fixées par la tolérance. L'inductance de tels enroulements peut être si faible que la forme d'onde résultante soit oscillante. Ce problème peut être résolu, dans une certaine mesure, par l'emploi de grande(s) capacité(s) dans le générateur, un ajustement des résistances série ou par des connexions particulières des extrémités des enroulements non essayés ou, en plus, des extrémités non essayées des enroulements en essai.

La mise à la terre à travers une impédance au lieu de la mise à la terre directe des extrémités d'un enroulement non essayé augmente notablement l'inductance équivalente. Alors que, dans le cas des extrémités mises à la terre directement, seule l'inductance de fuite est concernée (en fonction de l'impédance de court-circuit), pour des extrémités reliées à la terre à travers une impédance, l'inductance principale, c'est-à-dire la mutuelle inductance de couplage, devient prédominante. A la limite, cela peut donner une inductance équivalente 100 à 200 fois plus grande qu'avec une mise à la terre directe.

La mise à la terre des extrémités non essayées de l'enroulement en essai à travers une impédance n'est possible que pour les neutres à plein isolement ou les enroulements connectés en triangle.

Quand, en raison d'une inductance extrêmement faible et/ou d'une faible capacité du générateur de choc, la forme d'onde est oscillante, l'amplitude de la polarité opposée ne doit pas dépasser 50% de la valeur de crête de la première amplitude, conformément à la Publication 76-3 de la CEI. Un guide pour le choix de la capacité du générateur de choc et pour le réglage des formes d'onde est présenté dans l'annexe A avec cette limitation.

6.2 Chocs coupés sur la queue

6.2.1 Durée jusqu'à la coupure

Des durées jusqu'à la coupure différentes T_c (comme défini dans la Publication 60-2 de la CEI), entraîneront des contraintes différentes (tension et durée) dans les diverses parties d'(es) enroulement(s) en fonction de leur construction et de la disposition adoptée. Il n'est donc pas possible d'établir une durée jusqu'à la coupure réputée la plus sévère aussi bien à titre général

6. Lightning impulse tests

6.1 Wave-shapes

The values of wave-shape specified may not always be obtainable. In the impulse testing of large power transformers and reactors, of low winding inductance and/or high surge capacitance, wider tolerances may have to be accepted.

The surge capacitance of the transformer being constant, the series resistance may have to be reduced in an attempt to obtain the correct front time T_1 , but the reduction should not be to the extent that oscillations on the crest of the voltage wave become excessive. If it is considered desirable to have a short front time (preferably within the specified limits) then oscillations and/or overshoots greater than the $\pm 5\%$ of the peak voltage, allowed in IEC Publication 60-2, may have to be accepted. In such an event, a compromise between the extent of allowable oscillations and the obtainable front time is necessary. In general, oscillations not greater than $\pm 10\%$ should be aimed at, even with extensions to the front time as necessary and as agreed between manufacturer and purchaser. The value of the test voltage is determined according to the principles of IEC Publication 60-2.

For large power transformers and particularly the intermediate and low-voltage windings thereof, the virtual time to half-value T_2 may not be achievable within the value set by the tolerance. The inductance of such windings may be so low that the resulting wave-shape is oscillatory. This problem may be solved to some extent by the use of large capacitance within the generator, adjustment of the series resistor or by specific test connections of the non-tested winding terminals or, in addition, of the non-tested terminals of tested windings.

By impedance earthing instead of solid earthing of the non-tested winding terminals, the effective inductance is significantly increased. Whilst for solidly earthed terminals, only leakage inductance (according to the short-circuit impedance) is involved, for impedance-earthed terminals, the main inductance, i.e. the mutual coupling inductance, becomes predominant. In the limit this can make the effective inductance 100 to 200 times greater than with solid earthing.

Impedance earthing of the non-tested terminals of the winding under test is only applicable for fully insulated neutrals or delta-connected windings.

When the wave-shape is oscillatory due to extremely low inductance and/or small impulse generator capacitance, the amplitude of the opposite polarity should not exceed 50% of the peak value of the first amplitude, in accordance with IEC Publication 76-3. With this limitation, a guide for selecting impulse generator capacitance and adjusting wave-shapes is given in Appendix A.

6.2 Impulses chopped on the tail

6.2.1 Time to chopping

Different times to chopping T_c (as defined in IEC Publication 60-2), will result in different stresses (voltage and duration) in different parts of the winding(s) depending on the winding construction and arrangement employed. Hence, it is not possible to state a time to chopping which is the most onerous either in general or for any particular transformer or reactor. The

que pour tout transformateur ou bobine d'inductance. La durée jusqu'à la coupure n'est donc pas considérée comme un paramètre d'essai pourvu qu'elle reste à l'intérieur des limites de 2 μ s et 6 μ s comme spécifié dans la Publication 76-3 de la CEI.

6.2.2 Raideur de la chute de tension et amplitude de la polarité inverse du choc coupé

Les grandeurs caractéristiques de la coupure dépendent, pour une grande part, de la disposition géométrique du circuit de coupure et de son impédance, chacun de ces éléments contribuant à déterminer la raideur de la chute de tension et l'amplitude de la crête de polarité opposée.

Dans la Publication 76-3 de la CEI, la valeur de l'oscillation de polarité opposée a été limitée à 30% de l'amplitude du choc coupé. En fait, cela constitue un guide pour la disposition du circuit de coupure et peut entraîner l'insertion d'une impédance additionnelle Z_c dans le circuit pour respecter cette limitation (voir figure 1, page 34).

La Publication 76-3 de la CEI recommande d'utiliser un éclateur de coupure commandé qui présente l'avantage d'assurer une durée jusqu'à la coupure constante, facilitant ainsi la comparaison des enregistrements oscillographiques non seulement avant, mais aussi après la coupure. La dernière partie ne sera comparable que pour des durées jusqu'à la coupure raisonnablement identiques.

6.3 Connexions des bornes de l'objet en essai et méthodes de détection de défaut

Il est essentiel que les connexions des bornes de l'objet en essai et les modalités de mise à la terre employées se rapportent à la méthode de détection de défaut adoptée.

Les connexions pour l'essai au choc sont détaillées dans la Publication 76-3 de la CEI pour les transformateurs et dans la Publication 289 de la CEI pour les bobines d'inductance. En principe, les extrémités non essayées de l'enroulement de phase en essai sont mises à la terre et les enroulements de phase non essayés sont court-circuités et mis à la terre. Toutefois, en vue d'améliorer la queue de l'onde T_2 , la mise à la terre à travers une résistance des enroulements non essayés peut présenter un avantage (voir article 4 et paragraphe 6.1) et, de plus, les extrémités non essayées de l'enroulement en essai peuvent aussi être mises à la terre à travers une résistance.

Quand des enroulements avec prises, des portions d'enroulement ou des enroulements série d'un transformateur survolteur-dévolteur sont protégés par des parafoudres, il est recommandé de remplacer le parafoudre par une résistance pendant l'essai, la résistance étant dimensionnée pour limiter la tension à une valeur correspondant approximativement au niveau de protection du parafoudre.

La détection de défaut s'effectue normalement par l'examen des oscillogrammes de la tension appliquée et du courant de choc.

Différents phénomènes transitoires peuvent être enregistrés et utilisés séparément ou associés comme le montrent la figure 2, page 35, et la liste ci-dessous. Il est généralement suffisant, pour les essais de réception, d'enregistrer seulement un des phénomènes transitoires mentionnés en complément de la tension d'essai appliquée:

- a) le courant de neutre (pour des enroulements connectés en étoile ou en zigzag dont le neutre peut être mis à la terre pendant l'essai);
- b) le courant d'enroulement (pour tous les autres enroulements et les enroulements connectés en étoile ou en zigzag dont le neutre ne peut être mis à la terre pendant l'essai);
- c) le courant écoulé par un enroulement adjacent;

time to chopping is therefore not regarded as a test parameter provided that it is within the limits of $2 \mu\text{s}$ and $6 \mu\text{s}$ as required by IEC Publication 76-3.

6.2.2 *Rate of collapse and amplitude of reversed polarity of the chopped impulse*

The characteristic events during the chopping are largely dependent on the geometrical arrangement of the chopping circuit involved and on the impedance of the circuit, each of which determine both the rate of collapse and the amplitude of the opposite polarity peak.

In IEC Publication 76-3, the amount of overswing to opposite polarity has been limited to 30% of the amplitude of the chopped impulse. This, in fact, represents a guide for the arrangement of the chopping circuit and may entail the introduction of additional impedance Z_c in this circuit to meet the limit (see Figure 1, page 34).

The recommendation in IEC Publication 76-3 to use a triggered-type chopping gap is because of its advantage in obtaining consistency of the time to chopping, thereby facilitating the comparison of oscillographic records not only before but also after chopping. The latter part will only be comparable for reasonably identical times to chopping.

6.3 *Terminal connections of the test object and methods of failure detection*

It is essential that the terminal connections of the test object and the earthing practices employed relate to the method of failure detection adopted.

Connections for impulse testing are detailed in IEC Publication 76-3 for transformers and in IEC Publication 289 for reactors. Normally the non-tested terminals of the phase winding under test are earthed and the non-tested phase windings are shorted and earthed. However, in order to improve the wave-tail T_2 , resistance earthing of the non-tested windings may be advantageous (see Clause 4 and Sub-clause 6.1) and, in addition, the non-tested line terminals of the winding under test may also be resistance earthed.

When tapped windings, part windings or series windings of a booster transformer are protected by surge diverters, it is recommended that the surge diverter should be replaced by a resistor during the test, the resistor being dimensioned to limit the voltage to approximately the same value as the protection level of the surge diverter.

Failure detection is normally accomplished by examination of the oscillograms of the applied test voltage and the impulse current.

Different transients can be recorded and used separately or in combination, as shown in Figure 2, page 35, and listed below. It is generally sufficient, in acceptance testing, to record only one of the listed transients in addition to the applied test voltage:

- a) the neutral current (for star and zigzag connected windings of which the neutral may be earthed during the test);
- b) the winding current (for all other windings and star and zigzag connected windings of which the neutral may not be earthed during the test);
- c) the current transferred to an adjacent winding;

- d) le courant de cuve;
- e) la tension transmise à un enroulement non essayé.

La somme de *a)*, *c)* et *d)* ou de *b)*, *c)* et *d)* est parfois désignée comme le « courant de ligne ». Pendant l'essai des bobines d'inductance du type shunt ou série, les méthodes *c)* et *e)* ne sont pas applicables; la méthode *d)* peut être appliquée, mais seulement comme un moyen d'enregistrement complémentaire car elle est moins sensible que dans le cas des essais des transformateurs.

6.4 Modalités d'essai

Généralement, les modalités d'essai comportent la méthode d'essai et la séquence de son déroulement.

Les séquences d'essai relatives aux essais en onde pleine et aux essais en onde pleine et coupée sont données dans la Publication 76-3 de la CEI.

La méthode d'essai préférentielle est celle de l'application directe; toutefois, dans les cas spéciaux où l'enroulement basse tension ou à tension intermédiaire ne peut, en service, être soumis à des surtensions de foudre provenant du réseau qui y est connecté, la méthode de « surtension transmise » peut être employée en variante. L'essai au choc de l'enroulement basse tension est alors exécuté en même temps que l'essai de l'enroulement haute tension associé. Dans ces conditions, la forme d'onde de la tension transmise n'est pas conforme à celle spécifiée dans la Publication 76-3 de la CEI. Il est plus important d'essayer d'obtenir le niveau de tension spécifié au moyen de résistances de mise à la terre de valeur suffisamment élevée. Toutefois, ce n'est pas toujours possible même avec les plus grandes valeurs de résistances. Dans cet essai, il peut apparaître des tensions entre phases élevées dans les enroulements couplés en triangle, et le danger de contraindre par excès l'isolation entre phases, interne ou externe, peut limiter la tension qui peut être appliquée à l'enroulement basse tension. Il est possible d'établir les limites appropriées au moyen d'applications de tension à niveau réduit.

Notes 1. — Dans les cas où des résistances non linéaires, sans éclateur, sont montées à l'intérieur de la cuve, par exemple en parallèle aux bornes de sections d'enroulements ou d'enroulements complets, il est suggéré d'exécuter plusieurs applications d'onde pleine à tension réduite à des niveaux croissants avant l'application du plein niveau d'essai. Les modifications dans les enregistrements à des niveaux de tension croissants doivent alors mettre en évidence une évolution progressive et logique. Toutefois, des évolutions similaires n'apparaîtront peut-être pas quand des résistances non linéaires sont utilisées pour la mise à la terre de circuits magnétiques ou quand le système de résistance non linéaire comprend des éclateurs.

2. — Les méthodes d'essai pour les neutres des transformateurs sont données dans la Publication 76-3 de la CEI. Quand la méthode indirecte est utilisée, c'est-à-dire qu'un choc est transmis au neutre depuis une ou plusieurs bornes de ligne, la forme d'onde ne peut être spécifiée puisqu'elle est essentiellement définie par les paramètres du transformateur. Lorsque la méthode directe est utilisée avec une tension de choc appliquée sur le neutre et toutes les bornes de ligne mises à la terre, on peut admettre une durée de front plus longue allant jusqu'à 13 μ s. Dans ce cas, la charge inductive du générateur est sensiblement augmentée et il peut être difficile de réaliser des durées jusqu'à mi-valeur qui soient à l'intérieur des tolérances. Les bornes de phase de l'enroulement peuvent alors être mises à la terre à travers une impédance.

6.5 Enregistrement oscillographique

6.5.1 Généralités

La Publication 76-3 de la CEI demande la mesure de:

- a) la tension appliquée;
 - b) au moins un enregistrement d'une grandeur caractéristique de plus,
- cela veut dire qu'au moins deux voies d'enregistrement indépendantes sont nécessaires.

- d) the tank current;
- e) the voltage transferred to a non-tested winding.

The sum of *a*), *c*) and *d*) or of *b*), *c*) and *d*) is sometimes referred to as “line current”. When testing reactors, both of the shunt and series types, methods *c*) and *e*) are inapplicable; method *d*) may be applied but only as an additional means of transient recording since it is likely to be less sensitive than when used in transformer testing.

6.4 Test procedures

Test procedures generally imply the method of test and the sequence of its performance.

The relevant test sequences for full-wave tests and for full and chopped-wave tests are given in IEC Publication 76-3.

The preferred method of test is that of direct application although in special cases where the intermediate or low-voltage winding cannot, in service, be subjected to lightning overvoltages from the system connected to it, the “transferred surge” method may alternatively be employed. The impulse test of the low-voltage winding is then carried out simultaneously with the test of the associated high-voltage winding. Under these conditions, the waveform of the transferred voltage does not conform with that specified in IEC Publication 76-3. It is more important to try and obtain the required voltage level by means of terminating resistors of sufficiently high value. However, this may not always be possible even with the highest values of resistors. In this test, high inter-phase voltages may occur on delta-connected windings and the danger of overstressing inter-phase insulation, internal or external, may limit the voltage that can be applied to the low-voltage winding. The appropriate limits may be established by reduced-level voltage applications.

Notes 1. — In those cases where non-gapped, non-linear resistors are fitted within the tank, e.g. across sections of windings or complete windings, it is suggested that several reduced full-wave applications be made at increasing levels, prior to the full test level application. The changes in the records at increasing voltage levels should then show a logical and progressive development. Similar developments may not occur, however, when non-linear resistors are used for core earthing or when the non-linear resistor assembly includes spark-gaps.

- 2. — Test methods for transformer neutrals are given in IEC Publication 76-3. When the indirect method is used, i.e. by an impulse transmitted to the neutral from one or more line terminals, the wave-shape cannot be specified since it is controlled basically by the transformer parameters. The direct method, involving an impulse voltage applied to the neutral with all line terminals earthed, permits a longer duration of wave-front, up to 13 μ s. In this case, the inductive loading of the generator is significantly increased and it may be difficult to achieve times to half-value set by the tolerances. Impedance earthing of the phase winding terminals may then be applied.

6.5 Oscillographic recording

6.5.1 General

IEC Publication 76-3 requires the measurement of:

- a) the applied voltage;
 - b) at least one more characteristic record,
- i.e. at least two independent recording channels are necessary.

Alors que seule la tension appliquée est définie, le choix de l'autre grandeur caractéristique à enregistrer dépend de la méthode de détection de défaut adoptée.

Pour faciliter l'évaluation des résultats, qui est essentiellement fondée sur la comparaison des oscillogrammes des essais obtenus au niveau réduit et à plein niveau d'essai, il est utile de disposer d'enregistrements d'égale amplitude en utilisant les atténuateurs appropriés des oscilloscopes.

6.5.2 Enregistrement de la tension

a) Détermination de la forme d'onde

Le temps de balayage préférentiel adopté pour la détermination de la forme d'onde pendant l'ajustement préliminaire des paramètres du circuit d'essai est $\leq 10 \mu\text{s}$ pour l'enregistrement du front de l'onde. (Des temps de balayage plus longs peuvent être nécessaires pour l'essai des neutres des transformateurs.) L'enregistrement de la queue de l'onde doit permettre l'évaluation de la durée jusqu'à la mi-valeur et, dans certains cas, de l'amplitude de la polarité inverse.

b) Enregistrement de la forme d'onde

Afin de déterminer l'amplitude de l'onde d'essai et de permettre la détection de tout défaut qui peut être présent:

- pour les ondes pleines, le temps de balayage ne doit pas être inférieur à $50 \mu\text{s}$;
- pour les ondes coupées, un temps de balayage de $10 \mu\text{s}$ à $25 \mu\text{s}$ est généralement jugé suffisant.

Un enregistrement est normalement suffisant pour les essais de réception; toutefois, pour des essais d'investigation, plusieurs enregistrements avec des temps de balayage différents peuvent être nécessaires.

6.5.3 Enregistrement du courant

Le courant de choc est normalement le paramètre de détection de défaut le plus sensible. Par conséquent, les ondes de courant enregistrées sont le principal critère du résultat de l'essai.

Selon la forme du courant et l'utilisation de balayages linéaires ou logarithmiques, il peut être nécessaire d'effectuer plus d'un enregistrement avec des temps de balayage différents. La solution retenue doit assurer:

- a) qu'une représentation aussi nette que possible des oscillogrammes est obtenue, y compris des composantes de plus haute fréquence à proximité du front de l'onde;
- b) que l'enregistrement du courant est d'une durée suffisante pour permettre la détection de toute variation apparaissant tard dans le temps.

Il est difficile d'énoncer des règles préférentielles concernant les vitesses de balayage et ce qu'il faut entendre par «tard dans le temps», car chaque transformateur a une réponse différente et la vitesse de propagation dépend, dans une certaine mesure, du type de bobinage employé. Si l'on enregistre le courant de neutre ou d'enroulement, l'enregistrement doit se poursuivre au moins jusqu'à ce que la crête inductive soit atteinte; cela permet l'examen de l'onde pour déterminer s'il y a eu une éventuelle modification de l'inductance causée par un court-circuit entre spires, résultant d'un défaut d'isolement.

Whereas the applied voltage is uniquely defined, the choice of the other characteristic to be recorded is dependent on the selection of the method of failure detection.

To facilitate the assessment of the test results, which is primarily based on the comparison of oscillograms taken at reduced and full test levels, it is advantageous to provide for recordings of equal amplitude by the use of appropriate attenuators at the oscilloscopes.

6.5.2 Recording of voltage

a) Determination of wave-shape

The preferred sweep time for records taken for wave-shape determination during preliminary adjustment of the test circuit parameters is $\leq 10 \mu\text{s}$ for the wave-front record (longer sweep times may be necessary when testing transformer neutrals). The wave-tail record should permit the evaluation of the time to half-value and, on occasions, the amplitude of reversed polarity.

b) Test wave recording

In order to determine the amplitude of the test wave and to permit detection of any fault which may be present:

- for full waves, the sweep time should not be less than $50 \mu\text{s}$;
- for chopped waves, a sweep time of $10 \mu\text{s}$ to $25 \mu\text{s}$ is usually found sufficient.

One record is normally sufficient for acceptance tests; for diagnostic testing however, several records with different sweep times may be required.

6.5.3 Recording of current

Impulse current is normally the most sensitive parameter in failure detection. Therefore, the recorded current waves are the main criteria of the test result.

Dependent on the form of the current trace and on the use of linear or exponential sweeps, it may be necessary to use more than one record with different sweep times. The resolution achieved should ensure that:

- a) as clear a representation as possible is obtained of the oscillograms, including the higher frequency components near the front of the wave;
- b) the current record is of sufficient duration to permit detection of any discrepancies occurring late in time.

It is difficult to lay down preferred rules for sweep speeds and what is meant by "late in time" as the response of every transformer is different and the speed of propagation is to some extent dependent on the type of winding employed. When recording neutral or winding current, recording should continue at least until the inductive peak has been reached, thus permitting examination of the wave to determine if there has been any change in inductance caused by short-circuiting of turns as a result of insulation failure.

7. Essais au choc de manœuvre

7.1 Prescriptions particulières

La réponse des transformateurs et des bobines d'inductance au choc de manœuvre est très différente du fait que les premiers ont un circuit magnétique complet et du fait de la durée relativement longue du choc de manœuvre qui autorise donc l'établissement d'une quantité notable de flux dans le circuit magnétique. (Voir Publication 76-3 de la CEI.) Ce n'est pas le cas des bobines d'inductance pour lesquelles, de plus, les problèmes de forme d'onde et de modalités d'essai sont différents. C'est pourquoi ces deux types de matériel sont traités séparément.

7.2 Transformateurs

7.2.1 Formes d'ondes

Comme indiqué dans la Publication 76-3 de la CEI, il n'y a pas de valeurs précises spécifiées pour la durée conventionnelle du front d'une onde de choc de manœuvre. Toutefois, elle doit être suffisamment longue pour assurer une distribution de tension pratiquement uniforme. Elle est déterminée par la capacité équivalente de l'enroulement, l'ensemble des capacités de charge et des résistances série.

La queue de l'onde n'est pas seulement influencée par les composantes de forme d'onde habituelles, mais aussi par une probable saturation du circuit magnétique. Pour la plupart des transformateurs, à pleine tension d'essai, la décroissance exponentielle de la queue de l'onde est interrompue par une chute soudaine au-delà de zéro, plus ou moins longtemps après la crête, variable, due à la saturation du circuit magnétique. Par suite, la durée conventionnelle jusqu'à mi-valeur T_2 n'est pas utilisée pour définir la queue de l'onde du choc de manœuvre appliqué. A sa place, la forme d'onde est définie par sa durée au-dessus de 90% T_d et par la spécification de la durée jusqu'au premier passage par zéro T_z . Ces grandeurs sont représentées à la figure 3a, page 36.

Le temps nécessaire pour saturer le circuit magnétique dépend de sa dimension, de son état de magnétisation initial et du niveau et de la forme d'onde de la tension appliquée. A moins d'avoir un état de magnétisation du circuit magnétique identique avant chaque application du choc de manœuvre à un niveau de tension donné, des formes d'ondes identiques, lors d'applications successives, ne seront pas obtenues. De plus, il n'est pas possible d'obtenir des formes identiques à niveau réduit et à plein niveau d'essai.

La saturation du circuit magnétique ne se produit habituellement pas pendant les applications de tension à niveau réduit et peut même ne pas apparaître pendant les applications à plein niveau. Quand elle intervient, son influence sur la forme d'onde de tension peut être importante ou minime selon le degré de saturation atteint. Pour cette raison, il est possible de définir seulement T_1 et T_d à partir des applications à tension réduite. Il n'est pas possible de définir T_z tant que la première application à plein niveau de tension n'a pas été faite.

Note. — Il peut apparaître des différences sensibles dans la forme de la queue de l'onde sur les différentes colonnes d'un transformateur en raison des réluctances différentes présentées par le circuit magnétique.

7.2.2 Connexions des bornes de l'objet en essai et méthode de détection de défaut

Conformément aux prescriptions de la Publication 76-3 de la CEI, il n'y a qu'un schéma d'essai admis pour les transformateurs triphasés. Ce schéma est représenté à la figure 4, page 37, et indique que le neutre doit toujours être mis à la terre et que les extrémités des phases non essayées sont reliées entre elles. (Sur les transformateurs à enroulement connecté en triangle, les extrémités non essayées peuvent être laissées libres.)

7. Switching impulse tests

7.1 Special requirements

The response of transformers and reactors to switching impulses is very different because the former have a complete magnetic circuit and the relatively long duration of the switching impulse therefore allows the establishment of a significant amount of core flux. (See IEC Publication 76-3.) This is not the case for reactors for which, in addition, wave-shape problems and test procedures are different. Therefore, the two items of equipment are dealt with separately.

7.2 Transformers

7.2.1 Wave-shapes

As indicated in IEC Publication 76-3, there are no strict values specified for the virtual front time of a switching impulse wave. It should, however, be sufficiently long to ensure essentially uniform distribution of voltage. It is determined by the effective winding capacitance, any load capacitance and the series resistances.

The wave-tail is influenced not only by the usual wave-shaping components but also by a probable saturation of the core. For most transformers, at full test level, the exponential decay of the wave-tail is interrupted by a sudden fall through zero, at a variable time after the crest, due to core saturation. Therefore, the virtual time to half-value T_2 is not used to specify the wave-tail of the applied switching impulse. Instead, the wave-shape is defined by its time above 90% T_d and by the requirement of the time to first zero passage T_z . These quantities are illustrated in Figure 3a, page 36.

The time taken to saturate the core is dependent on the core size, its initial state of magnetization and the level and wave-shape of the applied voltage. Unless the core magnetization state is identical before each switching impulse application at a given voltage level, identical wave-shapes on successive applications will not be obtained. In addition, identical wave-shapes at reduced and full test levels cannot be obtained.

Core saturation does not usually occur on reduced level voltage applications and may not even occur on full level applications. When it does occur, its effect on the voltage wave-shape may be large or small depending on the amount of saturation involved. For this reason it is possible to establish only T_1 and T_d from the reduced voltage applications. T_z cannot be established until the first full level voltage application is made.

Note. — There may well be significant differences in the shape of the wave-tail on different limbs of a transformer due to the different reluctances of the magnetic circuit involved.

7.2.2 Terminal connections of the test object and methods of failure detection

In order to comply with the requirements of IEC Publication 76-3, there is only one admissible test connection for three-phase transformers. This connection is shown in Figure 4, page 37, which demonstrates that the neutral shall always be earthed and the terminals of the non-tested phases interconnected. (On transformers with a delta-connected winding, the non-tested terminals may be left open.)

Le choix de l'enroulement sur lequel la tension d'essai est appliquée directement et le niveau de cette tension d'essai sont normalement laissés au constructeur, pourvu que le niveau assigné de tenue au choc de manœuvre soit atteint dans l'enroulement à la tension assignée la plus élevée.

Généralement, la mise en court-circuit des enroulements non essayés n'est plus permise car la conséquence d'un tel court-circuit pendant l'essai au choc de manœuvre est fondamentalement la même que pendant un essai par tension induite.

Tandis que l'onde de choc de manœuvre de base est transmise par induction, le couplage capacitif entre phases et les capacités et inductances propres de phase peuvent entraîner des oscillations supplémentaires qui se superposent aux tensions transmises. La figure 22, page 65, donne un exemple clair de ce phénomène. C'est pourquoi l'indication de la Publication 76-3 de la CEI selon laquelle une tension de $1,5 U$ doit apparaître entre phases quand une tension U est appliquée à une extrémité n'est vraie qu'en principe. Par conséquent, pendant un essai, les tensions entre phases seront vraisemblablement supérieures à $1,5 U$ si l'on ne prend aucune mesure concernant les extrémités non essayées pour supprimer les tensions oscillantes. Les tensions entre phase et terre des extrémités non essayées peuvent être bien supérieures à $0,5 U$.

Un moyen commode pour réaliser un amortissement convenable consiste à placer des charges résistives sur les phases non soumises à l'essai. Toutefois, une charge résistive entraîne une augmentation sensible de la durée du front sur les extrémités non essayées et donc une tension entre phases inférieure à $1,5 U$. Cela résulte des instants légèrement différents auxquels apparaissent les maxima de tension appliquée (U) et de tension induite ($0,5 U$).

Normalement, pour la détection d'un défaut, la mesure de la tension appliquée est suffisante, mais quand l'essai est réalisé en appliquant le choc sur une borne basse tension ou à tension intermédiaire, on doit mesurer la tension sur la borne avec la plus haute valeur de U_m . On peut en plus utiliser le courant écoulé à la terre par l'enroulement essayé.

Notes 1. — La condition selon laquelle 1,5 fois la tension entre phase et neutre sera induite entre les phases ne peut être respectée dans le cas des transformateurs du type cuirassé et à colonnes à cinq noyaux dépourvus d'enroulements connectés en triangle, car le flux ne peut être dirigé vers les enroulements des colonnes non essayées.

2. — Des considérations similaires concernant les oscillations superposées peuvent aussi s'appliquer aux autotransformateurs monophasés.

7.2.3 Modalités d'essai

La modalité d'essai est traitée dans la Publication 76-3 de la CEI. Cette modalité comprend les mesures qui peuvent être prises pour augmenter la durée du choc en retardant l'éventuel début de saturation du circuit magnétique.

Pour la méthode de l'application directe sur l'enroulement haute tension, qui est la méthode principalement considérée dans ce guide, la modalité entraîne l'application sur chaque borne de phase de:

- un choc à niveau d'essai réduit de polarité négative (entre 50% et 75% du niveau de tenue au choc de manœuvre);
- l'introduction de la rémanence, soit au moyen de chocs de polarité positive, soit par l'application de courant continu;
- trois chocs de polarité négative au niveau de tenue au choc de manœuvre, avec introduction de rémanence après chaque choc.

La méthode préférentielle pour l'introduction de la rémanence est l'application de chocs de polarité opposée (c'est-à-dire positive). Pour réaliser des oscillogrammes raisonnablement identiques à chaque niveau d'essai, il est recommandé d'établir chaque fois le même rémanent,

The choice of winding to which the test voltage is to be directly applied and the level of that test voltage may normally be left to the manufacturer, commensurate with the requirement that the rated switching impulse withstand level is achieved in the winding with the highest rated voltage.

Short-circuiting of windings not under test is no longer generally practicable since the effect of such short-circuiting during the switching impulse test is basically the same as in an induced voltage test.

Whilst the basic switching impulse wave is inductively transferred, the interphase capacitive coupling and the inherent phase capacitances and inductances can cause additional oscillations which are superimposed on the transferred voltages. Figure 22, page 65, gives a clear example of this effect. Hence, the assumption in IEC Publication 76-3 that a phase-to-phase voltage of $1.5 U$ will occur when a voltage U is applied to one terminal, is valid only in principle. Therefore, during a test, the interphase voltages are likely to be higher than $1.5 U$ if no measures are taken at the non-tested terminals to suppress the oscillatory voltages. The phase-to-earth voltages at the non-tested terminals can be much higher than $0.5 U$.

Resistive loading of the non-tested phases is a convenient means to achieve appropriate damping. However, resistive loading causes a significant lengthening of the wave-front at the non-tested terminals, resulting in a phase-to-phase voltage of less than $1.5 U$. This results from the slightly different times at which the maxima of applied (U) and induced ($0.5 U$) voltages occur.

For failure detection, normally the measurement of the applied voltage only is sufficient, but when the test is performed by applying the impulse to an intermediate or low-voltage terminal, the voltage shall be measured at the terminal with the highest U_m . The current flowing to earth through the tested winding can additionally be used.

Notes 1. — The requirement that 1.5 times the voltage between phase and neutral shall be developed between phases cannot be met on shell-type and five-limb core-type transformers without delta-connected windings, as the flux cannot be directed through the windings on the non-tested limbs.

2. — Similar considerations with respect to superimposed oscillations can be applied also to single-phase auto-transformers.

7.2.3 Test procedures

The test procedure is outlined in IEC Publication 76-3. This procedure includes reference to measures which may be taken to increase the impulse duration by delaying the possible onset of core saturation.

For the method of direct application to the high-voltage winding, primarily referred to in this guide, the procedure involves the application, to each phase terminal, of:

- one negative polarity, reduced test level impulse (between 50% and 75% of the switching impulse withstand level);
- introduction of remanence, either by means of positive polarity impulses or direct current application;
- three negative polarity impulses at the switching impulse withstand level with introduction of remanence after each impulse.

The preferred method of introducing remanence is the application of opposite (i.e. positive) polarity impulses. To achieve reasonably identical oscillograms at any test level, it is recommended that the same remanence point should always be established, preferably "saturation

de préférence «la rémanence de saturation». Ce point est atteint lorsque la durée jusqu'au premier passage par zéro reste constante lors d'applications de choc consécutives. Le nombre de «chocs de prémagnétisation» nécessaire et leur niveau dépendent du niveau de tension visé pour l'essai. Pour éviter tous problèmes concernant les amorçages extérieurs pendant l'application de cette méthode, le niveau de tels chocs prémagnétisants et de polarité positive ne doit pas dépasser 50% à 60% de la tension d'essai.

7.2.4 *Enregistrement oscillographique*

7.2.4.1 *Généralités*

L'enregistrement de la tension sur l'extrémité haute tension est demandé pendant l'essai au choc de manœuvre. Toutefois, en raison des tensions entre phase et terre des extrémités non essayées, ou entre phases, qui peuvent être excessives comme il est expliqué au paragraphe 7.2.2, il est recommandé d'effectuer au moins un contrôle de ces tensions.

Normalement, l'enregistrement de la tension doit indiquer aussi de façon satisfaisante tout défaut dans les enroulements associés et non directement soumis au choc de manœuvre. Les courants de choc peuvent être enregistrés et donneront dans de nombreux cas une information supplémentaire sur un défaut.

Note. — Pour l'enregistrement de la tension de choc de manœuvre, il est préférable d'utiliser des diviseurs de tension du type capacitif car des diviseurs de tension résistifs ont une influence sur la forme d'onde et peuvent subir une surcharge thermique.

7.2.4.2 *Enregistrement de la tension*

a) *Détermination de la forme d'onde*

Pour l'enregistrement du front de l'onde en vue de déterminer la forme d'onde pendant l'ajustement préliminaire des paramètres du circuit d'essai, un temps de balayage qui comprend la crête de l'onde est nécessaire, ce qui, normalement, signifie 100 μ s à 300 μ s. Pour l'enregistrement de la queue de l'onde, qui est utilisé seulement pour déterminer la durée au-dessus de 90% T_d , un temps de balayage de 500 μ s à 1 000 μ s est recommandé.

b) *Enregistrement de l'onde d'essai*

Afin de déterminer l'amplitude de l'onde d'essai et de permettre la détection de tout défaut pouvant se présenter, le temps de balayage doit être assez long pour inclure le premier passage par zéro, c'est-à-dire supérieur à la durée présumée T_z . Cela signifie, normalement, 1 000 μ s à 2 000 μ s.

7.2.4.3 *Enregistrement du courant*

Comme indiqué au paragraphe 7.2.2, le courant de choc peut aussi être enregistré. Quand ce courant est mesuré sur l'enroulement sur lequel le choc de tension est directement appliqué, que ce soit ou non l'enroulement sur lequel le niveau de tension d'essai spécifié doit être atteint, le courant comprend trois parties:

- une impulsion de courant initiale;
- une augmentation lente et progressive de la valeur du courant coïncidant avec la queue de la tension appliquée;
- une crête de courant coïncidant avec toute saturation.

Quand le courant est enregistré, il est préférable d'employer le même temps de balayage que celui qui est utilisé pour la tension.

remanence". This point is reached when the time to the first zero passage remains constant on consecutive impulse applications. The number of required "pre-magnetizing impulses" and their level depend on the level of test voltage aimed for. To avoid any problems with external flashovers during this procedure, the level of such positive polarity pre-magnetizing impulses should not exceed 50% to 60% of the test voltage.

7.2.4 Oscillographic recording

7.2.4.1 General

Recording of the voltage of the high-voltage terminal is required during switching impulse testing. However, due to the possible excessive voltages to earth on the non-tested terminals, or between phases, explained in Sub-clause 7.2.2, it is advisable to at least check these voltages.

The voltage record will normally also satisfactorily indicate any fault on coupled windings not directly subjected to the switching impulse. Impulse currents may be recorded and will in many cases give additional information about a fault.

Note. — For switching impulse voltage recording, it is preferable to use capacitive types of voltage dividers as resistive voltage dividers would have an influence on wave-shape and may be thermally overloaded.

7.2.4.2 Recording of voltage

a) Determination of wave-shape

For the wave-front record taken for wave-shape determination during preliminary adjustment of the test circuit parameters, a sweep time which encompasses the peak of the wave is necessary, which normally means 100 μ s to 300 μ s. For the wave-tail record, which is used only to determine the time above 90% T_d , a sweep time of 500 μ s to 1 000 μ s is recommended.

b) Test wave recording.

In order to determine the amplitude of the test wave and to permit detection of any fault which may be present, the sweep time must be long enough to encompass the first zero passage, i.e. longer than the expected time T_z . This normally means 1 000 μ s to 2 000 μ s.

7.2.4.3 Recording of current

As mentioned in Sub-clause 7.2.2, impulse current may also be recorded. When this current is measured on the winding to which the impulse voltage is directly applied, whether or not this is the winding on which the specified test voltage level is to be achieved, the current comprises three parts:

- an initial current pulse;
- a low and gradually rising value of current coincident with the tail of the applied voltage;
- a peak of current coincident with any saturation.

When current oscillograms are taken, it is preferable to employ the same sweep time as used for the voltage record.

7.3 Bobines d'inductance

7.3.1 Formes d'ondes

La forme d'onde réalisable sur les bobines d'inductance sera une forme cosinoïdale amortie, sans effet de la saturation sur la queue, puisqu'il n'y a pas de circuit magnétique complet traversant les enroulements. Cette forme d'onde doit être caractérisée principalement par sa fréquence, déterminée par l'inductance de la bobine et la capacité du générateur, et le coefficient d'amortissement. Toutefois, l'usage est de définir les formes d'onde d'essai des bobines d'inductance de la même façon que pour les transformateurs, c'est-à-dire par T_1/T_d et T_z (voir figures 3b et 24, pages 36 et 67).

Comme pour les transformateurs, la durée conventionnelle du front est déterminée principalement par la capacité équivalente de l'enroulement, la capacité de charge additionnelle et la résistance série. Elle doit être assez longue pour assurer une distribution approximativement uniforme le long de l'enroulement essayé. Pour les valeurs élevées de T_1 , le coefficient d'amortissement sera important, ce qui entraînera une durée T_z relativement courte. Pour de faibles valeurs de T_1 , T_d deviendra court et la crête de polarité opposée peut approcher 75% du niveau de la tension d'essai avec un risque subséquent d'amorçage entre phase et terre ou entre phases. Pour ces raisons, il apparaît logique, comme dans le cas des transformateurs, de limiter la crête maximale de polarité opposée à un niveau de sécurité de l'ordre de 50% et d'accepter les valeurs correspondantes de T_1 , T_d et T_z .

7.3.2 Connexions des bornes de l'objet en essai et méthodes de détection de défaut

Puisqu'il n'y a qu'un seul enroulement, le point d'application de la tension d'essai est la borne de ligne de l'enroulement de phase à essayer. L'autre borne de cet enroulement de phase doit être mise à la terre.

Comme pour les transformateurs, pour la détection de défaut, la mesure de la tension appliquée est normalement suffisante, mais le courant écoulé à la terre à travers l'enroulement de phase essayé peut être utilisé en supplément.

Note. — La spécification selon laquelle 1,5 fois la tension entre phase et neutre sera induite entre phases ne peut être respectée dans le cas des bobines d'inductance triphasées car le flux ne peut être dirigé vers les enroulements des colonnes non essayées.

7.3.3 Modalités d'essai

Les modalités d'essai pour les bobines d'inductance comprennent:

- la détermination de la forme d'onde;
- l'application d'un choc à niveau d'essai réduit de polarité négative;
- l'application de trois chocs de polarité négative au niveau de tenue au choc de manœuvre et sans prémagnétisation.

7.3.4 Enregistrement oscillographique

Sous réserve des différences de forme d'onde décrites au paragraphe 7.3.1, les mêmes principes généraux énoncés pour les transformateurs s'appliquent à l'enregistrement de tension et de courant des bobines d'inductance. Toutefois, il est opportun d'utiliser des temps de balayage tant pour la tension que pour le courant qui couvrent la deuxième demi-période de la tension appliquée. Pour les enregistrements de courant, il peut être utile d'utiliser, en plus, un temps de balayage plus court afin d'enregistrer le transitoire capacitif initial avec plus de détails.

Note. — La forme d'onde de base du courant correspondant à l'onde de tension en forme de cosinoïde est sinusoïdale (voir figures 3b et 24).

7.3 Reactors

7.3.1 Wave-shapes

The wave-shape obtainable on reactors will be of a damped cosine form, without any saturation effects on the tail, since there is no complete ferro-magnetic circuit through the windings. This wave-shape should be characterized mainly by its frequency, determined by the reactor inductance and the generator capacitance, and the damping coefficient. However, practice has been to specify reactor test wave-shapes as for transformers, i.e. by T_1/T_d and T_z (see Figures 3b and 24, pages 36 and 67).

The virtual front time is determined, as for transformers, primarily by the effective winding capacitance, additional load capacitance and the series resistance. It should be long enough to ensure approximately uniform distribution throughout the tested winding. For large values of T_1 , the damping coefficient will be large thus resulting in a relatively short time T_z . For small values of T_1 , T_d will become short and the opposite polarity peak may well approach 75% of the test voltage level with an ensuing risk of phase-to-earth or phase-to-phase flashover. Due to these implications, it appears logical, as in the case of transformers, to limit the maximum opposite polarity peak to a safe level, say 50%, and to accept the corresponding values of T_1 , T_d and T_z .

7.3.2 Terminal connections of the test object and methods of failure detection

Since there is only one winding, the application point for the test voltage is the line terminal of the phase winding which is to be tested. The other terminal of this phase winding should be earthed.

For failure detection, as for transformers, normally only the measurement of the applied voltage is sufficient but the current flowing to earth through the tested winding can additionally be used.

Note. — The requirement that 1.5 times the voltage between phase and neutral shall be developed between phases cannot be met on three-phase reactors as the flux cannot be directed through the windings on the non-tested limbs.

7.3.3 Test procedures

The test procedures for reactors comprise:

- the determination of the wave-shape;
- the application of one negative polarity reduced test level impulse;
- the application of three negative polarity impulses at the switching impulse withstand level without any pre-magnetization measures.

7.3.4 Oscillographic recording

Subject to the wave-shape differences described in Sub-clause 7.3.1, the same general principles apply to voltage and current recording on reactors as for transformers. It is, however, advisable to use sweep times for both voltage and current which cover the second half-cycle of the applied voltage. For current recordings, it may be advantageous to use, in addition, a shorter sweep time so as to be able to monitor the initial capacitance transient in more detail.

Note. — The basic waveform of the current corresponding to the cosine voltage wave is sinusoidal (see Figures 3b and 24).

8. Interprétation des oscillogrammes

L'annexe B contient un certain nombre d'oscillogrammes enregistrés pendant des essais réels de transformateurs et illustrant des conditions de défaut et d'absence de défaut. Toutefois, il convient de souligner avec insistance que des différences semblables dans la forme d'onde obtenue sur une autre unité ne doivent pas nécessairement être considérées comme résultant de la même cause, car les défauts se traduisent différemment d'une conception à l'autre.

8.1 *Choc de foudre*

L'interprétation des oscillogrammes est fondée sur la comparaison des formes d'onde de tension et des enregistrements de courant entre les tensions d'essai réduites et les tensions d'essai assignées ou entre des enregistrements successifs à la tension d'essai assignée. C'est un travail délicat car il est souvent difficile, même avec une grande expérience, de statuer sur la signification des différences, en raison du grand nombre de sources de perturbation possibles. Des différences de toute nature sont à prendre en considération et doivent faire l'objet d'investigation.

Pour l'investigation de ces différences, il est recommandé de vérifier en premier lieu que le circuit d'essai, le circuit de mesure et les méthodes de mise à la terre ne sont pas la cause des perturbations. Si les perturbations proviennent du circuit d'essai, on doit s'efforcer de les éliminer ou au moins de minimiser leur effet. On doit se souvenir que, dans les générateurs à plusieurs étages, des différences dans les instants d'amorçage de chaque étage peuvent entraîner d'infimes changements dans l'amplitude des enregistrements de courant avec des oscillations initiales à très haute fréquence (sans modification de la fréquence fondamentale). Voir la figure 21, page 64. Toutefois, dans la majorité des cas, ces changements sont limités à une durée correspondant à 50% du front de l'onde du choc appliqué.

En second lieu, on doit vérifier que la mise à la terre du circuit magnétique ou quelque élément non linéaire à l'intérieur de l'objet en essai ne sont pas la source de perturbations. Des résistances non linéaires et non munies d'éclateurs peuvent être à l'origine d'une évolution logique et progressive ou de changement à des niveaux d'essai croissants. Voir la figure 20, page 63.

Une fois éliminées ou expliquées les sources des différences mentionnées ci-dessus, des variations de forme d'onde sur les enregistrements de tension et de courant entre la tension d'essai réduite et assignée ou entre enregistrements successifs à la tension d'essai assignée qui ne peuvent être considérées comme provenant du circuit d'essai ou de la présence de résistances non linéaires à l'intérieur de l'objet en essai, constituent l'indication d'une défaillance de l'isolement pendant l'essai.

La comparaison des enregistrements d'onde coupée après l'instant de la coupure n'est normalement pas possible, à moins que les instants de coupure ne soient presque identiques; des instants de coupure similaires mais non nécessairement identiques sont obtenus par l'utilisation d'éclateurs de coupure commandés. Même de petites différences dans les instants de coupure peuvent, pour certains transformateurs, entraîner des différences marquées dans les oscillations après la coupure (ce signal étant une superposition d'un phénomène transitoire dû au front du choc d'origine et à la coupure) et ces différences peuvent fausser la comparaison entre les enregistrements d'applications effectuées avec succès et celles où un défaut existe. Voir la figure 19, page 62.

8.1.1 *Oscillogrammes de tension — Essais en onde pleine*

Les oscillogrammes de la tension appliquée constituent un moyen relativement peu sensible pour la détection de défaut. Par conséquent, les différences visibles sont l'indication de défauts importants dans l'isolation.

8. Interpretation of oscillograms

Appendix B contains a number of oscillograms taken during actual tests on transformers and demonstrating fault and non-fault conditions. It is, however, strongly emphasized that similar waveform discrepancies on another unit cannot necessarily be taken as arising from the same cause as the faults will present themselves differently from design to design.

8.1 *Lightning impulse*

Interpretation of oscillograms is based on comparison of the wave-shapes of voltage and current records between reduced and rated test voltages or between successive records at rated test voltage. This is a skilled task and it is often difficult to decide the significance of discrepancies, even with considerable experience, because of the large number of possible disturbance sources. Discrepancies of any kind are of concern and should be investigated.

For such an investigation into discrepancies it is recommended to check first that the test circuit, the measuring circuit and earthing methods are not causing the disturbances. If the disturbances originate in the test circuit, every effort should be made to eliminate them or at least to minimize their effect. It should be remembered that in multi-stage generators, differences in the firing times of the individual stages may give rise to minute changes in the amplitude of current records with high-frequency initial oscillations (without changing the basic frequency). See Figure 21, page 64. In the majority of cases, however, these changes are limited to a time period corresponding to 50% of the wave-front of the applied impulse.

Secondly, it should be checked that core earthing or any non-linear elements within the test object are not the source of the disturbances. Non-gapped, non-linear resistors may produce a logical and progressive development or change with increasing voltage levels. See Figure 20, page 63.

Having eliminated or explained the above sources of discrepancies, variations in the wave-shape of voltage or current records between reduced and rated test voltage or between successive records at rated test voltage which cannot be proved to originate in the test circuit or in non-linear resistors within the test object, are evidence of insulation failure from the test.

Comparison of the chopped-wave records after the instant of chopping is not normally possible unless the instants of chopping are almost identical; similar but not necessarily identical instants of chopping are achieved by use of triggered-type chopping gaps. Even small differences in the instants of chopping, can, for some transformers, give rise to marked differences in the oscillation pattern after the chop (this pattern being a superposition of the transient phenomena due to the front of the original impulse and from the chopping) and these differences may confuse comparison between the records of successful applications and those where a fault exists. See Figure 19, page 62.

8.1.1 *Voltage oscillograms — Full-wave tests*

The oscillograms of applied voltage are a relatively insensitive means for failure detection. Thus, the detectable discrepancies indicate major faults in the insulation.

Pourvu que le balayage adopté le permette, une analyse plus détaillée des différences est possible.

- Les défauts à la terre dans l'isolation principale à une extrémité en essai ou à proximité entraîneront un effondrement rapide et total de la tension. Voir la figure 9, page 52.
- Un amorçage progressif mais néanmoins total dans l'enroulement en essai entraînera une chute de tension un peu plus lente, apparaissant normalement de façon graduelle.
- Un amorçage à travers une portion d'enroulement entraînera une réduction de l'impédance de l'enroulement, ce qui diminuera la durée jusqu'à la mi-valeur. Des oscillations caractéristiques apparaîtront aussi sur l'onde de tension au moment de l'amorçage. Voir les figures 11, 12 et 13, pages 54 à 56.
- Des défauts moins étendus, tels que l'amorçage de bobine à bobine ou même de spire à spire, ne sont normalement pas évidents sur les oscillogrammes de tension mais peuvent parfois être mis en évidence par des oscillations à haute fréquence. Les enregistrements de courant permettent normalement de détecter ces défauts. Voir la figure 14, page 57. De la même façon, des défauts se produisant à l'extrémité essayée ou à proximité peuvent aussi ne donner que de faibles indications sur les oscillogrammes.

Les oscillogrammes de tension transmise indiqueront aussi les défauts mentionnés ci-dessus. La sensibilité de cette mesure est meilleure que celle de la tension appliquée.

8.1.2 Oscillogrammes de courant — Essais en onde pleine

Les oscillogrammes de courant constituent le moyen de détection de défaut le plus sensible. Toutefois, cette sensibilité est accompagnée par la possibilité d'oscillogrammes indiquant un certain nombre de manifestations non associées directement à un défaut. Quelques possibilités ont été examinées au paragraphe 8.1. Elles peuvent être à l'origine d'oscillations brusques et erratiques ou de modifications de front d'onde sur les enregistrements de courant et doivent faire l'objet d'investigations.

Des changements importants dans les enregistrements de courant indiquent probablement un amorçage dans les enroulements ou à la terre. Voir la figure 9. La forme du changement sera différente selon la méthode de détection de défaut employée. Les courants peuvent augmenter ou diminuer et le sens de l'évolution associé à la méthode de détection de défaut donnera des indications quant à la nature et l'emplacement du défaut. Voir la figure 11.

- Une augmentation significative du courant de neutre est un critère de défaut au sein de l'enroulement essayé tandis qu'une diminution indique un défaut entre l'enroulement et l'enroulement adjacent ou par rapport à la terre.
- Le courant capacitif change de polarité instantanément dans le cas de défauts dans l'enroulement essayé ou par rapport à la terre. Il y aura aussi une modification de la fréquence fondamentale et l'amplitude pourra diminuer. Un défaut entre l'enroulement essayé et un enroulement adjacent se manifestera par une augmentation instantanée de l'amplitude dans le même sens et une modification de la fréquence fondamentale.

Tous ces défauts se traduiront, dans une certaine mesure, par des oscillations à haute fréquence superposées à l'enregistrement.

- De petites perturbations localisées et en dents de scie s'étalant peut-être sur 2 μ s ou 3 μ s constituent une indication possible de décharge grave ou de claquage partiel dans l'isolation entre spires ou bobines ou connexions de bobines.

Provided that the time resolution is sufficiently high, a more detailed analysis of discrepancies is possible.

- Faults to earth in the major insulation at or near the terminal under test will result in a rapid and total collapse of the voltage. See Figure 9, page 52.
- A progressive but nevertheless total flashover across the winding under test will result in a somewhat slower voltage collapse, normally occurring in a stepped manner.
- A flashover across part of the winding will reduce the impedance of the winding, thus resulting in a decrease of the time to half-value. Characteristic oscillations will also occur on the voltage wave at the moment of flashover. See Figures 11, 12 and 13, pages 54 to 56.
- Less extensive faults, such as breakdown of coil-to-coil or even turn-to-turn insulation are not normally evident on the voltage oscillograms but may sometimes be detected as high frequency oscillations; current records will normally detect these faults. See Figure 14, page 57. Likewise, incipient faults at or near the terminal under test may also give only small indications on the oscillograms.

Transferred voltage oscillograms will also indicate the above-mentioned faults. The sensitivity of this measurement is higher than that of the applied voltage.

8.1.2 *Current oscillograms — Full-wave tests*

Current oscillograms are the most sensitive means for failure detection. However, this sensitivity is accompanied by the possibility of the oscillograms indicating a number of effects not directly associated with failure. Some possibilities have been identified in Sub-clause 8.1. These may be responsible for erratic bursts of oscillations or wave-front changes on current traces and should be investigated.

Major changes in current records probably indicate breakdown within the windings or to earth. See Figure 9. The form of the change will be different depending on the method of failure detection employed. Currents may increase or decrease and the direction of the change together with the method of fault detection will give guidance on the nature and location of the fault. See Figure 11.

- A significant increase in neutral current is indicative of a fault within the tested winding whilst a decrease indicates a fault from the tested winding to an adjacent winding or to earth.
- Capacitively transferred current will, for faults in the tested winding or to earth, show an instantaneous change in polarity. There will also be a change in basic frequency and there may be a decrease in amplitude. A fault from the tested winding to an adjacent winding will show an instantaneous increase in amplitude in the same polarity sense and a change in basic frequency.

All these faults will result in some degree of superimposed high-frequency oscillations on the record.

- Small, localized, jagged disturbances, perhaps spread over $2\ \mu\text{s}$ or $3\ \mu\text{s}$, are a possible indication of severe discharge or partial breakdown in the insulation between turns or coils or coil connections.

Pour les enroulements à faible capacité série, c'est-à-dire là où la propagation se fait essentiellement de façon progressive, il peut être possible de localiser la source des perturbations en évaluant la différence de temps entre l'arrivée au neutre de la perturbation capacitive et de celle induite par l'onde.

8.1.3 *Oscillogrammes de courant et de tension — Essais en onde coupée*

Pourvu que la durée jusqu'à la coupure soit raisonnablement identique d'une application de tension à l'autre, les défauts apparaissant pendant cet essai seront détectés à la fois sur les oscillogrammes de tension et de courant par les différences dans les oscillations après la coupure. Voir les figures 16 et 17, pages 59 et 60. Il y a des cas, toutefois, où le défaut se manifeste avant l'instant de la coupure, les mêmes considérations que pour les essais en onde pleine sont alors applicables. Voir les figures 10 et 15, pages 53 et 58.

8.2 *Choc de manœuvre*

8.2.1 *Oscillogrammes de tension*

Pour les essais au choc de manœuvre, en raison de la distribution uniforme de la tension le long de l'enroulement, le défaut entraîne normalement des dégâts importants comme le court-circuit entre sections, portions d'enroulement, ou même entre enroulements ou à la terre. Ces types de défaut entraînent une modification notable de l'onde de tension, par exemple un effondrement complet de l'onde ou un raccourcissement de la queue ou, parfois, une interruption temporaire de l'enregistrement. C'est pour cette raison que les enregistrements de tension d'essai au choc de manœuvre constituent un paramètre de détection suffisamment sensible pour la plupart des défauts. Voir la figure 23, page 66.

Dans les essais des transformateurs, tout raccourcissement de la queue de l'onde est habituellement facile à distinguer d'une variation de la longueur de la queue due à des états initiaux de magnétisation du circuit magnétique différents lors d'applications successives; néanmoins, plus on est capable d'atteindre des états initiaux proches les uns des autres, plus il devient facile de distinguer un cas de défaut d'une condition normale.

8.2.2 *Oscillogrammes de courant*

La forme d'onde caractéristique de l'enregistrement de courant a été décrite au paragraphe 7.2.4.3 pour les transformateurs et au paragraphe 7.3.4 pour les bobines d'inductance. Excepté au début de l'onde ou, pour les transformateurs, au voisinage de la saturation du circuit magnétique, des changements marqués du courant se produisant au même instant que toute distorsion de l'onde de tension indiquent un défaut. Compte tenu de la nature des défauts qui peuvent se produire, les enregistrements de courant sont aussi sensibles que les enregistrements de tension.

For windings of small "series capacitance", i.e. exhibiting essentially travelling wave behaviour, it may be possible to identify the source of disturbances by evaluating the time difference between the arrival at the neutral of the capacitive and the travelling wave disturbances.

8.1.3 *Voltage and current oscillograms — Chopped-wave tests*

Provided that the time to chopping is reasonably identical from one voltage application to another, failures during this test will be detectable both in the voltage and current oscillograms by differences in the oscillations after chopping. See Figures 16 and 17, pages 59 and 60. There are, however, cases where the fault occurs before the instant of chopping and then the same considerations apply as for full-wave tests. See Figures 10 and 15, pages 53 and 58.

8.2 *Switching impulse*

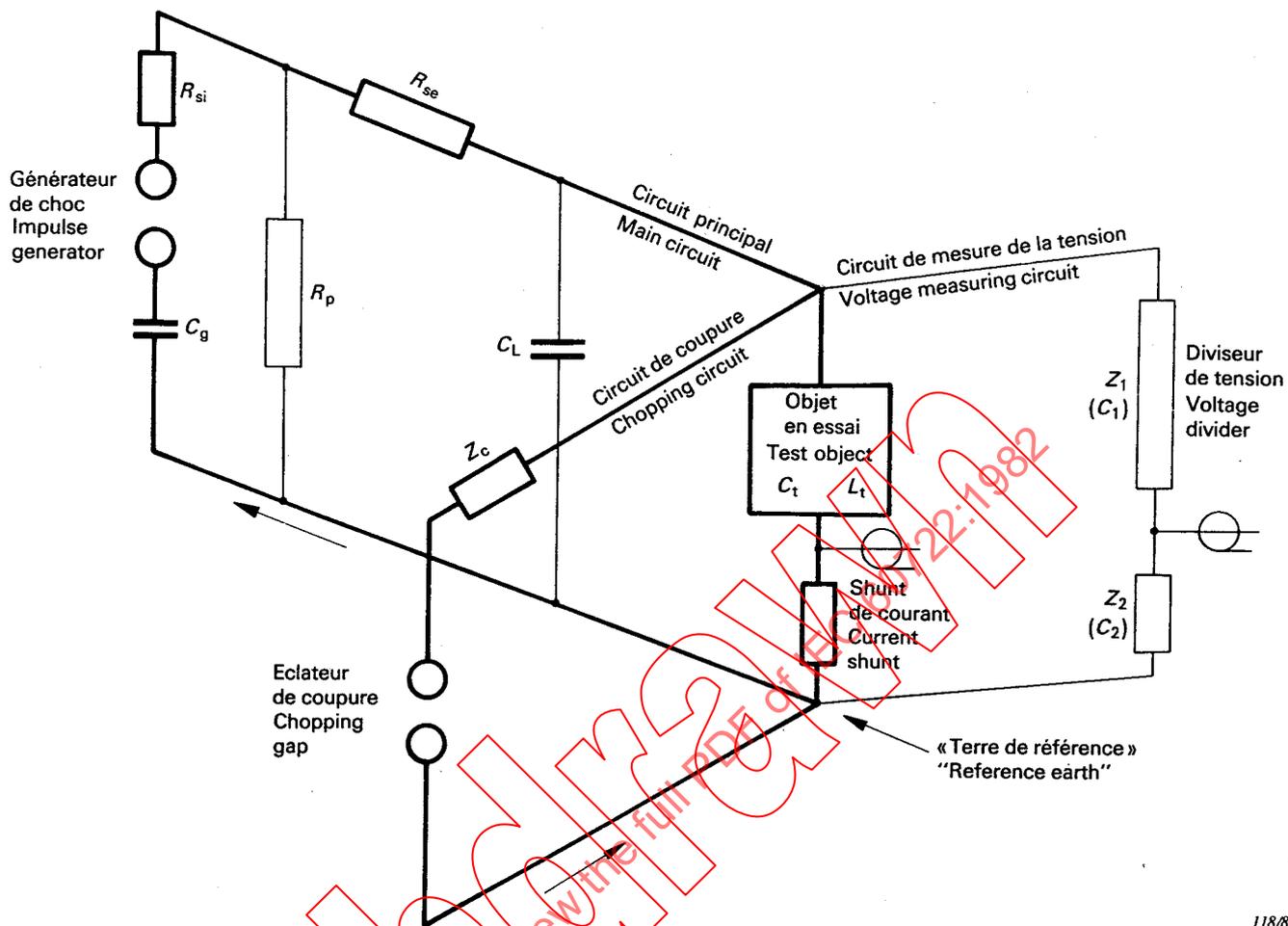
8.2.1 *Voltage oscillograms*

In switching impulse tests, owing to the uniform distribution of voltage throughout the winding, the fault normally involves major deterioration in the form of a short circuit between sections, parts of a winding or even between windings or to earth. These types of fault cause a significant change in the voltage wave either as a complete collapse of the wave or a shortening of the tail or, sometimes, as a temporary dip in the trace. Hence, the voltage records on switching impulse tests are a sufficiently sensitive means for detection of most faults. See Figure 23, page 66.

Any wave-tail shortening in transformer tests is usually quite distinguishable from variation in the length of the wave-tail resulting from differing initial states of core magnetization on successive applications; nevertheless, the closer the initial states can be matched, the easier it becomes to distinguish between a fault and a non-fault condition.

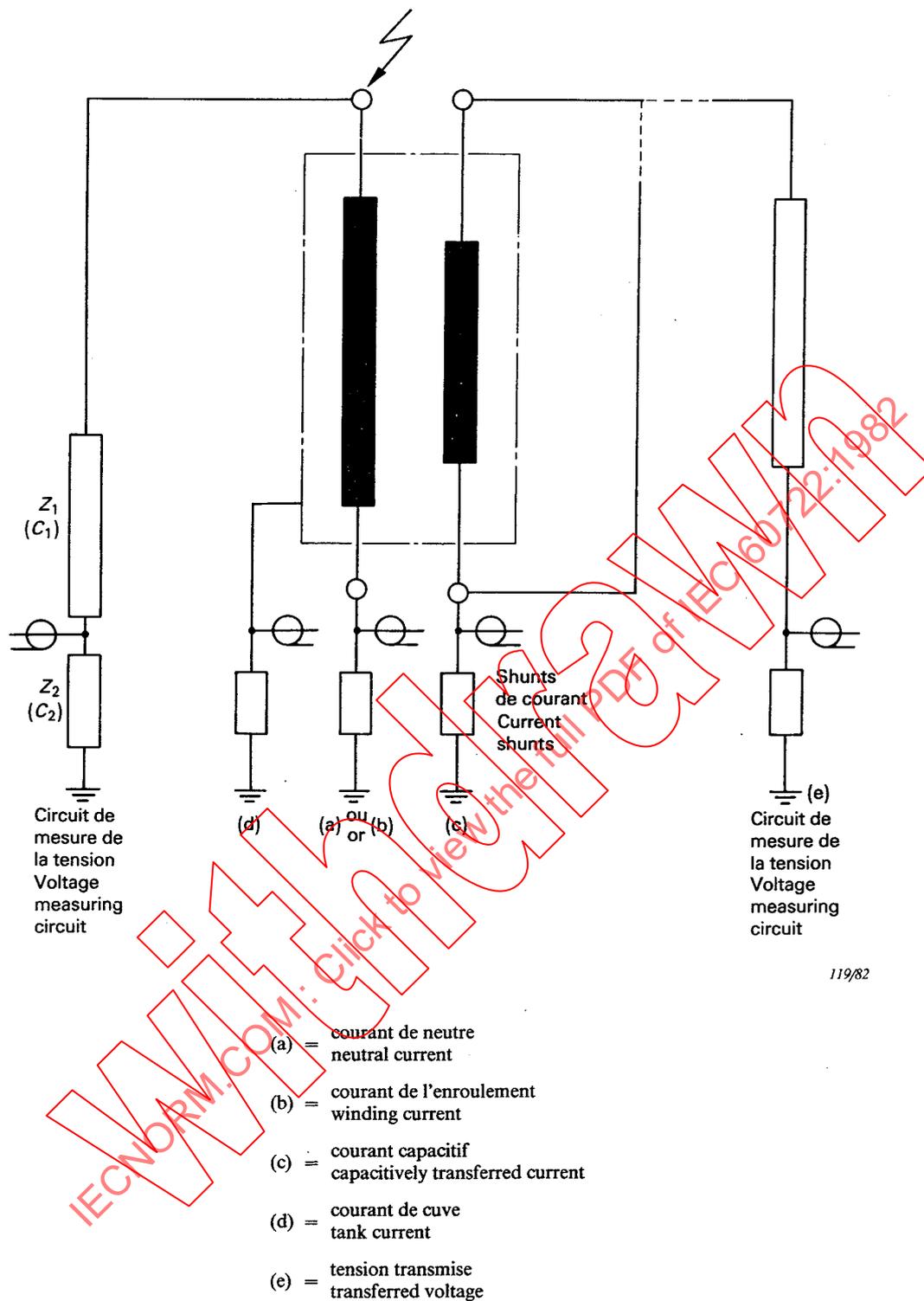
8.2.2 *Current oscillograms*

The general waveform of the current record has been described in Sub-clause 7.2.4.3 for transformers and in Sub-clause 7.3.4 for reactors. Except at the start of the wave or, in the case of transformers, in the vicinity of core saturation, sharp changes of current occurring at the same time as any distortion of the voltage wave are indicative of failure. With the nature of faults to be expected, current records are as sensitive as voltage records.



- C_g = capacité du générateur
generator capacitance
- C_L = capacité de charge
loading capacitance
- C_t = capacité équivalente de l'objet en essai
effective test object capacitance
- L_t = inductance équivalente de l'objet en essai
effective test object inductance
- R_{si} = résistance série interne
internal series resistance
- R_{se} = résistance série externe
external series resistance
- R_p = résistance parallèle
parallel resistance
- Z_c = impédance additionnelle dans le circuit de l'éclateur de coupure
additional impedance in chopping gap circuit
- Z_1 = impédance de la partie haute tension du diviseur de tension
impedance of high-voltage arm of voltage divider
- Z_2 = impédance de la partie basse tension du diviseur de tension
impedance of low-voltage arm of voltage divider

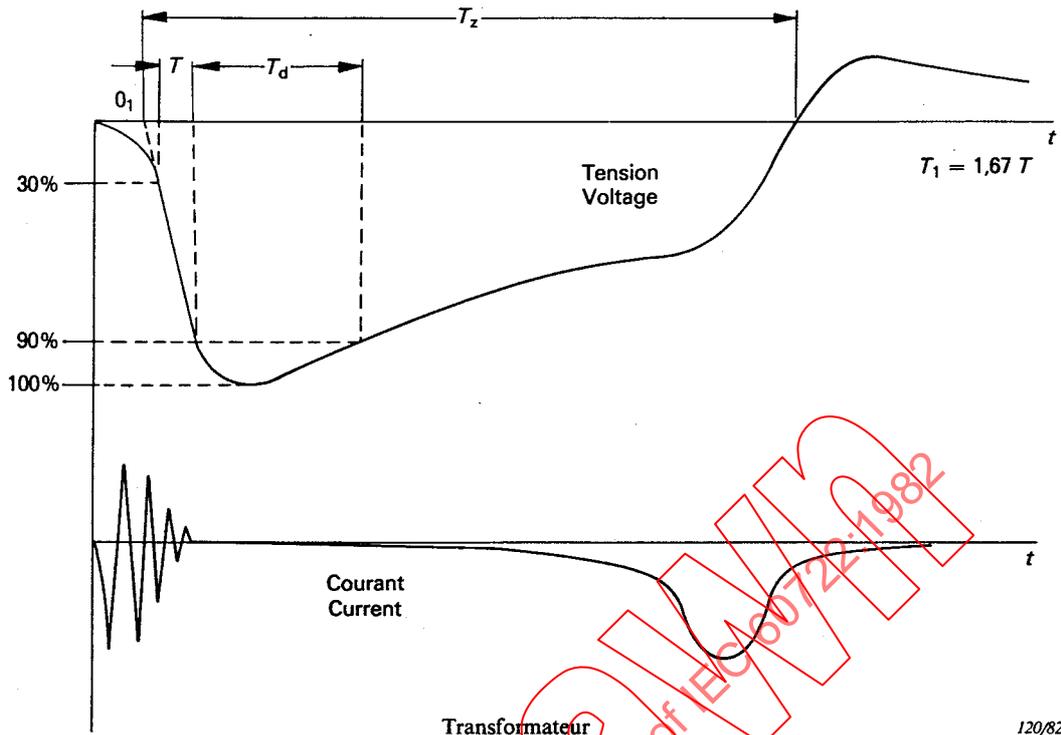
FIG. 1. — Circuit d'essai de choc caractéristique.
Typical impulse test circuit.



119/82

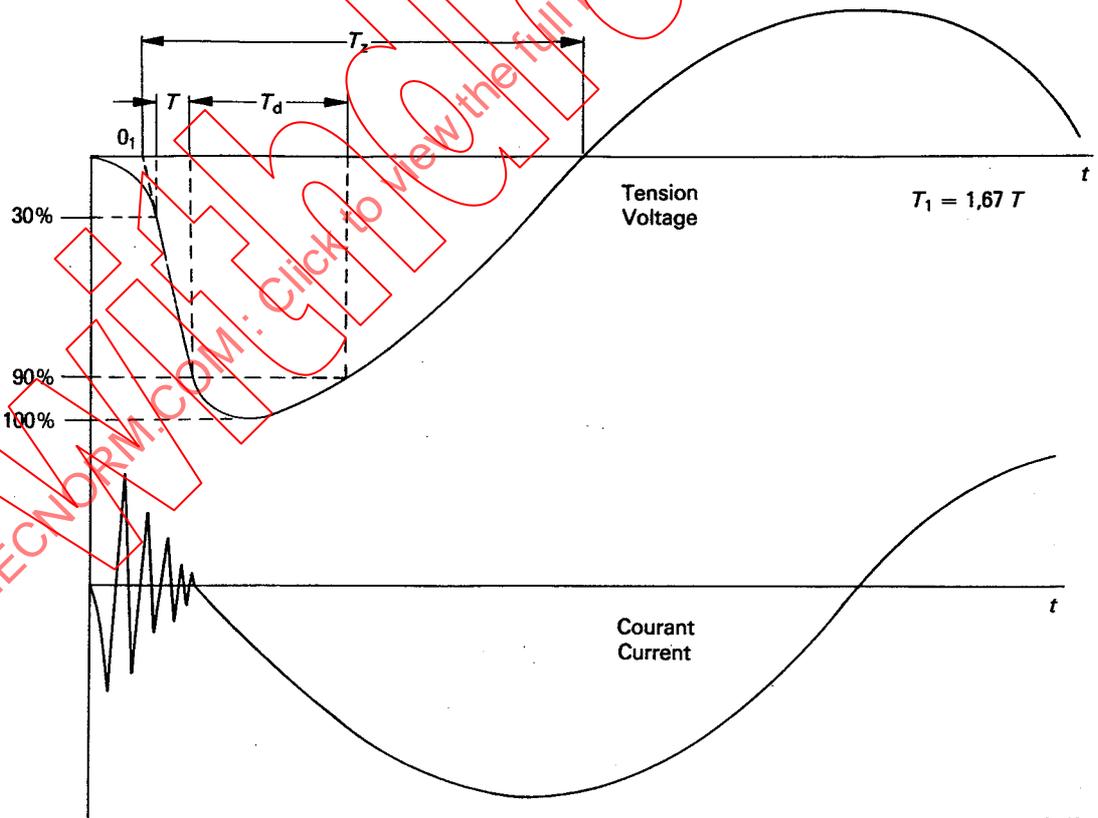
FIG. 2. — Connexions des bornes pour un essai au choc de foudre et méthodes de détection de défaut.

Lightning impulse test terminal connections and methods of failure detection.



a Transformateur
Transformer

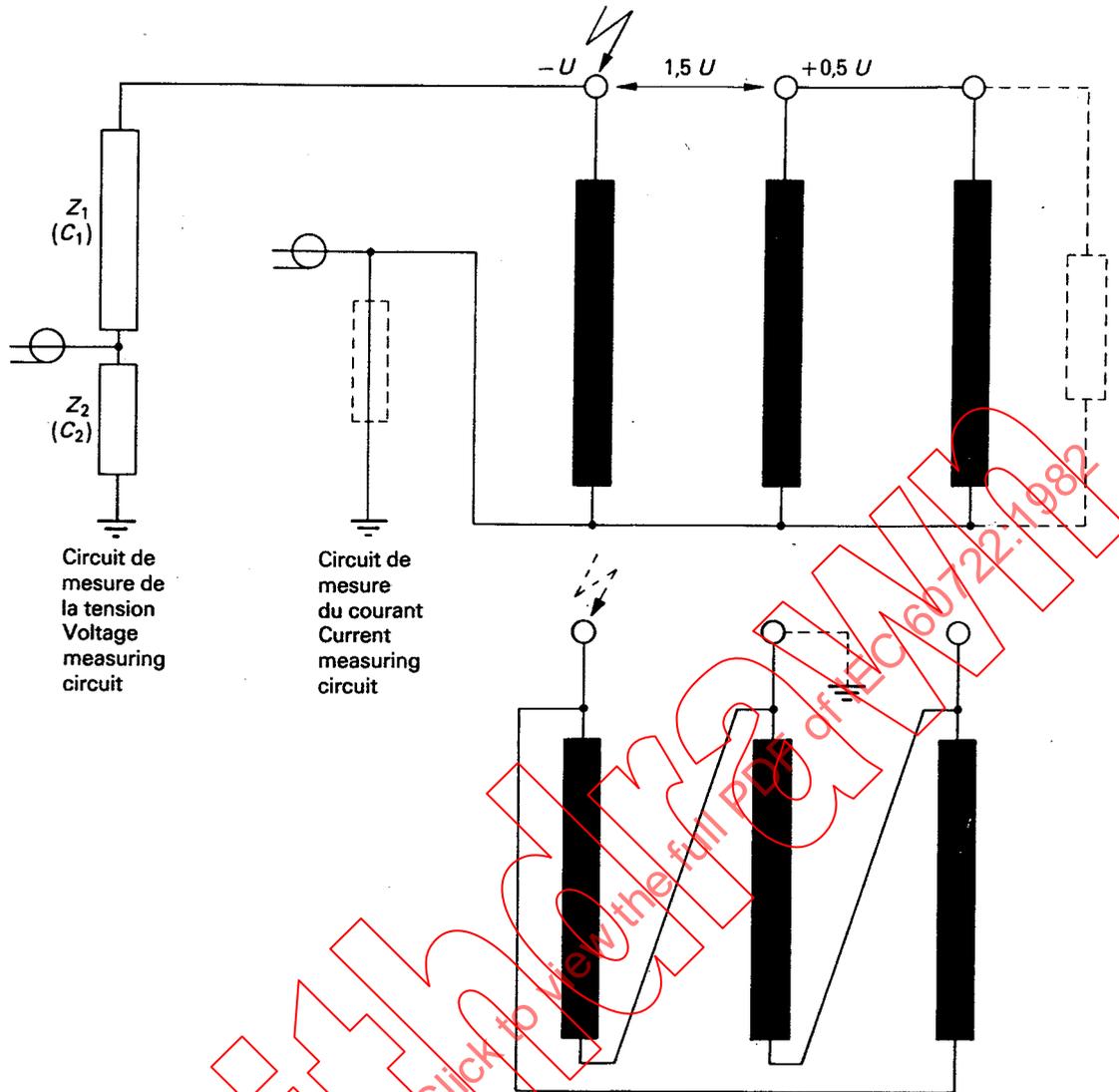
120/82



b Bobine d'inductance
Reactor

121/82

FIG. 3. — Formes d'onde de choc de manœuvre sur les transformateurs et les bobines d'inductance.
Transformer and reactor switching impulse waveforms.



En variante, l'application d'un choc sur un enroulement connecté en triangle est figurée en pointillé.
Alternative application of impulse to delta-connected winding is shown dotted.

FIG. 4. — Connexion des bornes pour un essai au choc de manœuvre et méthodes de détection de défaut.
Switching impulse test terminal connections and methods of failure detection.

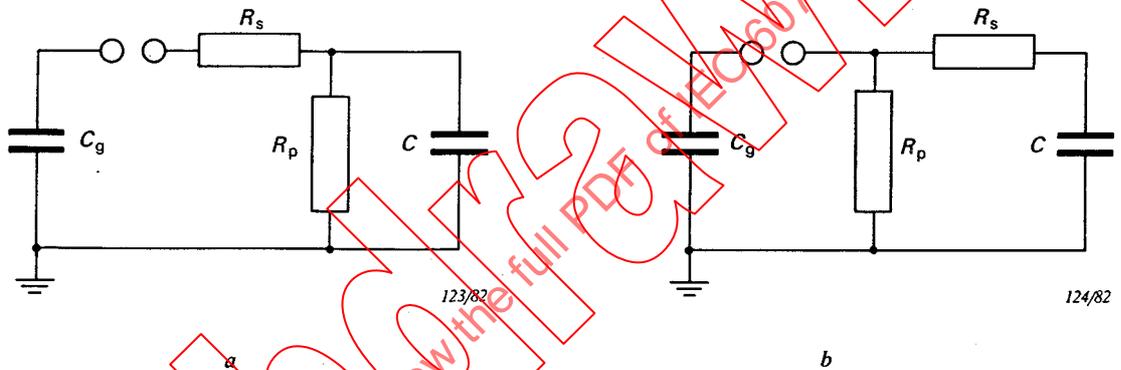
ANNEXE A

PRINCIPES DE RÉGLAGE DE LA FORME D'ONDE

Les principes de réglage des formes d'ondes dans un essai au choc de foudre des transformateurs sont indiqués au moyen des schémas simplifiés donnés aux figures 5 et 6, page 40. Ils doivent être subdivisés en deux parties importantes:

- enroulements à haute impédance;
- enroulements à basse impédance.

A1. Enroulements à haute impédance ($L_t > 100$ mH)



C_g = capacité du générateur de choc

$C = C_t + C_L + C_i$ (voir figure 1, page 34)

$R_s = R_{si} + R_{se}$, résistance série totale (voir figure 1)

R_p = résistance parallèle (voir figure 1)

FIG. 5. — Réglage de la forme d'onde pour les enroulements à haute impédance.

La durée du front sera:

$$T_1 \approx 3 \cdot \frac{R_s R_p}{R_s + R_p} \cdot \frac{C_g C}{C_g + C} \quad \text{(figure 5a)} \quad (1a)$$

ou:

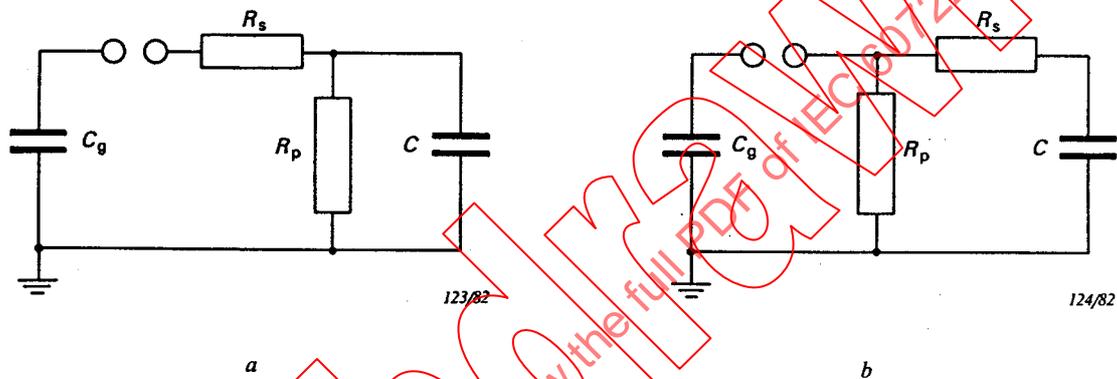
$$T_1 \approx 3 R_s \cdot \frac{C_g C}{C_g + C} \quad \text{(figure 5b)} \quad (1b)$$

APPENDIX A

PRINCIPLES OF WAVE-SHAPE CONTROL

The principles of how to control wave-shapes in lightning impulse testing of transformers are indicated by means of the simplified diagrams given in Figures 5 and 6, page 41. They need to be subdivided into two major aspects:

- for high impedance windings;
- for low impedance windings.

A1. High impedance windings ($L_t > 100$ mH)

- C_g = generator capacitance
 $C = C_t + C_L + C_1$ (see Figure 1, page 34)
 $R_s = R_{si} + R_{se}$, total series resistance (see Figure 1)
 R_p = parallel resistance (see Figure 1)

FIG. 5. — Wave-shape control for high impedance windings.

The front time will be:

$$T_1 \approx 3 \cdot \frac{R_s R_p}{R_s + R_p} \cdot \frac{C_g C}{C_g + C} \quad (\text{Figure 5a}) \quad (1a)$$

or:

$$T_1 \approx 3 R_s \cdot \frac{C_g C}{C_g + C} \quad (\text{Figure 5b}) \quad (1b)$$

et la durée jusqu'à mi-valeur:

$$T_2 \approx 0,7 (R_s + R_p) (C_g + C) \quad (\text{figure 5a}) \quad (2a)$$

ou:

$$T_2 \approx 0,7 R_p (C_g + C) \quad (\text{figure 5b}) \quad (2b)$$

Pour $R_p \gg R_s$ et $C_g \gg C$:

$$T_1 \approx 3 R_s \cdot C \text{ et } T_2 \approx 0,7 R_p \cdot C_g \quad (3)$$

En général, les paramètres de front et de queue sont ajustés selon les principes applicables aux charges purement capacitives. Toutefois, on doit souligner que la capacité équivalente du transformateur C_t , comprise dans la valeur de C , est physiquement différente selon que l'on considère le front ou la queue.

Pour la durée du front, C_t peut être calculé comme $C_t \approx C_B + \sqrt{C_s C_e}$ où C_B est la capacité de la traversée, C_s est la capacité série de l'enroulement et C_e est la capacité par rapport à la terre de l'enroulement.

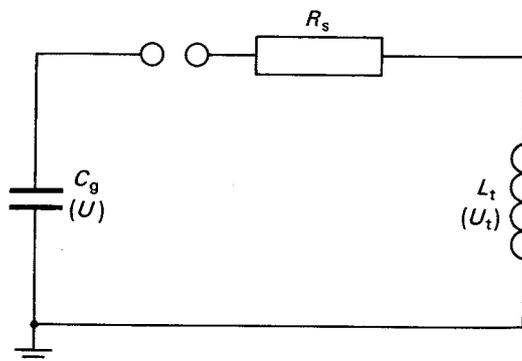
Pour la queue de l'onde, C_t peut être évaluée comme la somme de C_B plus une partie de C_e , fonction de la répartition initiale de la tension. Il est évident que la valeur de C_t , en ce qui concerne la queue, est de moindre importance dans la plupart des cas rencontrés (voir l'équation (3)).

Pour les enroulements à inductance équivalente L_t comprise dans la plage 20 mH à 100 mH, l'impédance de l'enroulement réduit considérablement la constante de temps de décharge ($\tau = R_p C_g$). Dans ces cas, la valeur de T_2 ne peut pas être ajustée directement selon l'équation (3). R_p doit être augmentée considérablement pour tenir compte de cet effet. L'expérience a montré qu'on peut avoir besoin de valeurs de R_p de deux à dix fois plus grandes que celles tirées de l'équation (3).

A2. Enroulements à basse impédance ($L_t < 20$ mH)

Pour les réglages du front, la même méthode que pour les enroulements à haute impédance s'applique.

Pour les réglages relatifs à la queue de l'onde, l'objet en essai peut être représenté par son inductance équivalente comme le montre la figure 6.



125/82

FIG. 6. — Réglage de la queue de l'onde pour les enroulements à basse impédance.

and the time to half-value:

$$T_2 \approx 0.7 (R_s + R_p) (C_g + C) \quad (\text{Figure 5a}) \quad (2a)$$

or:

$$T_2 \approx 0.7 R_p (C_g + C) \quad (\text{Figure 5b}) \quad (2b)$$

For $R_p \gg R_s$ and $C_g \gg C$:

$$T_1 \approx 3 R_s \cdot C \text{ and } T_2 \approx 0.7 R_p \cdot C_g \quad (3)$$

In general, both front and tail parameters are adjusted according to the principles applicable for purely capacitive loads. It should, however, be pointed out that the effective transformer capacitance C_t , included in the values of C , is a different physical quantity for front and tail considerations.

For the front time, C_t can be calculated as $C_t \approx C_B + \sqrt{C_s C_e}$ where C_B is the bushing capacitance, C_s is the winding series capacitance and C_e is the winding earth capacitance.

For the wave-tail, C_t can be estimated as C_B plus part of C_e , dependent on the initial voltage distribution. Evidently, the value of C_t for tail considerations is of minor importance in most practical cases (see equation (3)).

For windings of effective inductances L_t in the range 20 mH to 100 mH, the winding impedance considerably reduces the discharge time constant ($\tau = R_p C_g$). In these cases, the value of T_2 cannot directly be adjusted according to equation (3). R_p must be considerably enlarged to account for this effect. Experience has shown that values of R_p from two to ten times greater than derived from equation (3) may be needed.

A2. Low impedance windings ($L_t < 20$ mH)

For the front adjustments, the same applies as for high impedance windings.

For wave-tail adjustments, the test object can be represented by its effective inductance as indicated in Figure 6.

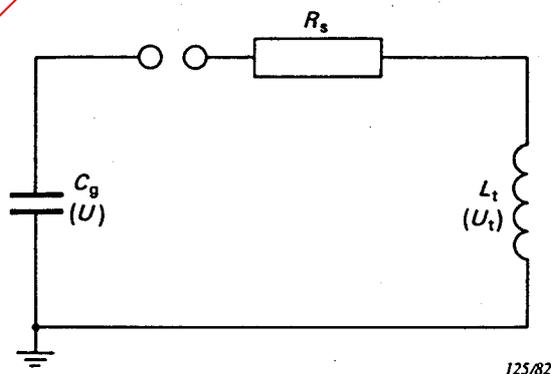


FIG. 6. — Wave-tail control for low impedance windings.

La tension d'essai U_t sera oscillante ou exponentielle, suivant la valeur du coefficient d'amortissement k du circuit. Des circuits à amortissement critique ($k = 1$) ou dépassant le régime critique ($k > 1$) conduisent à des courbes exponentielles. Toutefois, ils ne sont pas rencontrés normalement puisque les valeurs de résistance correspondantes donnent des durées de front longues qui ne sont pas admissibles.

Quand $k < 1$, la tension d'essai est donnée par:

$$U_t = U e^{-\alpha t} \left(\cos \omega t - \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t \right) = \frac{U}{\cos \varphi} e^{-\alpha t} \cos (\omega t + \varphi) \quad (4)$$

où: $\omega^2 = \omega_0^2 - \alpha^2$, $\omega_0^2 = 1/L_t C_g$, $\alpha = R_s/2 L_t$, $\text{tg } \varphi = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{k}{\sqrt{1-k^2}}$

et le coefficient d'amortissement $k = \frac{\alpha}{\omega_0} = \frac{R_s}{2 \sqrt{L_t/C_g}}$

Cette tension constitue une onde oscillatoire amortie, illustrée par la figure 7.

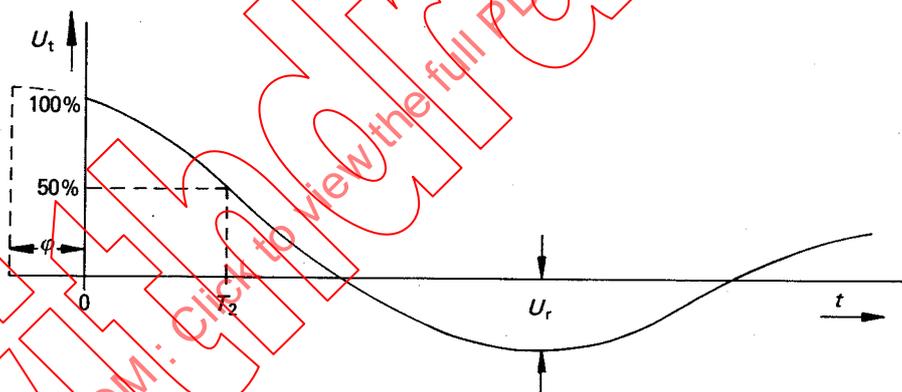


FIG. 7. — Oscillation amortie.

Pour une première estimation de T_2 , on assimile R_s à zéro. Alors, l'équation (4) devient $U_t = U \cos \omega_0 t$ et la durée jusqu'à mi-valeur est donnée par:

$$T_2 = \frac{1}{6} \cdot \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{\pi}{3} \sqrt{L_t C_g} \quad (5)$$

mais cette condition théorique donnerait une oscillation non amortie avec une crête de polarité opposée de 100%.

Avec la limitation à 50% de la crête de polarité opposée U_r , suivant la Publication 76-3 de la CEI, on doit introduire un taux d'amortissement considérable avec, pour conséquence, une

The test voltage U_t will be oscillatory or exponential, depending on the value of the damping coefficient k of the circuit. Critically ($k = 1$) or overcritically ($k > 1$) damped circuits result in exponential curves. However, these are normally not applicable since the corresponding resistance values give unacceptably long front times.

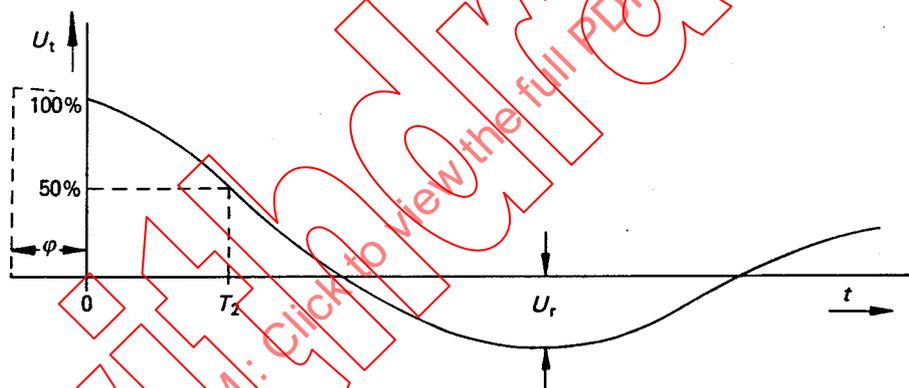
When $k < 1$, the test voltage is given by:

$$U_t = U e^{-\alpha t} \left(\cos \omega t - \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t \right) = \frac{U}{\cos \varphi} e^{-\alpha t} \cos (\omega t + \varphi) \quad (4)$$

where: $\omega^2 = \omega_0^2 - \alpha^2$, $\omega_0^2 = 1/L_t C_g$, $\alpha = R_s/2 L_t$, $\tan \varphi = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{k}{\sqrt{1-k^2}}$

and the damping coefficient $k = \frac{\alpha}{\omega_0} = \frac{R_s}{2\sqrt{L_t/C_g}}$

This voltage constitutes a damped oscillating wave, exemplified in Figure 7.



126/82

FIG. 7. — Damped oscillation.

For a first estimation of T_2 , R_s is assumed to be zero. Then equation (4) becomes $U_t = U \cos \omega_0 t$ and the time to half-value is given by:

$$T_2 = \frac{1}{6} \cdot \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{\pi}{3} \sqrt{L_t C_g} \quad (5)$$

but this theoretical condition would give an undamped oscillation with an opposite polarity peak of 100%.

With the limitation of the 50% opposite polarity peak, U_r , according to IEC Publication 76-3, a considerable degree of damping has to be introduced, with the effect that the time to

durée jusqu'à mi-valeur qui devient plus courte que celle donnée par l'équation (5). Dans ce cas, le coefficient d'amortissement k est égal à 0,25 et la durée jusqu'à mi-valeur est:

$$T_2 \approx \sqrt{0,5 L_t C_g} \quad (6)$$

Les équations (5) et (6) constituent un guide pour le réglage de la queue de l'onde par l'ajustement de l'inductance de l'objet en essai L_t , ou de la capacité du générateur C_g .

L_t est influencée par les connexions des enroulements non essayés. Avec les enroulements non essayés court-circuités et mis à la terre (connexions habituelles) L_t est l'inductance de fuite du transformateur. On peut augmenter l'inductance équivalente en branchant des résistances de charge sur les enroulements non essayés, avec toutefois la limite concernant la tension aux extrémités des enroulements non essayés qui ne doit pas dépasser 75% de leur niveau de tenue au choc de foudre.

C_g peut être modifiée par connexion série ou parallèle des étages du générateur de choc. Selon l'équation (7), la capacité minimale nécessaire du générateur est:

$$C_g \approx 2 \cdot \frac{T_2^2}{L_t} \quad (7)$$

Il y a cependant des cas où la condition de l'équation (7) ne peut pas toujours être remplie en raison des valeurs très faibles de L_t , ou quand L_t ne peut pas être augmentée davantage par une mise à la terre à travers une résistance des extrémités d'enroulements non essayés, en raison de la limitation de tension à 75% indiquée ci-dessus. Dans ces cas, la constante de temps de décharge du circuit est donnée par:

$$\tau = \frac{L_t}{R_s} \quad (8)$$

Cette équation met en évidence un moyen supplémentaire d'ajuster la queue de l'onde. Toutefois, une réduction importante de R_s entraînera un lancé excessif, ou des oscillations superposées à la crête de l'onde de choc, et aussi, comme on l'a dit précédemment, une crête de polarité opposée trop importante. Dans de tels cas, il est recommandé d'utiliser une capacité de charge additionnelle C_L pour le réglage du front de l'onde. La capacité de charge réduira alors les effets défavorables d'une faible résistance série R_s .

Si les méthodes de réglage de la forme d'onde, décrites ci-dessus, ne sont pas encore suffisantes pour atteindre la durée jusqu'à mi-valeur convenable, un compromis est nécessaire entre l'acceptation d'une durée jusqu'à mi-valeur plus courte et le recours à la mise à la terre à travers des résistances des extrémités non essayées de l'enroulement ou des enroulements en essai,

half-value will then be shorter than according to equation (5). For this case, the damping factor k equals 0.25 and the time to half-value will be:

$$T_2 \approx \sqrt{0.5 L_t C_g} \quad (6)$$

Equations (5) and (6) give guidance for the control of the wave-tail by adjustment of the inductance of the test object L_t , or of the generator capacitance C_g .

L_t is influenced by the connection of the non-tested windings. With the non-tested windings short-circuited and earthed (usual connection), L_t is the leakage inductance of the transformer. The effective inductance can be increased by resistance loading of the non-tested windings, with the limitation, however, that the voltages at the non-tested winding terminals shall not exceed 75% of their associated lightning impulse withstand level(s).

C_g can be altered by series or parallel connection of the stages of the impulse generator. According to equation (7) the required minimum generator capacitance will be:

$$C_g \approx 2 \cdot \frac{T_2^2}{L_t} \quad (7)$$

There are, however, cases where the condition of equation (7) cannot always be met because of extremely low values of L_t or where L_t can no longer be increased by resistance earthing of the non-tested winding terminals, because of the 75% voltage limitation referred to above. In these cases, the discharge time constant of the circuit is given by:

$$\tau = \frac{L_t}{R_s} \quad (8)$$

This equation indicates one further way of adjusting the wave-tail. However, severe reduction of R_s will result in excessive overshoot or superimposed oscillations at the crest of the impulse wave and also, as described earlier, in an excessive opposite polarity peak. In such cases, it is recommended to use additional load capacitance C_L for wave-front control. The load capacitance will then reduce the adverse effects of a small series resistor R_s .

If the above-indicated methods of wave-tail control are still not sufficient to attain the proper time to half-value, a compromise is necessary between either accepting a shorter time to half-value or resorting to resistance earthing at the non-tested terminal(s) of the winding(s) under

comme le montre la figure 8. Ici encore, la limitation de tension à 75% sur l'extrémité ou les extrémités non essayées s'applique. On doit toutefois donner la priorité à une durée jusqu'à mi-valeur plus courte.

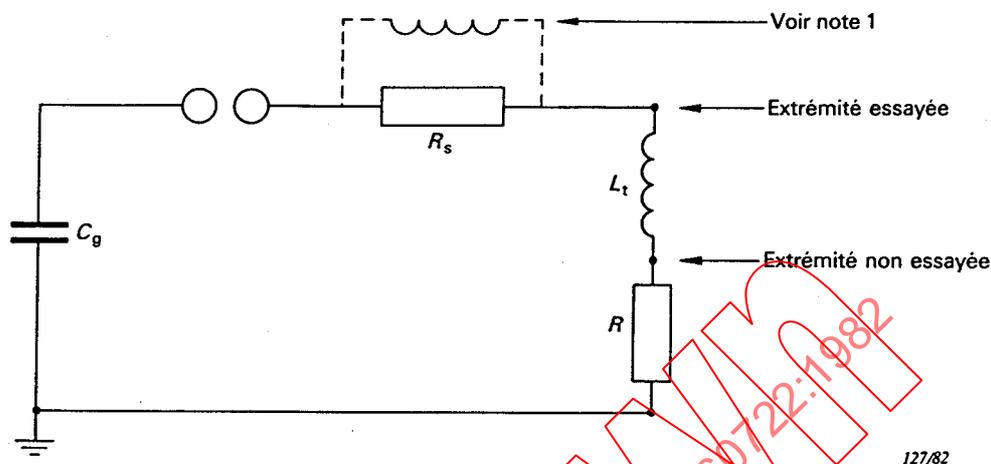


FIG. 8. — Mise à la terre à travers une résistance d'enroulements à basse impédance.

- Notes 1. — Une méthode supplémentaire d'amélioration de la durée jusqu'à mi-valeur est en cours d'élaboration et utilise une inductance additionnelle en parallèle avec R_s , augmentant ainsi l'inductance totale du circuit.
2. — A peu près les mêmes considérations s'appliquent pour le réglage de la durée du front du choc de manœuvre. Cependant, dans ce cas, la capacité équivalente du transformateur C_t est, pour la durée de front plus longue, égale à la capacité équivalente de l'enroulement par rapport à la terre C_e .

test, according to Figure 8. Here again, the 75% voltage limitation on the non-tested terminal(s) applies. Preference should be given however to a shorter time to half-value.

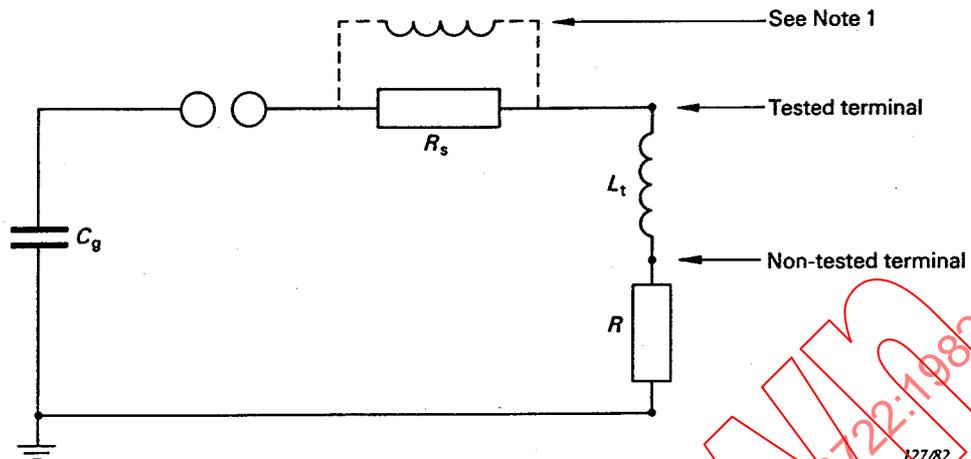


FIG. 8. — Resistance earthing of low impedance windings.

- Notes 1. — A further method of improving the time to half-value is being developed which uses an additional inductor in parallel with R_s , thus increasing the total circuit inductance
2. — Nearly the same considerations apply for the adjustment of the switching impulse front time. However, in this case the effective transformer capacitance C_t for the longer front time, is equal to the effective winding earth capacitance C_e .

ANNEXE B

ENREGISTREMENTS OSCILLOGRAPHIQUES CARACTÉRISTIQUES

Les oscillogrammes des conditions avec et sans défaut, reproduits dans les pages suivantes, sont extraits d'essais réels sur des transformateurs de puissance à colonnes avec des enroulements cylindriques concentriques et sur des bobines d'inductance shunt. L'attention est de nouveau attirée sur le fait que, bien que ces oscillogrammes soient caractéristiques, on ne peut pas assurer qu'une variation trouvée sur un autre transformateur, ou une autre bobine d'inductance, de tension, conception ou fabrication différentes, bien qu'apparemment semblable à une variation représentée ici, soit provoquée par un défaut identique. L'intention, en illustrant des défauts particuliers, est seulement de donner des indications de caractère général.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60722:1982

Withdrawn

APPENDIX B

TYPICAL OSCILLOGRAPHIC RECORDS

The oscillograms of fault and non-fault conditions reproduced on the following pages are extracted from records of actual tests on core-type power transformers with concentric cylindrical windings and on shunt reactors. Attention is again drawn to the fact that whilst these oscillograms are typical, it cannot be assumed that a discrepancy found on another transformer or reactor of different voltage, design and manufacture, although apparently similar to one illustrated herein, is caused by an identical fault. The intention of illustrating particular faults is to give general guidance only.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60722:1982

Withdrawn

SOMMAIRE DES EXEMPLES ILLUSTRÉS PAR DES OSCILLOGRAMMES

Essais au choc de foudre*Défauts en onde pleine*

<i>Page</i>	<i>Figure</i>	<i>Exemple</i>
52	9	Claquage entre ligne et neutre dans l'enroulement haute tension essayé
53	10	Claquage entre galettes dans l'enroulement haute tension essayé
54	11	Claquage entre couches dans un enroulement à prises à réglage grossier
55	12	Claquage entre connexions de prises d'un enroulement extérieur à prises
56	13	Claquage dans une section d'enroulement à prises à réglage fin
57	14	Claquage entre conducteurs en parallèle dans un enroulement principal haute tension
58	15	Claquage entre armatures d'une traversée

Défauts en onde coupée

59	16	Claquage entre spires dans l'enroulement haute tension essayé
60	17	Claquage entre spires dans un enroulement à prises à réglage fin

Ondes coupées — Effet de différences dans la durée jusqu'à la coupure

61	18	Essais sans différence dans les durées jusqu'à la coupure
62	19	Essais avec des différences importantes et faibles dans les durées jusqu'à la coupure

Origines possibles de différences en l'absence de défaut

63	20	Effet de la présence de résistances non linéaires sur le changeur de prises
64	21	Effet de différences dans l'amorçage du générateur

Essais au choc de manœuvre

65	22	Essai satisfaisant sur un transformateur
66	23	Claquage de l'enroulement haute tension essayé d'un transformateur
67	24	Essai satisfaisant sur une bobine d'inductance

SUMMARY OF EXAMPLES ILLUSTRATED IN OSCILLOGRAMS

Lightning impulse tests*Full wave faults*

<i>Page</i>	<i>Figure</i>	<i>Example</i>
52	9	Breakdown, line to neutral, across tested high-voltage winding
53	10	Breakdown, between discs, in tested high-voltage winding
54	11	Breakdown, interlayer, in coarse-step tapping winding
55	12	Breakdown between tapping leads of outside tapping winding
56	13	Breakdown across one section in a fine-step tapping winding
57	14	Breakdown between parallel conductors in a multiconductor main high-voltage winding
58	15	Breakdown between bushing foils

Chopped wave faults

59	16	Breakdown between turns in tested high-voltage winding
60	17	Breakdown between turns in a fine-step tapping winding

Chopped waves — Effects of differences in times to chopping

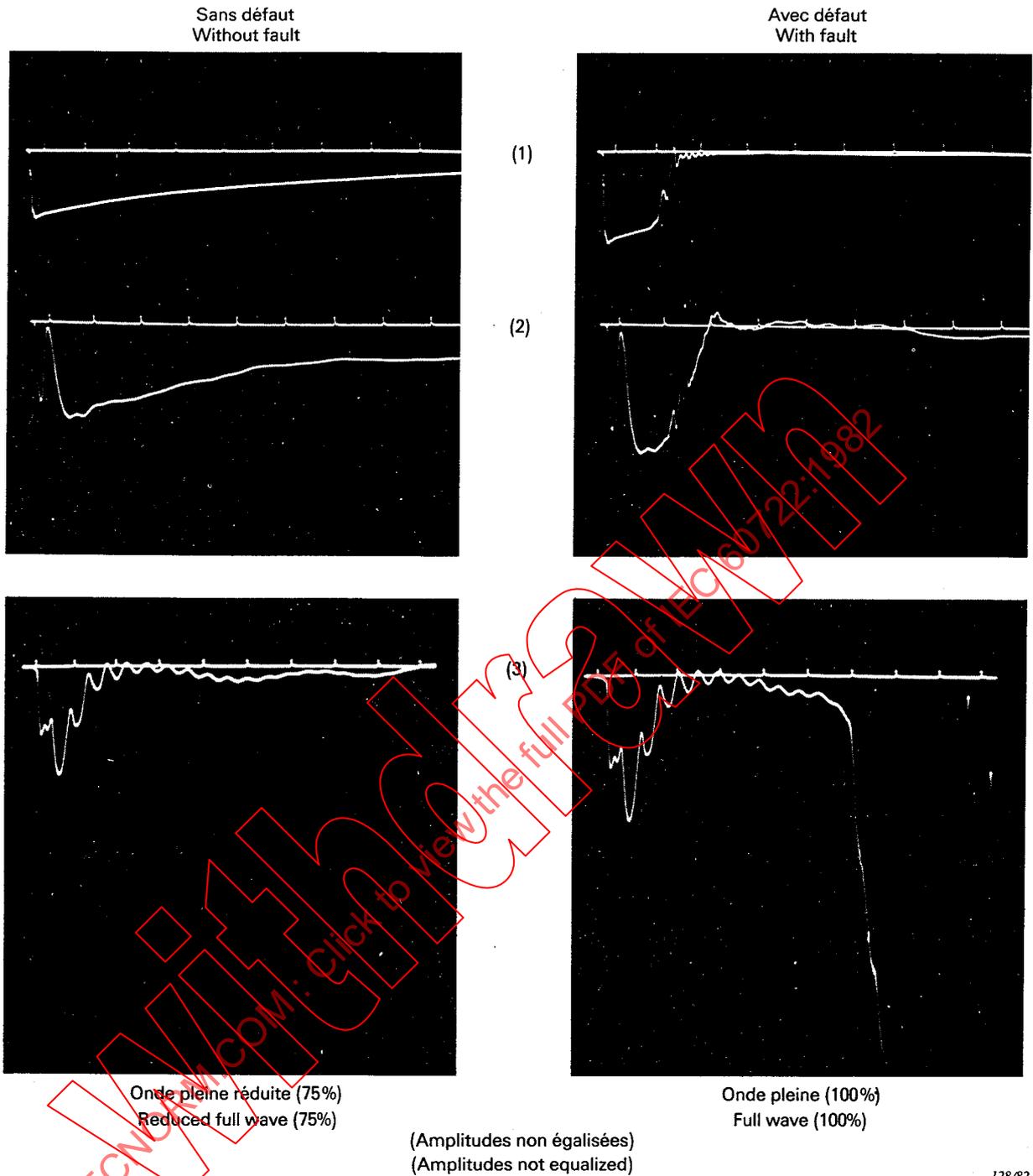
61	18	Tests with no difference in times to chopping
62	19	Tests with large and small differences in times to chopping

Non-faults causing discrepancies

63	20	Effect of non-linear resistors in tap-changer
64	21	Effect of generator firing differences

Switching impulse tests

65	22	Satisfactory test on transformer
66	23	Breakdown of tested high-voltage winding of a transformer
67	24	Satisfactory test on reactor



- (1) Choc appliqué, balayage 100 μ s
- (2) Tension transmise à l'enroulement basse tension, balayage 100 μ s
- (3) Courant de neutre, balayage 25 μ s

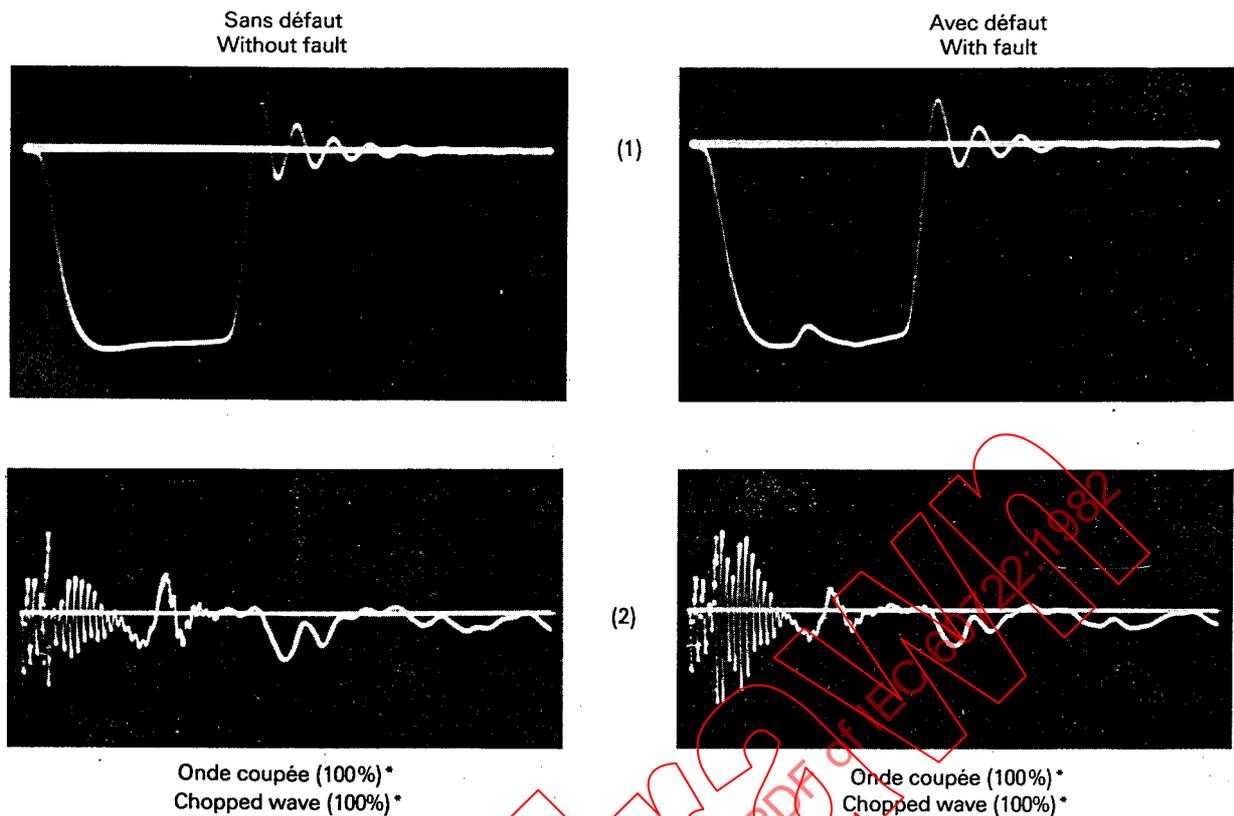
Défaut apparaissant après 13 μ s environ, clairement mis en évidence par les oscillogrammes de tension, de tension transmise et de courant de neutre

- (1) Applied impulse, 100 μ s sweep
- (2) Voltage transferred to low-voltage winding, 100 μ s sweep
- (3) Neutral current, 25 μ s sweep

Failure after approximately 13 μ s, clearly indicated in voltage, transferred voltage and neutral current oscillograms

128/82

FIG. 9. — Choc de foudre — Défaut en onde pleine. Claquage entre ligne et neutre dans l'enroulement d'un transformateur de centrale 400 kV.
Lightning impulse—Full-wave failure. Line to neutral breakdown across high-voltage winding of 400 kV generator transformer.



129/82

- (1) Choc appliqué, balayage $10 \mu\text{s}$
 (2) Courant de neutre, balayage $100 \mu\text{s}$

- (1) Applied impulse, $10 \mu\text{s}$ sweep
 (2) Neutral current, $100 \mu\text{s}$ sweep

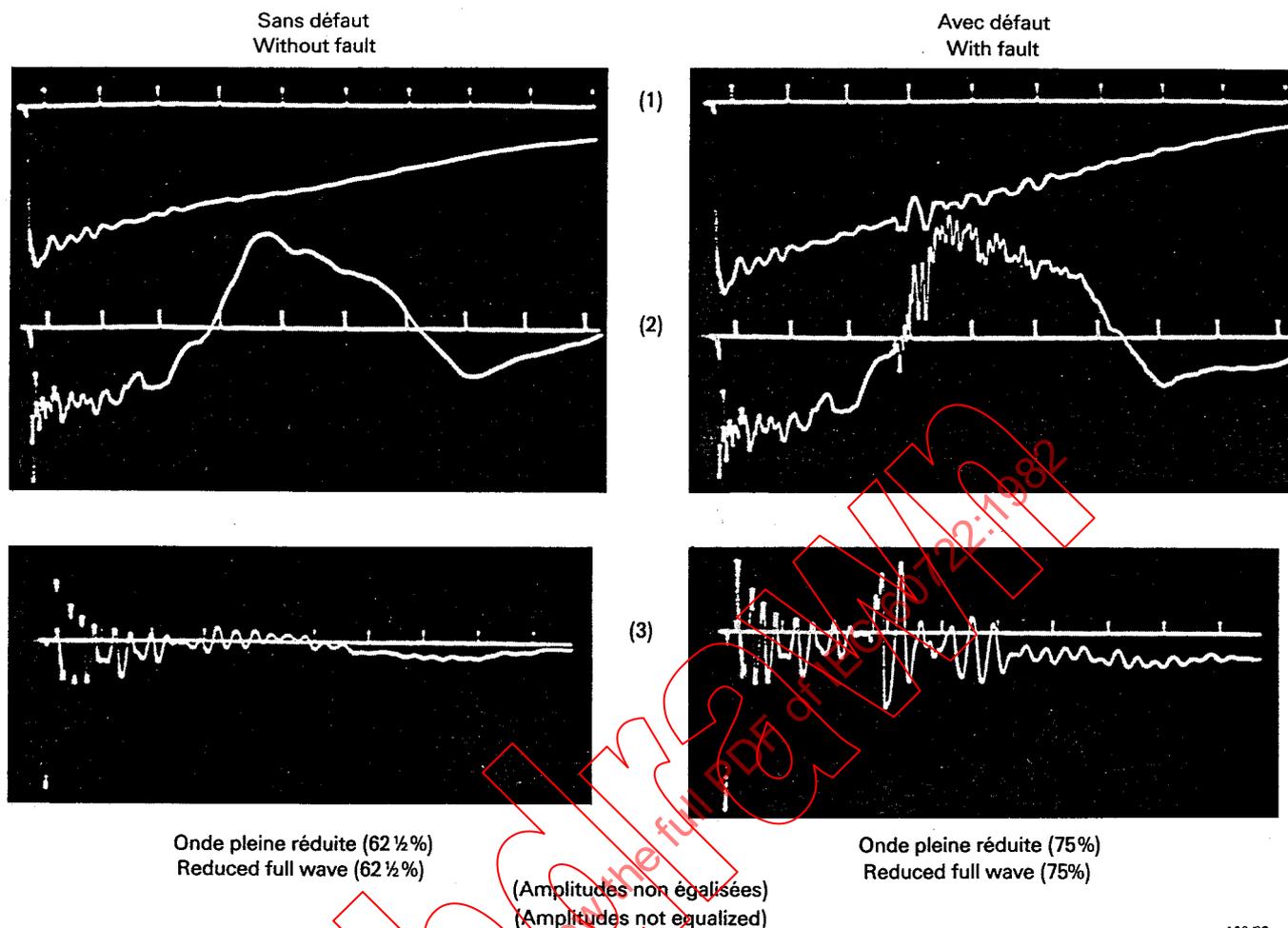
Défaut apparaissant après $2 \mu\text{s}$ environ, clairement mis en évidence par les oscillogrammes de tension et de courant de neutre.

Failure after approximately $2 \mu\text{s}$, clearly indicated in voltage and neutral current oscillograms.

* Puisque le défaut apparaît avant la coupure, il est alors considéré comme un défaut en onde pleine

* Since failure occurred before the instant of chopping it is therefore regarded as a full-wave failure

FIG. 10. — Choc de foudre — Défaut en onde pleine. Claquage entre galettes à l'entrée de l'enroulement haute tension d'un transformateur 115 kV.
 Lightning impulse — Full-wave failure. Breakdown between discs at entrance to high-voltage winding of 115 kV transformer.



- (1) Choc appliqué, balayage 100 μ s
- (2) Courant capacitif écoulé à la terre par l'enroulement adjacent court-circuité, balayage 100 μ s
- (3) Courant de neutre, balayage 100 μ s

Défaut apparaissant après 30 μ s, clairement mis en évidence par les oscillogrammes de tension, de courant capacitif et de courant de neutre

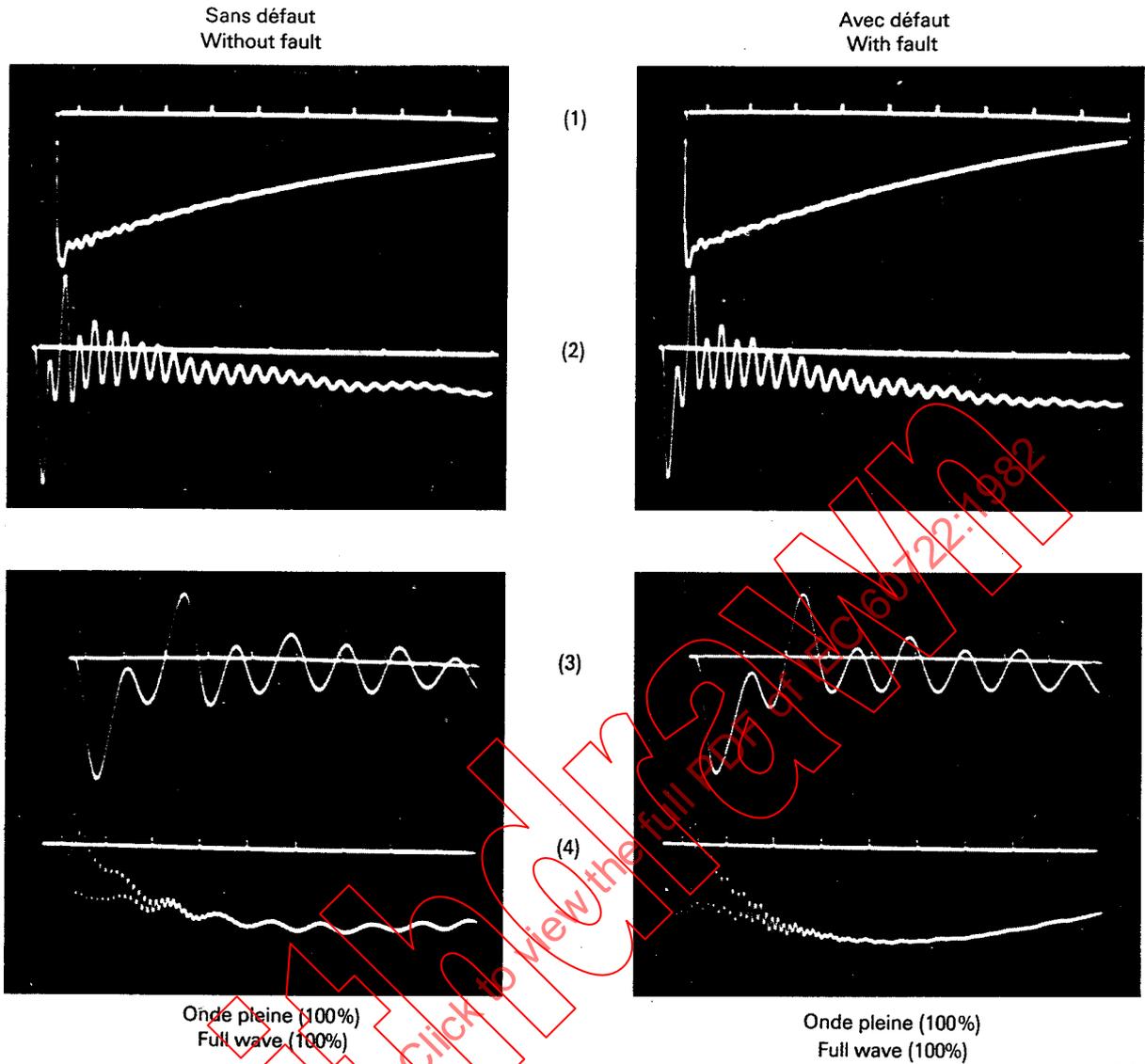
- (1) Applied impulse, 100 μ s sweep
- (2) Capacitively transferred current from the shorted, adjacent winding to earth, 100 μ s sweep
- (3) Neutral current, 100 μ s sweep

Failure after 30 μ s, clearly indicated in voltage, capacitively transferred current and neutral current oscillograms

130/82

FIG. 11. — Choc de foudre — Défaut en onde pleine. Claquage entre couches dans un enroulement à prises à réglage grossier d'un transformateur 400/220 kV.

Lightning impulse—Full-wave failure. Interlayer breakdown in coarse-step tapping winding of a 400/220 kV transformer.



- (1) Choc appliqué, balayage 100 μ s
 (2) Courant de neutre, balayage 100 μ s
 (3) Courant de neutre, balayage 25 μ s
 (4) Courant de neutre, balayage 250 μ s

Défaut mis en évidence par de petites variations sur tous les enregistrements de l'application de la deuxième onde pleine de tension

- (1) Applied impulse, 100 μ s sweep
 (2) Neutral current, 100 μ s sweep
 (3) Neutral current, 25 μ s sweep
 (4) Neutral current, 250 μ s sweep

Failure indicated by minor variations on all records of second full wave voltage application

131/82

FIG. 12. — Choc de foudre — Défaut en onde pleine. Claquage entre connexions de deux sections de 1,1 % de l'enroulement à prises extérieur d'un transformateur de centrale 400 kV.
 Lightning impulse—Full-wave failure. Breakdown between leads of two 1.1% sections of outside tapping winding of 400 kV generator transformer.