

**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')
Allemagne
Australie
Autriche
Belgique
Bulgarie
Canada

Danemark
Égypte
Espagne
France
Hongrie
Japon
Norvège
Pays-Bas

Pologne
Royaume-Uni
Suède
Suisse
Tchécoslovaquie
Turquie
Union des Républiques
Socialistes Soviétiques

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
Canada	Norway	Socialist Republics
Czechoslovakia	Poland	United Kingdom
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_{sc} , 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 μ s and 6 μ 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 $\leq 10 \mu s$ 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 $50 \mu s$;
- pour les ondes coupées, un temps de balayage de $10 \mu s$ à $25 \mu s$ 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.)