

# norme européenne

NF EN 60076-4

Décembre 2002

norme française

Indice de classement : C 52-176-4

ICS 29.180

## Transformateurs de puissance

### Partie 4 : Guide pour les essais au choc de foudre et au choc de manœuvre – Transformateurs de puissance et bobines d'inductance

E : Power transformers  
Part 4 : Guide to the lightning impulse and switching impulse testing –  
Power transformers and reactors

D : Leistungstransformatoren  
Teil 4 : Leitfaden zur Blitz-und Schaltstoßspannungsprüfung von  
Leistungstransformatoren und Drosselspulen

## Norme française homologuée

par décision du Directeur Général d'afnor le 20 novembre 2002 pour prendre effet à compter du 20 décembre 2002.

## Correspondance

La norme européenne EN 60076-4:2002 a le statut d'une norme française. Elle reproduit intégralement la publication CEI 60076-4:2002.

## Analyse

Le présent document donne des directives et des commentaires explicatifs sur les méthodes d'essais d'impulsions de choc de foudre et de manœuvre existantes pour les transformateurs de puissance, afin de compléter les prescriptions de la CEI 60076-3. Il est également généralement applicable aux essais des bobines d'inductance (voir la CEI 60289). Les modifications aux méthodes des transformateurs de puissance sont indiquées, si nécessaire.

dow : 2005-09-01

## Descripteurs

Transformateur de puissance, bobine d'inductance, onde de choc, essai au choc électrique, impulsion

## Modifications

## Correction

éditée et diffusée par l'Union Technique de l'Electricité et de la Communication (UTE) – BP 23 – 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex – Tél: 01 40 93 62 00 – Fax: 01 40 93 44 08 – E-mail: ute@ute.asso.fr – Internet: <http://www.ute-fr.com/>  
diffusée également par l'association française de normalisation (afnor), 11, rue de Pressensé, 93571 Saint-Denis La Plaine Cedex – tél. : 01 41 62 80 00



**AVANT-PROPOS NATIONAL**

*Ce document constitue la version française complète de la norme européenne EN 60076-4:2002 en reprenant le texte de la publication CEI 60076-4:2002.*

*Les modifications du CENELEC, dans le présent document l'annexe ZA uniquement, sont signalées par une ligne verticale dans la marge gauche du texte.*

*Après consultation de son Conseil d'Administration et enquête probatoire, l'Union technique de l'Électricité et de la Communication a voté favorablement au CENELEC sur le projet de EN 60076-4, en mai 2002.*

**Correspondance entre les documents internationaux cités en référence  
et les documents CENELEC et/ou français à appliquer**

Document international cité en référence	Document correspondant			
	CENELEC (EN ou HD)		français (NF ou UTE)	
CEI 60060-1	-	HD 588.1 S1	1991	-
CEI 60060-2	-	EN 60060-2	1994	NF EN 60060-2 (1995) (C 41-102)
CEI 60076-3, mod	2000	EN 60076-3	2001	NF EN 60076-3 (2002) (C 52-176-3)
CEI 60289	-	EN 60289	1994	NF EN 60289 (1996) (C 52-300)
CEI 61083-1	-	EN 61083-1	2001	NF EN 61083-1 (2001) (C 41-105)
CEI 61083-2	-	EN 61083-2	1997	NF EN 61083-2 (1997) (C 41-108)
<p><i>Note : Les documents de la classe C sont en vente à l'Union technique de l'Électricité et de la Communication - BP 23 - 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex - Tél. : 01 40 93 62 00 ainsi qu'au service diffusion de l'Association française de normalisation – 11, rue de Pressensé – 93571 Saint-Denis La Plaine Cedex - Tél. : 01 41 62 80 00.</i></p> <p><i>Les documents CEI sont en vente à l'UTE.</i></p>				

**NORME EUROPÉENNE**  
**EUROPÄISCHE NORM**  
**EUROPEAN STANDARD**

**EN 60076-4**

Septembre 2002

ICS 29.180

Descripteurs : Transformateur de puissance, bobine d'inductance, onde de choc, essai au choc électrique, impulsion

Version française

**Transformateurs de puissance**  
**Partie 4: Guide pour les essais au choc de foudre**  
**et au choc de manoeuvre -**  
**Transformateurs de puissance et bobines d'inductance**  
**(CEI 60076-4:2002)**

Leistungstransformatoren  
Teil 4: Leitfaden zur Blitz-  
und Schaltstoßspannungsprüfung  
von Leistungstransformatoren  
und Drosselspulen  
(IEC 60076-4:2002)

Power transformers  
Part 4: Guide to the lightning impulse  
and switching impulse testing -  
Power transformers and reactors  
(IEC 60076-4:2002)

La présente Norme européenne a été adoptée par le CENELEC le 2002-09-01. Les membres du CENELEC sont tenus de se soumettre au Règlement Intérieur du CEN/CENELEC qui définit les conditions dans lesquelles doit être attribué, sans modification, le statut de norme nationale à la Norme européenne.

Les listes mises à jour et les références bibliographiques relatives à ces normes nationales peuvent être obtenues auprès du Secrétariat Central ou auprès des membres du CENELEC.

La présente Norme européenne existe en trois versions officielles (allemand, anglais, français). Une version dans une autre langue faite par traduction sous la responsabilité d'un membre du CENELEC dans sa langue nationale, et notifiée au Secrétariat Central, a le même statut que les versions officielles.

Les membres du CENELEC sont les comités électrotechniques nationaux des pays suivants : Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Italie, Luxembourg, Malte, Norvège, Pays-Bas, Portugal, République Tchèque, Royaume-Uni, Slovaquie, Suède et Suisse.

**CENELEC**

Comité Européen de Normalisation Electrotechnique  
Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung  
European Committee for Electrotechnical Standardization

**Secrétariat Central: rue de Stassart 35, B - 1050 Bruxelles**

### **Avant-propos**

Le texte du document 14/413/FDIS, future édition 1 de la CEI 60076-4, préparé par le CE 14 de la CEI, Transformateurs de puissance, a été soumis au vote parallèle CEI-CENELEC et a été approuvé par le CENELEC comme EN 60076-4 le 2002-09-01.

Les dates suivantes ont été acceptées :

- date limite à laquelle la EN doit être mise en application  
au niveau national par publication d'une norme  
nationale identique ou par entérinement (dop) 2003-06-01
- date limite à laquelle les normes nationales  
conflictuelles doivent être annulées (dow) 2005-09-01

Les annexes appelées "normatives" font partie du corps de la norme.

Les annexes appelées "informatives" ne sont données que pour information.

Dans la présente norme, l'annexe ZA est normative et les annexes A et B sont informatives.  
L'annexe ZA a été ajoutée par le CENELEC.

-----

## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS .....	2
1 Domaine d'application.....	6
2 Références normatives .....	6
3 Généralités .....	7
4 Formes d'onde spécifiées .....	7
5 Circuit d'essai .....	7
6 Etalonnage .....	9
7 Essais d'impulsion de choc de foudre .....	9
7.1 Formes d'onde.....	9
7.2 Impulsions hachées sur la traîne .....	10
7.3 Raccordements aux bornes et méthodes applicables de détection de défaillances .....	11
7.4 Méthodes d'essai.....	12
7.5 Enregistrement des essais.....	13
8 Essais d'impulsion de choc de manœuvre.....	16
8.1 Prescriptions particulières.....	16
8.2 Transformateurs .....	16
8.3 Bobines d'inductance.....	21
9 Interprétation des oscillogrammes ou des enregistrements numériques .....	22
9.1 Impulsion de choc de foudre .....	22
9.2 Impulsion de choc de manœuvre .....	25
10 Traitement numérique, comprenant l'analyse de fonction de transfert .....	25
11 Rapports d'essai de l'impulsion de choc.....	27
Annexe A (informative) Principes de contrôle de la forme d'onde .....	33
Annexe B (informative) Oscillogrammes et enregistrements numériques typiques.....	40
Annexe ZA (normative) Références normatives à d'autres publications internationales avec les publications européennes correspondantes .....	66
Figure 1 – Circuit d'essai d'impulsion de choc typique.....	29
Figure 2 – Raccordements aux bornes pour l'essai d'impulsion de choc de foudre et méthodes applicables de détection de défaillances .....	30
Figure 3 – Formes d'onde de l'impulsion de choc de manœuvre de transformateur et de bobine d'inductance.....	31
Figure 4 – Raccordements aux bornes pour l'essai d'impulsion de choc de manœuvre et méthodes de détection de défaillances.....	32
Figure A.1 – Contrôle de la forme d'onde pour des enroulements d'impédance élevée .....	33
Figure A.2 – Contrôle de la queue d'onde pour des enroulements d'impédance faible .....	35
Figure A.3 – Oscillation amortie .....	36
Figure A.4 – Effets dus à la courte longueur de la queue d'onde .....	38
Figure A.5 – Enroulement mis à la terre par une résistance .....	39
Figure A.6 – Mise à la terre par résistance des enroulements à basse d'impédance.....	39

Figure B.1 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde – Claquage ligne au neutre à travers l'enroulement haute tension du transformateur rotatif 400 kV.....	42
Figure B.2 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde – Claquage entre disques à l'entrée de l'enroulement haute tension du transformateur 115 kV.....	43
Figure B.3 – Impulsion de choc de foudre, claquage entre couches, dans l'enroulement à prises à pas grossier d'un transformateur 400/220 kV.....	44
Figure B.4 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde – Claquage entre les fils de deux sections 1,1 % de l'enroulement à prises extérieur du transformateur rotatif 400 kV.....	45
Figure B.5 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde – Claquage court-circuitant une section de l'enroulement à prises à pas fin d'un transformateur 220 kV.....	46
Figure B.6 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde – Claquage entre les conducteurs parallèles dans un enroulement principal à haute tension d'un transformateur 220/110 kV.....	47
Figure B.7 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde – Claquage entre clinquants de bague 66 kV sur l'enroulement essayé.....	48
Figure B.8 – Impulsion de choc de foudre, défaillance onde hachée – Claquage entre spires dans l'enroulement principal à haute tension d'un transformateur 115 kV.....	49
Figure B.9 – Impulsion de choc de foudre, défaillance onde hachée – Claquage entre spires dans un enroulement à prises à pas fin d'un transformateur 220 kV.....	50
Figure B.10 – Impulsion hachée de choc de foudre – Impulsions à différents niveaux de tension avec des temps de hachage identiques, lors des essais d'un transformateur 115 kV.....	51
Figure B.11 – Impulsion hachée de choc de foudre – Effets des différences dans les temps de hachage lors des essais d'un transformateur 220 kV.....	52
Figure B.12 – Pleine impulsion de choc de foudre – Effet des résistances non linéaires incorporées dans la sortie du neutre du changeur de prises en charge, d'un transformateur avec des enroulements séparés.....	53
Figure B.13 – Pleine impulsion de choc de foudre – Effet des différences de démarrage des étages du générateur à différents niveaux de tension, lors des essais d'un transformateur 400 kV.....	54
Figure B.14 – Impulsion de choc de manœuvre – Essai satisfaisant sur un transformateur rotatif triphasé 400 kV.....	55
Figure B.15 – Impulsion de choc de manœuvre – Claquage par amorçage axial de l'enroulement principal à haute tension d'un transformateur rotatif monophasé 525 kV.....	56
Figure B.16 – Impulsion de choc de manœuvre – Essai satisfaisant sur une bobine d'inductance monophasée 525 kV, 33 Mvar.....	57
Figure B.17 – Impulsion de choc de manœuvre – Comparaison de la fonction de transfert d'une pleine onde et d'une onde hachée.....	58
Figure B.18 – Pleine impulsion de choc de foudre – Evaluation d'une forme d'onde non normalisée – Influence des algorithmes de lissage intégrés dans les numériseurs.....	59
Figure B.19 – Pleine impulsion de choc de foudre – Forme d'onde non normalisée, oscillations superposées avec amplitude >50 % et fréquence <0,5 MHz.....	59
Figure B.20 – Impulsion hachée de choc de foudre – Onde hachée non normalisée sur un enroulement de type couche.....	60
Figure B.21 – Pleine impulsion de choc de foudre – Forme d'onde non normalisée, comparaison de formes d'onde non normalisées avec des numériseurs de différentes fabrications à partir du même enregistrement.....	61

Figure B.22 – Pleine impulsion de choc de foudre – Problème de circuit d'essai provoqué par un amorçage à la terre d'un câble de mesure .....	63
Figure B.23 – Pleine impulsion de choc de foudre – Oscillogramme de défaillance montrant un amorçage de fil de changeur de prises entre prises et un amorçage entre enroulement des pas grossier et fin.....	65
Tableau B.1 – Sommaire des exemples illustrés par les oscillogrammes et les enregistrements numériques.....	40

## **TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –**

### **Partie 4 : Guide pour les essais au choc de foudre et au choc de manœuvre – Transformateurs de puissance et bobines d'inductance**

#### **1 Domaine d'application**

La présente partie de la CEI 60076 donne des directives et des commentaires explicatifs sur les méthodes d'essais d'impulsions de choc de foudre et de manœuvre existantes pour les transformateurs de puissance, afin de compléter les prescriptions de la CEI 60076-3. Il est également généralement applicable aux essais des bobines d'inductance (voir la CEI 60289). Les modifications aux méthodes des transformateurs de puissance sont indiquées, si nécessaire.

Des informations sont données sur les formes d'onde, les circuits d'essai comprenant les connexions d'essai, les pratiques de mise à la terre, les méthodes de détection de défaillance, les méthodes d'essai, les techniques de mesurage et l'interprétation des résultats.

Partout où elles sont applicables, les techniques d'essai sont celles qui sont recommandées par la CEI 60060-1 et la CEI 60060-2.

#### **2 Références normatives**

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CEI 60060-1, *Techniques des essais à haute tension – Partie 1 : Définitions et prescriptions générales relatives aux essais*

CEI 60060-2, *Techniques des essais à haute tension – Partie 2 : Systèmes de mesure*

CEI 60076-3, *Transformateurs de puissance – Partie 3 : Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement dans l'air*

CEI 60289, *Bobines d'inductance*

CEI 61083-1, *Appareils et logiciels utilisés pour les mesures pendant les essais de choc à haute tension – Partie 1 : Prescriptions pour les appareils*

CEI 61083-2, *Enregistreurs numériques pour les mesures pendant les essais de choc à haute tension – Partie 2 : Evaluation du logiciel utilisé pour obtenir les paramètres des formes d'onde de choc*



### 3 Généralités

La présente norme est principalement basée sur l'utilisation des générateurs conventionnels d'impulsion de choc d'essais de foudre et de manœuvre des transformateurs et des bobines d'inductance. La pratique de la génération d'impulsion de choc de manœuvre avec la décharge d'un condensateur séparé dans un enroulement de tension intermédiaire ou de basse tension est également applicable. Toutefois la méthode qui met en oeuvre une inductance additionnelle en série avec le condensateur, pour donner des oscillations légèrement amorties transférées dans l'enroulement haute tension, n'est pas applicable.

Les moyens alternatifs de génération d'impulsion de choc de manœuvre ou de simulation, tels que l'interruption de courant continu dans un enroulement de tension intermédiaire ou de basse tension ou l'application d'une partie de période de la tension à la fréquence du réseau, ne sont pas traités, car ces méthodes ne sont pas applicables d'une manière aussi générale.

Les différentes considérations dans le choix des circuits d'essai (connexions des raccordements) pour la foudre et des essais de choc de manœuvre s'appliquent pour des transformateurs et des bobines d'inductance. Sur des transformateurs, tous les raccordements et les enroulements peuvent être essayés en impulsion de choc de foudre à des niveaux spécifiques et indépendants. Cependant, en essais d'impulsion de choc de manœuvre, en raison de la tension transférée par magnétisme, un niveau d'essai spécifié ne peut être obtenu que sur un seul enroulement (voir la CEI 60076-3).

Alors que, sur les bobines d'inductance, l'essai d'impulsion de choc de foudre est semblable à celui effectué sur des transformateurs, c'est-à-dire que toutes les bornes peuvent être essayées séparément, d'autres facteurs interviennent et différents problèmes apparaissent pour les essais d'impulsion de choc de manœuvre. Par conséquent, dans cette norme, les essais d'impulsion de choc de foudre sont couverts par un texte commun, à la fois pour les transformateurs et les bobines d'inductance, alors que les essais d'impulsion de choc de manœuvre sont traités séparément pour les deux types d'appareils.

### 4 Formes d'onde spécifiées

Les formes d'onde de tension à utiliser normalement pendant les essais d'impulsion de choc de foudre et de manœuvre sur les transformateurs et les bobines d'inductance sont donnés dans la CEI 60076-3 et les méthodes pour leur détermination figurent dans la CEI 60060-1.

### 5 Circuit d'essai

L'aménagement physique des équipements d'essai, de l'objet en essai et des circuits de mesure peut être divisé en trois circuits principaux :

- le circuit principal comprenant le générateur d'impulsion, les composants additionnels de mise en forme de l'onde et l'objet en essai ;
- le circuit de mesure de tension ;
- éventuellement le circuit de hachage.

Cet aménagement de base est donné à la figure 1.

Les paramètres suivants influencent la forme d'onde de l'impulsion :

- a) la capacité effective  $C_t$ , et l'inductance de l'objet en essai,  $L_t$ ;  $C_t$  est constante pour une conception donnée et pour une forme d'onde donnée,  $L_t$  est également une constante pour une conception donnée. Cependant,  $L_t$  effective peut être influencée par le traitement du raccordement. Elle varie entre l'inductance de fuite,  $L_s$ , pour les bornes court-circuitées et  $L_o$  pour les bornes en circuit ouvert. Plus de détails à cet égard sont donnés en 7.1 et 7.3 et à l'annexe A ;
- b) la capacité du générateur  $C_g$  ;
- c) les composants de mise en forme de l'onde, internes et externes au générateur,  $R_{si}$ ,  $R_{se}$ ,  $R_p$ ,  $C_L$  (plus éventuellement, l'impédance d'un diviseur de tension  $Z_1$ ) ;
- d) l'inductance et la capacité parasite du générateur et le circuit d'essai complet ;
- e) éventuellement les équipements de hachage.

Le temps d'attaque  $T_1$  est déterminé principalement par la combinaison de la capacité effective en surtension de l'objet en essai, y compris  $C_L$ , et des résistances série internes et externes du générateur.

Le temps à demi-valeur  $T_2$  des impulsions de choc de foudre, est principalement déterminé par la capacité du générateur, l'inductance de l'objet en essai et la résistance de décharge du générateur ou de toute autre résistance parallèle. Cependant, il y a des cas où la résistance série aura également un effet significatif sur la queue d'onde, par exemple des enroulements d'inductance extrêmement faible. Pour les impulsions de choc de manœuvre, d'autres paramètres interviennent; ceux-ci sont traités à l'article 8.

Les équipements d'essai utilisés pour les applications d'impulsion de choc de foudre et de manœuvre sont fondamentalement identiques. Les différences portent uniquement sur des détails, comme les valeurs de résistances et de condensateurs (et les connexions bornes de l'objet en essai).

Pour satisfaire aux différentes prescriptions de forme d'onde pour les impulsions de choc de foudre et de manœuvre, une attention particulière doit être accordée au choix des paramètres du générateur d'impulsion, tels que capacité et résistances (parallèles) série et de décharge. Pour les impulsions de choc de manœuvre, de valeurs élevées des résistances série et/ou des condensateurs de charge peuvent être nécessaires, dont la conséquence sera une réduction significative de l'efficacité.

Alors que la tension de sortie du générateur d'impulsion est déterminée par les niveaux d'essai des enroulements en rapport avec leur plus haute tension  $U_m$  donnée par les équipements pour l'objet en essai, le volume de stockage d'énergie requis dépend essentiellement des impédances inhérentes à l'objet en essai.

Une brève explication des principes du contrôle de la forme d'onde est donnée en annexe A.

L'aménagement de l'installation d'essai, de l'objet en essai et des câbles d'interconnexion, des brides de mise à la terre et autres équipements, est limité par l'espace disponible dans la salle d'essai et, en particulier, par l'effet de proximité de toutes les structures. Pendant les essais d'impulsion, le potentiel ne peut pas être supposé nul partout dans les systèmes de mise à la terre du fait des valeurs élevées et des taux importants de variation des courants et des tensions d'impulsion et des impédances finies mises en jeu. Par conséquent, le choix d'une terre de référence appropriée est important.

Il convient que le chemin de retour du courant entre l'objet en essai et le générateur d'impulsion soit à basse impédance. Il est de bonne pratique de relier correctement ce chemin de retour du

courant au système général de mise à la terre de la salle d'essai, de préférence près de l'objet en essai. Il convient que ce point de connexion soit utilisé comme la terre de référence, et pour obtenir une bonne mise à la terre de l'objet en essai, il convient de le relier à la terre de référence par un ou plusieurs conducteurs à basse impédance (voir la CEI 60060-2).

Il convient que le circuit de mesure de tension, qui est une boucle séparée de l'objet en essai véhiculant uniquement le courant de mesure et non pas une partie importante du courant d'impulsion traversant les enroulements en essai, soit également relié efficacement à la même terre de référence.

Dans l'essai d'impulsion de choc de manœuvre, puisque les taux de variation des tensions et des courants d'impulsion sont réduits de manière importante par rapport à ceux d'un essai d'impulsion de choc de foudre et qu'aucun circuit de hachage n'est impliqué, les problèmes des gradients de potentiels autour du circuit d'essai et qui concernent la terre de référence sont moins critiques. Néanmoins, nous suggérons qu'à titre de précaution, les mêmes pratiques en matière de mise à la terre que celles utilisées pour l'essai d'impulsion de choc de foudre soient suivies.

## 6 Etalonnage

Cette norme n'est pas destinée à donner des recommandations pour les systèmes de mesure ou leur étalonnage mais, bien entendu, il convient que l'appareillage utilisé soit approuvé selon la CEI 60060. Avant un essai, une vérification globale du circuit d'essai et du système de mesure peut être exécutée à une tension plus faible que le niveau de tension réduite. Pour cette vérification, la tension peut être déterminée au moyen d'un éclateur à sphères ou par une mesure comparative avec un autre dispositif approuvé. Lors de l'utilisation d'un éclateur à sphères, il convient d'admettre que cela est seulement une vérification et ne remplace pas l'étalonnage du système de mesure approuvé, exécuté périodiquement. Après toute vérification, il est important que, ni le circuit de mesure, ni le circuit d'essai ne soit modifié, excepté pour le démontage d'un appareil pour vérification.

Des informations sur des types de diviseurs de tension, leurs applications, précision, étalonnage et vérification sont données dans la CEI 60060-2.

## 7 Essais d'impulsion de choc de foudre

### 7.1 Formes d'onde

Il est quelquefois impossible d'obtenir les valeurs de forme d'onde spécifiées. Lors de l'essai d'impulsion de choc sur de gros transformateurs de puissance et sur des bobines d'inductance de faible inductance d'enroulement et/ou de forte capacité en surtension, des tolérances plus larges peuvent devoir être acceptées.

La capacité en surtension du transformateur en essai étant constante, la résistance série peut devoir être réduite afin d'essayer d'obtenir le temps d'attaque correct  $T_1$  ou la vitesse de montée correcte, mais il convient que la réduction ne soit pas de nature à entraîner des oscillations sur la crête de l'onde de tension qui deviendraient excessives. Si on considère qu'il est souhaitable d'avoir un temps d'attaque court (de préférence dans les limites spécifiées), alors les oscillations et/ou les dépassements supérieurs à  $\pm 5$  % de la tension de crête, autorisés par la CEI 60060-1, peuvent devoir être acceptés. Dans un tel cas, un compromis entre l'importance des oscillations autorisées et le temps d'attaque qui peut être obtenu, est nécessaire. En général, il convient de viser des oscillations inférieures ou égales à  $\pm 10$  %, même avec des allongements du temps d'attaque, au besoin et comme convenu entre le constructeur et l'acheteur. La valeur de la tension d'essai est déterminée en accord avec les principes de la CEI 60060-1.

Pour de gros transformateurs de puissance et en particulier pour leurs enroulements intermédiaires et basse tension, le temps virtuel de demi-valeur  $T_2$  peut ne pas être réalisable dans la valeur fixée par la tolérance. L'inductance de tels enroulements peut être si faible que la forme d'onde résultante sera oscillatoire. Ce problème peut être résolu dans une certaine mesure par l'utilisation d'une forte capacité dans le générateur, par le fonctionnement d'étages en parallèle, par l'ajustement de la résistance série ou par des raccordements d'essai spécifiques des bornes des enroulements non en essai ou, en plus, des bornes non essayées des enroulements en essai.

La mise à la terre avec une impédance, plutôt que la mise à la terre directe, des bornes d'enroulement non essayées a comme conséquence une augmentation significative de l'inductance effective. Pour les bornes directement mises à la terre, seule l'inductance de fuite (déterminée par l'impédance de court-circuit) est impliquée. Pour les bornes mises à la terre avec une impédance, l'inductance principale devient prépondérante. Cela peut rendre l'inductance effective 100 à 200 fois plus grande qu'avec la mise à la terre directe.

Lorsque la mise à la terre avec une impédance d'une borne non essayée est utilisée, il est nécessaire de s'assurer que la tension par rapport à la terre apparaissant sur une borne non essayée n'excède pas :

- 75 % de la tension de tenue de foudre nominale de cette borne pour des enroulements connectés en étoile ;
- 50 % de la tension de tenue de foudre nominale de cette borne pour des enroulements connectés en triangle (en raison des tensions de polarité opposée par rapport à la terre sur les bornes du triangle, voir également 7.4).

Lorsque la forme d'onde est oscillatoire du fait de l'inductance extrêmement basse et/ou de la faible capacité du générateur d'impulsion, il convient que l'amplitude de la polarité opposée ne dépasse pas 50 % de la valeur maximale de la première amplitude. Avec cette limitation, des directives sont données à l'annexe A, pour choisir la capacité du générateur d'impulsion et ajuster les formes d'onde.

## **7.2 Impulsions hachées sur la traîne**

### **7.2.1 Temps de hachage**

Les différents temps de hachage  $T_c$  (comme défini par la CEI 60060-2), auront comme conséquence différentes contraintes (tension et durée) dans différentes parties du ou des enroulements, en fonction de la construction de ces derniers et de leur arrangement. Par conséquent, il n'est pas possible de fixer un temps de hachage, qui serait le plus contraignant, soit en général, soit pour un transformateur particulier ou une bobine d'inductance particulière. Le temps de hachage n'est donc pas considéré comme un paramètre d'essai, à condition qu'il soit dans les limites de 2  $\mu$ s et 6  $\mu$ s, selon les exigences de la CEI 60076-3.

Toutefois, les oscillogrammes ou les enregistrements numériques des ondes hachées, sont uniquement comparables pour des temps de hachage presque identiques.

### **7.2.2 Vitesse de chute et amplitude de polarité inverse de l'impulsion hachée**

Les événements caractéristiques pendant le hachage dépendent en grande partie de l'aménagement géométrique du circuit de hachage impliqué, de l'impédance du circuit de hachage et de l'objet en essai, qui déterminent tous, à la fois la vitesse de chute et l'amplitude de la crête de polarité opposée.

Dans la CEI 60076-3, la valeur de l'amplitude du dépassement à la polarité opposée a été limitée à 30 % de l'amplitude de l'impulsion hachée. Cela, en fait, représente des directives

pour l'aménagement du circuit de hachage et peut nécessiter l'introduction d'une impédance additionnelle  $Z_c$  dans ce circuit pour satisfaire la limite (voir la figure 1).

Cependant, il convient que la boucle de hachage soit aussi petite que possible pour obtenir la vitesse de chute la plus élevée, mais il convient aussi que l'amplitude du dépassement de polarité opposée soit limitée à une valeur inférieure ou égale à 30 %. Sur des enroulements multicouches, l'impédance de couche peut atténuer naturellement la chute dans la mesure où elle n'oscille pas autour de zéro (voir la figure B.20).

La recommandation de la CEI 60076-3, d'utiliser un éclateur de hachage de type à déclencheur, a pour avantage d'obtenir la cohérence du temps de hachage, facilitant de ce fait la comparaison des enregistrements oscillographiques ou numériques, non seulement avant, mais également après le hachage. La dernière partie sera comparable seulement pour des temps de hachage sensiblement identiques.

### **7.3 Raccordements aux bornes et méthodes applicables de détection de défaillances**

#### **7.3.1 Raccordements aux bornes**

Il est important que les raccordements aux bornes de l'objet en essai et les pratiques en matière de mise à la terre utilisés soient rattachés à la méthode de détection de défaillances adoptée.

Les raccordements pour l'essai de l'impulsion choc sont détaillés dans la CEI 60076-3 en ce qui concerne les transformateurs et dans la CEI 60289 en ce qui concerne les bobines d'inductance. Normalement les bornes non essayées de l'enroulement de la phase en essai sont mises à la terre et les enroulements de la phase non essayés sont court-circuités et mis à la terre. Cependant, afin d'améliorer la queue d'onde  $T_2$ , la mise à la terre par une résistance des enroulements non essayés peut être avantageuse (voir l'article 5 et 7.1) et, en plus, les bornes de ligne non essayées de l'enroulement à l'essai peuvent également être mises à la terre avec une résistance.

En plus des méthodes d'ajustement de la forme d'onde de 7.1, les facteurs suivants doivent être pris en compte :

- a) si une borne a été spécifiée pour être directement mise à la terre ou reliée à un câble à basse impédance, en service, alors il convient que cette borne soit directement mise à la terre pendant l'essai ou soit mise à la terre par une résistance avec une valeur ohmique n'excédant pas l'impédance caractéristique du câble ;
- b) la mise à la terre par un shunt à basse impédance pour des raisons de mesures de courants de réponse à l'impulsion de choc peut être considérée comme équivalente à la mise à la terre directe.

Lorsque des éléments non linéaires ou des dispositifs antisurtension – intégrés au transformateur ou externes – sont installés pour la limitation des transitoires de surtension transférées, il convient que la méthode d'essai d'impulsion de choc soit débattue à l'avance, pour chaque cas particulier. Se référer également à la CEI 60076-3.

#### **7.3.2 Méthodes applicables de détection de défaillances**

La détection des défaillances est normalement réalisée par l'examen des données oscillographiques ou brutes des enregistrements numériques de la tension d'essai et du courant de réponse d'impulsion.

Différentes transitoires peuvent être enregistrées et utilisées séparément ou en association, comme cela est représenté à la figure 2 et indiqué ci-dessous aux points a) à e). Il est important, dans l'essai de recette, d'enregistrer au moins une des transitoires énumérées, en plus de la tension d'essai appliquée :

- c) le courant de neutre (pour les enroulements connectés en étoile et en zigzag pour lesquels le neutre peut être mis à la terre pendant l'essai) ;
- d) le courant d'enroulement (pour tous les autres enroulements et les enroulements connectés en étoile et en zigzag, pour lesquels le neutre ne peut pas être mis à la terre pendant l'essai) ;
- e) le courant transféré à un enroulement adjacent court-circuité et non essayé, parfois désigné sous le nom de courant transféré par capacité ;
- f) le courant de cuve ;
- g) la tension transférée à un enroulement non essayé.

La somme des points a), c) et d) ou des points b), c) et d) ci-dessus, est parfois désignée sous le nom de courant de ligne.

Lors de l'essai des bobines d'inductance, les deux types shunt et série, les points c) et e) sont inapplicables; le point d) peut être appliqué mais uniquement comme un moyen supplémentaire d'enregistrement de transitoires, car il est probablement moins sensible que lorsqu'il est utilisé dans l'essai de transformateur.

#### 7.4 Méthodes d'essai

Les séquences d'essais appropriées pour les essais en pleine onde ou pour les essais en pleine onde et en onde hachée, sont données dans la CEI 60076-3.

La méthode d'essai préférée est celle de l'application directe bien que, dans des cas particuliers où l'enroulement intermédiaire ou basse tension ne peut pas, en service, être soumis aux surtensions de foudre à partir du système qui lui est connecté, la méthode de surtension transférée puisse être utilisée comme alternative. L'essai d'impulsion de choc de l'enroulement basse tension est alors effectué simultanément avec l'essai de l'enroulement haute tension associé. Dans ces conditions, la forme d'onde de la tension transférée n'est pas conforme à celle spécifiée dans la CEI 60076-3. Il est plus important d'essayer et d'obtenir le niveau de tension requis à l'aide des résistances d'extrémité de valeur suffisamment élevée. Cependant, cela peut quelquefois être impossible, même avec les valeurs de résistance les plus élevées. Dans cet essai, de fortes tensions interphases peuvent se produire sur les enroulements connectés en triangle et le risque de trop contraindre l'isolement interphase, interne ou externe, peut limiter la tension qui peut être appliquée à l'enroulement basse tension. Des limites appropriées peuvent être établies par l'analyse des transitoires avec un générateur de surtension récurrent de basse tension.

De par leur nature même, les dispositifs de protection non linéaires connectés entre les enroulements peuvent provoquer des différences entre les oscillogrammes des impulsions pleine onde et pleine onde réduite ou les enregistrements numériques. Pour prouver que ces différences sont bien provoquées par le fonctionnement de ces dispositifs, il convient de le démontrer en faisant deux essais ou plus, en impulsion pleine onde réduite, à différents niveaux de tension, pour mettre en évidence la tendance de leur fonctionnement. Pour montrer la réversibilité des effets non linéaires, il convient que les mêmes impulsions pleine onde réduite fassent suite à la tension d'essai pleine onde, d'une manière inversée.

Exemple : 60 %, 80 %, 100 %, 80 %, 60 %.

Les méthodes d'essai pour les neutres de transformateur sont données par la CEI 60076-3. Quand la méthode indirecte est utilisée, c'est-à-dire par une impulsion transmise au neutre à partir d'une ou plusieurs bornes de ligne, la forme d'onde ne peut pas être spécifiée puisqu'elle est fondamentalement contrôlée par les paramètres du transformateur. La méthode directe, supposant une tension d'impulsion appliquée au neutre avec toutes les bornes de ligne mises à la terre, permet une plus longue durée du front d'onde, jusqu'à 13  $\mu$ s. Dans ce cas, la charge inductive du générateur est sensiblement augmentée et il peut être

difficile de réaliser les temps à demi-valeur édictés par les tolérances. La mise à la terre par une impédance des bornes non essayées de l'enroulement à l'essai peut alors être appliquée.

## **7.5 Enregistrement des essais**

### **7.5.1 Généralités**

Des systèmes d'enregistrement analogiques ou numériques peuvent être utilisés pour l'enregistrement de la tension d'impulsion de choc de foudre et des formes d'onde de réponse en courant.

### **7.5.2 Systèmes d'enregistrement analogiques et numériques**

Les prescriptions pour les oscilloscopes analogiques et les enregistreurs numériques sont données dans la CEI 61083-1.

L'enregistrement numérique offre des possibilités d'interprétation mathématique des résultats et permet d'utiliser des traitements mathématiques supplémentaires, par exemple pour l'analyse de panne dans des enregistrements. Ces techniques sont prometteuses mais l'interprétation des résultats n'est pas encore établie, ni débarrassée de toute les ambiguës.

Il convient de souligner que, dans un but de présentation des résultats pour la recette, par comparaison des tracés, il est recommandé que les formes d'onde obtenues par des mesures numériques soient produites à partir des données brutes et ne soient pas soumises à un traitement mathématique, un filtrage, un lissage, etc.

Il est également important d'utiliser les données brutes pour l'évaluation des formes d'onde non normalisées.

(Les figures B.18, B.19 et B.21 montrent des différences significatives d'amplitudes et les évaluations du temps d'attaque  $T_1$  et du temps à demi-valeur  $T_2$ .)

Lorsque les enregistreurs numériques sont utilisés comme simples instruments de mesure d'enregistrement des formes d'onde de tension et de courant, sans traitement mathématique des données enregistrées (voir l'article 10), ils doivent être considérés comme des instruments analogiques perfectionnés.

La CEI 60076-3 prescrit simultanément la mesure de

- h) la tension appliquée ;
- i) au moins une des transitoires indiquées en 7.3.2 ;

par conséquent, au moins deux canaux d'enregistrement indépendants sont nécessaires.

Alors que la tension appliquée est définie de manière unique, le choix de l'autre caractéristique à enregistrer dépend du choix de la méthode de détection de défaillances.

### **7.5.3 Enregistrement analogique des formes d'onde**

Pour faciliter l'évaluation des résultats d'essai, qui sont principalement basés sur la comparaison d'enregistrements à des niveaux réduits et maximaux, il est intéressant de prévoir des enregistrements d'amplitude égale par l'utilisation d'atténuateurs appropriés sur les oscilloscopes.

### 7.5.3.1 Enregistrement analogique de la forme d'onde de la tension d'impulsion de choc

j) Détermination de la forme d'onde de la tension d'impulsion de choc

Le temps de balayage préférentiel pour les enregistrements faits pour déterminer la forme d'onde pendant le réglage préliminaire des paramètres du circuit d'essai est  $\leq 10 \mu s$  pour l'enregistrement du front d'onde (des temps de balayage plus longs peuvent être nécessaires lors de l'essai des neutres du transformateur). Il convient que l'enregistrement d'une queue d'onde permette l'évaluation du temps à demi-valeur et occasionnellement l'amplitude de polarité inverse.

k) Enregistrement de l'onde de tension de l'essai de choc appliqué

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, il convient que le temps de balayage ne soit pas inférieur à  $100 \mu s$  ;
- pour les ondes hachées, un temps de balayage de  $10 \mu s$  à  $25 \mu s$  est habituellement considéré comme suffisant.

Pour le rapport d'essais (voir l'article 11) un enregistrement convenable est normalement suffisant pour l'essai de recette; toutefois, pour l'essai de diagnostic plusieurs enregistrements avec différents temps de balayage peuvent être requis.

### 7.5.3.2 Enregistrement analogique du courant de réponse à l'impulsion

Le courant d'impulsion est normalement le paramètre le plus sensible dans la détection de défaillances. Par conséquent, les ondes de courant enregistrées sont les critères principaux du résultat d'essai.

En fonction de la forme du tracé de courant et de l'utilisation de balayages linéaires ou exponentiels, il peut être nécessaire d'utiliser plusieurs enregistrements avec différents temps de balayage. Il convient que la résolution obtenue garantisse que

- l) une représentation aussi claire que possible des oscillogrammes soit obtenue, y compris les composantes aux plus hautes fréquences proches du front de l'onde ;
- m) l'enregistrement de courant soit de durée suffisante pour permettre la détection de toutes les anomalies se produisant à retardement. Il est difficile de fixer des règles à privilégier pour les vitesses de balayage et pour ce qui est appelé à retardement, car la réponse de chaque transformateur est différente et la vitesse est, dans une certaine mesure, dépendante du type d'enroulement utilisé. Lors de l'enregistrement du courant de neutre ou de l'enroulement, il convient de poursuivre l'enregistrement au moins jusqu'à ce que la crête inductive ait été atteinte, permettant de ce fait, l'examen de l'onde pour déterminer s'il y a eu un changement de l'inductance provoquée par le court-circuit de spires résultant d'un défaut d'isolement.

### 7.5.4 Enregistrement numérique des formes d'onde

Le principe de l'enregistrement numérique est la mesure des formes d'onde de tension ou de courant en prenant des échantillons pendant l'essai à des intervalles de temps réguliers. Il convient que ces échantillons soient présentés directement en tant que données brutes pour l'évaluation des paramètres de forme d'onde (voir 7.5.3.1) et également pour l'évaluation des résultats d'essai basés sur la comparaison d'enregistrements à des niveaux réduits et maximaux (voir 7.5.3.2). En plus, les données enregistrées peuvent également être traitées par des algorithmes analysant l'onde, par exemple, pour l'analyse de défaillance dans les enregistrements (voir l'article 10).



Pendant les essais d'impulsion de choc, des champs électromagnétiques élevés sont produits à proximité de l'installation d'essai. La protection contre ces champs des dispositifs électroniques sensibles du système d'enregistrement numérique, de l'ensemble de l'équipement de traitement et de son alimentation en énergie est requise.

Il convient que les écrans du numériseur aient une résolution à  $\geq 768 \times 1\,024$  pixels et que les imprimantes aient  $\geq 300$  points par pouce.

#### **7.5.4.1 Enregistrement numérique de la forme d'onde de la tension d'impulsion de choc**

##### **n) Détermination de la forme d'onde de la tension d'impulsion de choc**

La période préférentielle de présentation des données pour les enregistrements faits pour déterminer la forme d'onde pendant le réglage préliminaire des paramètres du circuit d'essai est  $\leq 10\ \mu\text{s}$  pour l'enregistrement du front d'onde (des temps de présentation plus longs peuvent être nécessaires lors de l'essai des neutres du transformateur). Il convient que l'enregistrement d'une queue d'onde permette l'évaluation du temps à demi-valeur et occasionnellement l'amplitude de polarité inverse.

La CEI 61083-1 spécifie un numériseur de résolution minimale de 9 bits, 60 MHz pour l'enregistrement des formes d'onde d'impulsion de tension et de courant. En zoomant sur des périodes de temps de  $10\ \mu\text{s}$  ou moins pour évaluer le front d'onde ou les impulsions hachées, il convient d'envisager d'utiliser un numériseur 10 bits et de fréquence d'échantillonnage 100 MHz.

Historiquement, l'évaluation de la forme d'onde est basée sur les enregistrements oscilloscopiques, les règles de conception et l'évaluation visuelle des paramètres de forme d'onde. Avec l'utilisation des enregistreurs numériques pour les essais à haute tension des transformateurs de puissance, il convient qu'un avertissement relatif à l'amplitude et aux paramètres de temps soit donné, en ce qui concerne l'évaluation des formes d'onde non normalisées. En particulier, en essayant des enroulements basse tension de forte puissance nominale, avec comme résultat, des surtensions unipolaires à des fréquences inférieures à 0,5 MHz, la CEI 61083-2 existante n'est pas applicable pour l'évaluation de l'amplitude d'une telle forme d'onde non normalisée. Des erreurs supérieures à 10 % ont été observées du fait des algorithmes de lissage de courbe intégrés dans les numériseurs (voir les figures B.18, B.19 et B.21).

Dans ces cas une évaluation soignée des données brutes des graphiques est requise en usant de discernement technique. Une mesure parallèle de la tension de crête, par un voltmètre de crête suivant la CEI 61083-1, est fortement recommandée.

##### **o) Enregistrement de l'onde de tension de l'essai de choc appliqué**

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, il convient que la période de présentation des données échantillonnées ne soit pas inférieure à  $100\ \mu\text{s}$  ;
- pour les ondes hachées, une période de présentation de  $10\ \mu\text{s}$  à  $25\ \mu\text{s}$  est habituellement considérée comme suffisante.

Les fréquences d'échantillonnage de 10 MHz à 20 MHz par canal du numériseur suffisent normalement, parce que les fréquences maximales de résonance de la partie de l'enroulement n'excèdent habituellement pas 1 MHz à 2 MHz. Si l'on observe de hautes fréquences dans les tracés de tension ou de courant, elles sont dues à la résonance parasite du circuit de mesure ou à du bruit dans le système de mise à la terre. Il est donc recommandé d'utiliser des fréquences d'échantillonnage plus élevées, comme mentionné auparavant, pour distinguer le bruit dans le circuit de mesure du comportement réel de l'objet en essai.

Pour l'analyse d'onde, il est important de prendre des échantillons sur la forme d'onde complète jusqu'à l'amortissement total de l'onde, en utilisant la mémoire maximale disponible du

numériseur. Il est important de programmer le numériseur de telle manière que suffisamment d'échantillons soient présents pour déterminer le point de départ virtuel de l'onde.

Il est en outre important d'utiliser la résolution maximale disponible des amplificateurs d'entrée du numériseur. Pour cette raison, un certain nombre de «pré-tirs" à 50 % peuvent être nécessaires pour déterminer la plage optimale de l'amplitude de l'onde de tension et/ou le décalage de chaque canal.

Il convient qu'une attention particulière soit portée à la valeur de l'amplitude de crête de polarité opposée des impulsions de choc de foudre. Lors de la mesure cette amplitude de crête, un écrêtage de la forme d'onde enregistrée peut se produire par la saturation de l'amplificateur d'entrée du numériseur dans la plage sélectionnée.

Un enregistrement correct est normalement suffisant pour l'essai de recette (voir l'article 11). Cependant dans un but de diagnostic, le logiciel du système offre la possibilité d'examiner l'onde sur le temps total d'échantillonnage ou une partie de l'onde, car toutes les informations sont stockées dans la mémoire de l'ordinateur. Le logiciel peut soustraire la pleine onde et l'onde réduite et mettre en évidence les différences, avec un agrandissement réglable. Cependant, des problèmes pourraient surgir pour la partie en montée rapide de la forme d'onde, où le réglage de temps correct des deux courbes peut être difficile réalisé.

#### **7.5.4.2 Enregistrement numérique du courant de réponse à l'impulsion**

Le courant d'impulsion est normalement le paramètre le plus sensible dans la détection de défaillances. Par conséquent, les ondes de courant enregistrées sont les critères principaux du résultat d'essai. La présentation des enregistrements pour l'essai de recette est la même que pour la présentation des oscillogrammes en 7.5.2.2.

Cependant, les données stockées dans la mémoire du numériseur permettent d'autres présentations du même enregistrement, en zoomant en avant ou en arrière, à différentes échelles de temps. Les prescriptions concernant les fréquences d'échantillonnage et la résolution des canaux d'entrée du numériseur sont identiques à celles données en 7.5.3.1.

Afin de tirer tout le bénéfice des outils mathématiques d'investigation additionnels pour l'examen des résultats d'essai, comme l'analyse de la fonction de transfert (voir l'article 10), il est important d'utiliser le même temps d'enregistrement pour l'enregistrement de l'impulsion de courant et de tension.

## **8 Essais d'impulsion de choc de manœuvre**

### **8.1 Prescriptions particulières**

La réponse des transformateurs et des bobines d'inductance aux impulsions de choc de manœuvre est très différente parce que les transformateurs ont un circuit magnétique fermé et la durée relativement longue de l'impulsion de choc de manœuvre permet donc l'établissement d'un flux de noyau important, (voir la CEI 60076-3). Ce n'est pas le cas pour les bobines d'inductance pour lesquelles, en plus, les problèmes de forme d'onde et les méthodes d'essai sont différents. Par conséquent, les deux composants sont traités séparément.

### **8.2 Transformateurs**

#### **8.2.1 Formes d'onde**

Comme indiqué dans la CEI 60076-3, il n'y a aucune valeur stricte spécifiée pour le temps d'attaque virtuel d'une onde d'impulsion de choc de manœuvre. Toutefois, il convient qu'il soit suffisamment long pour assurer une distribution essentiellement uniforme de la tension. Cela nécessite ordinairement des temps d'attaque  $\geq 100 \mu s$ . Il est déterminé par la capacité effective de l'enroulement, les capacités de charge et les résistances série.

La queue d'onde est influencée, non seulement par les composantes habituelles de mise en forme de l'onde, mais également par une saturation probable du noyau. Pour la plupart des transformateurs, au niveau d'essai maximal, la décroissance exponentielle de la queue d'onde est interrompue par une chute soudaine à zéro, en un temps variable après la crête, du fait de la saturation du noyau. Par conséquent, le temps virtuel à demi-valeur n'est pas utilisé pour spécifier la queue d'onde de l'impulsion de choc de manœuvre appliquée. Au lieu de cela, la forme d'onde est définie par son temps supérieur à 90 % de  $T_d$  et par la prescription du temps au premier passage à zéro  $T_z$ .  $T_d \geq 200 \mu s$  et  $T_z \geq 500 \mu s$ , mais de préférence  $1\,000 \mu s$ , sont définis par la CEI 60076-3. Ces quantités sont illustrées à la figure 3a.

Le temps mis pour saturer le noyau dépend de la taille du noyau, de son état initial de magnétisation, du niveau et de la forme d'onde de la tension appliquée. Sauf si l'état de magnétisation du noyau est identique avant chaque application de l'impulsion de choc de manœuvre à un niveau de tension donné, pour des applications successives, il ne sera pas obtenu de formes d'onde identiques. De plus, des formes d'onde identiques ne peuvent pas être obtenues aux niveaux d'essai réduits et maximaux. Voir en 8.2.3 la méthode d'essai qui réduit les effets de la saturation du noyau.

La saturation du noyau ne se produit pas habituellement pour des applications de tension à niveau réduit et peut même ne pas se produire pour des applications au niveau maximal. Quand elle se produit, son effet sur la forme d'onde de tension peut être important ou faible selon la grandeur de la saturation impliquée. Pour cette raison, lorsque les impulsions de choc de manœuvre sont appliquées à partir du côté haute tension du transformateur, il est possible d'établir  $T_1$  et  $T_d$  à partir d'applications de tension réduite.  $T_z$  ne peut pas être établi tant que la première application de niveau de tension maximal n'est pas faite. Lorsque les impulsions de choc de manœuvre sont exécutées à partir du côté basse tension du transformateur, seul  $T_1$  peut être établi à partir d'applications de tension réduite. Dans ce cas,  $T_d$  et  $T_z$  peuvent uniquement être déterminés à partir de tirs au niveau d'essai maximal.

Il convient de noter qu'il peut y avoir des différences significatives dans la forme de la queue d'onde sur les différentes colonnes d'un transformateur, dues aux différentes réluctances du circuit magnétique en jeu.

## **8.2.2 Raccordements aux bornes et méthodes applicables de détection de défaillances**

### **8.2.2.1 Raccordements aux bornes**

Afin d'être conforme aux prescriptions de la CEI 60076-3, seule une connexion d'essai est admissible pour les transformateurs triphasés. Cette connexion est illustrée à la figure 4, qui indique qu'il convient que le neutre soit toujours mis à la terre et que les bornes des phases non essayées soient de préférence reliées ensemble. (Cette interconnexion des bornes non essayées n'est pas nécessaire pour les transformateurs équipés d'enroulements connectés en triangle).

Ce circuit a été choisi pour les transformateurs triphasés avec des noyaux à 3 et à 5 colonnes pour réaliser simultanément l'essai d'isolement phase – terre et entre phases avec 1,0 p.u. (par unité) et 1,5 p.u. respectivement.

Le choix de l'enroulement sur lequel la tension d'essai doit être directement appliquée et le niveau de cette tension d'essai peut généralement être laissé au constructeur; il doit correspondre à la prescription que le niveau nominal de tenue de l'impulsion de choc de manœuvre est atteint dans l'enroulement avec la tension nominale la plus élevée.

Court-circuiter les enroulements qui ne sont pas en essai n'est pas réalisable, car l'effet d'un tel court-circuit pendant l'essai de l'impulsion de choc de manœuvre est fondamentalement le même que pour un essai de tension induite.

Pendant que l'onde primaire de l'impulsion de choc de manœuvre est transférée par induction, le couplage capacitif entre phases, les capacités et les inductances propres aux phases peuvent provoquer des oscillations supplémentaires qui sont superposées aux tensions transférées. La figure B.14, donne un exemple évident de cet effet. Par conséquent, la prescription de la CEI 60076-3 qui stipule qu'une tension de  $1,5 U$  entre phases apparaîtra quand une tension  $U$  est appliquée à une borne, n'est valide qu'en principe. Donc, pendant un essai, les tensions entre phases sont susceptibles d'être supérieures à  $1,5 U$  si aucune mesure n'est prise sur les bornes non essayées pour supprimer les tensions oscillatoires au moyen de mise à la terre avec une impédance ohmique élevée. Les tensions phase – terre sur les bornes non essayées peuvent être bien supérieures à  $0,5 U$ .

La charge ohmique élevée des bornes des phases qui ne sont pas essayées de l'ensemble des enroulements en essai et/ou sur les bornes des phases des enroulements qui ne sont pas essayés est un moyen commode de réaliser l'amortissement approprié. Cependant, l'application d'une charge résistive provoque un allongement significatif du front d'onde sur les bornes non essayées, ayant pour résultat une tension entre phases inférieure à  $1,5 U$ . Cela résulte des temps légèrement différents auxquels apparaissent la tension maximale appliquée ( $U$ ) et la tension induite ( $0,5 U$ ). Quand l'application d'une charge est trop sévère (une résistance trop faible), le temps de traîne de l'impulsion de choc de manœuvre appliquée est sensiblement raccourci dans la mesure où les effets de saturation peuvent ne pas avoir lieu.

La prescription, stipulant qu'une tension de 1,5 fois la tension entre phase et neutre doit être développée entre les phases, ne peut pas être satisfaite sur les transformateurs cuirassés et les transformateurs à noyau à cinq colonnes sans enroulements connectés en triangle, car le flux ne peut pas être dirigé par les enroulements sur les colonnes non essayées. Si aucun enroulement en triangle n'est disponible, seuls les essais phase – terre de 1,0 p.u. peuvent être réalisés en court-circuitant et en mettant à la terre les bornes des enroulements des phases non essayées.

Des considérations semblables concernant les oscillations superposées sont également valides pour les autotransformateurs monophasés.

#### 8.2.2.2 Méthodes de détection de défaillances

Pour la détection de défaillances, généralement seule la mesure de la tension appliquée est suffisante, mais quand l'essai est réalisé en appliquant l'impulsion à une borne intermédiaire ou basse tension, il convient que la tension soit mesurée sur la borne avec la plus forte tension pour l'équipement  $U_m$ . Le courant s'écoulant à la terre par l'enroulement essayé peut être utilisé en plus.

#### 8.2.3 Méthode d'essai

La méthode d'essai est décrite dans la CEI 60076-3. Cette procédure comprend la référence aux mesures qui peuvent être prises pour augmenter la durée de l'impulsion en retardant le début possible de la saturation du noyau.

Pour la méthode de l'application directe à l'enroulement haute tension, objet principal de ce guide, la procédure implique l'application, à chaque borne de phase, de

- une impulsion de niveau d'essai réduit, de polarité négative (entre 50 % et 75 % du niveau de tenue à l'impulsion de choc de manœuvre) ;
- l'introduction d'une rémanence de polarité opposée, soit au moyen d'impulsions de polarité positive d'approximativement 50 % d'amplitude, soit par l'application de courant continu ;
- trois impulsions de polarité négative au niveau de tenue de l'impulsion de choc de manœuvre avec l'introduction d'une rémanence de polarité opposée avant chaque impulsion.

La méthode à privilégier pour introduire la rémanence est l'application d'impulsions de polarité opposée (c'est-à-dire positive) d'approximativement 50 % du niveau de l'essai. Pour réaliser des oscillogrammes sensiblement identiques ou des enregistrements numériques à n'importe quel niveau d'essai, il est recommandé d'établir toujours le même point de rémanence, de préférence le point de rémanence de saturation. Ce point est atteint quand le temps au passage au premier zéro reste constant lors d'applications consécutives de l'impulsion. Le nombre d'impulsions de prémagnétisation nécessaire et leur niveau dépend du niveau de la tension d'essai envisagé. Pour éviter tout problème de claquages externes pendant cette procédure, il convient que le niveau de ces impulsions de prémagnétisation de polarité positive ne dépasse pas 50 % à 60 % de la tension d'essai.

## **8.2.4 Enregistrement des essais**

### **8.2.4.1 Généralités**

L'enregistrement de la tension à la borne haute tension est requis pendant l'essai de choc de manœuvre. Toutefois, en raison des tensions excessives possibles par rapport à la terre sur les bornes non essayées ou entre les phases, comme expliqué en 8.2.2, il est conseillé de vérifier au moins ces tensions.

L'enregistrement de tension indiquera aussi généralement, d'une manière satisfaisante, tout défaut sur des enroulements couplés magnétiquement et non directement soumis à l'impulsion de choc de manœuvre. Les courants de l'impulsion peuvent être enregistrés et donneront, dans la plupart des cas, des informations supplémentaires sur un défaut.

Pour l'enregistrement de tension d'impulsion de choc de manœuvre, il est préférable d'utiliser des diviseurs de tension de type capacitif, car les diviseurs de tension résistifs auraient une influence sur la forme d'onde et peuvent être surchargés thermiquement. Lorsque des diviseurs de tension résistifs sont utilisés pour vérifier la tension des bornes non essayées, il convient de les laisser dans le circuit parce qu'ils représentent une charge significative de ce dernier. Des prises sur des bagues capacitatives correctement calibrées peuvent être utilisées comme diviseurs de tension.

### **8.2.4.2 Enregistrement analogique de la forme d'onde de la tension d'impulsion de choc**

#### **p) Détermination de la forme d'onde de la tension d'impulsion de choc**

Pour l'enregistrement du front d'onde pris pour la détermination de forme d'onde pendant l'ajustement préliminaire des paramètres du circuit d'essai, un balayage englobant la crête de l'onde est nécessaire et il s'étend généralement sur 100  $\mu\text{s}$  à 300  $\mu\text{s}$ . Pour l'enregistrement de la queue d'onde, qui est utilisé pour déterminer uniquement le temps supérieur à 90 % de  $T_d$ , un temps de balayage de 500  $\mu\text{s}$  à 1 000  $\mu\text{s}$  est recommandé.

#### **q) Enregistrement de l'onde de tension de l'essai de choc appliqué**

Afin de déterminer l'amplitude de l'onde d'essai et permettre la détection de tout défaut qui peut être présent, le temps de balayage doit être assez long pour englober le premier passage par zéro. Ce temps est plus long que le temps attendu  $T_z$ , et il est normalement de 1 000  $\mu\text{s}$  à 2 000  $\mu\text{s}$ . Dans des cas exceptionnels, des temps de balayage encore plus longs peuvent être nécessaires, par exemple 2 000  $\mu\text{s}$  à 3 000  $\mu\text{s}$ .

### 8.2.4.3 Enregistrement numérique de la forme d'onde de la tension d'impulsion de choc

#### r) Détermination de la forme d'onde de la tension d'impulsion de choc.

Il est nécessaire de prendre des échantillons sur la forme d'onde complète, depuis le début jusqu'au moment où l'onde est complètement amortie, en utilisant la mémoire disponible maximale du numériseur. Il est important de programmer le numériseur de telle manière que suffisamment d'échantillons soient présents pour déterminer le point de départ virtuel de l'onde. Pour enregistrer l'impulsion de choc de manœuvre, une fréquence d'échantillonnage de 10 MHz est suffisante. Les prescriptions pour le numériseur, comme mentionnées en 7.5.3 pour l'enregistrement numérique des tensions de choc de foudre, sont suffisantes pour l'enregistrement des impulsions de choc de manœuvre.

Il est important d'utiliser la résolution maximale disponible des amplificateurs d'entrée du numériseur. Un certain nombre d'impulsions de niveau réduit de 50 % sont nécessaires pour déterminer la plage optimale de la tension et/ou du décalage pour chaque canal.

Il convient de porter une attention particulière à l'effet de la saturation magnétique du noyau et la possibilité d'écrtage des enregistrements de tension et de courant en raison de la saturation des amplificateurs d'entrée du numériseur.

#### s) Enregistrement de l'onde de tension de l'essai de choc appliqué.

Afin de déterminer l'amplitude de l'onde d'essai et permettre la détection de tout défaut qui peut être présent, l'enregistrement doit être assez long pour englober le premier passage par zéro, qui est plus long que le temps attendu  $T_z$ . Cela nécessite généralement des temps d'enregistrement de 1 000  $\mu$ s à 2 000  $\mu$ s ou de 2 000  $\mu$ s à 3 000  $\mu$ s dans les cas exceptionnels.

### 8.2.4.4 Enregistrement analogique et numérique du courant de réponse à l'impulsion

Comme indiqué en 8.2.2, le courant d'impulsion peut être enregistré pour retrouver d'éventuelles décharges partielles. Quand ce courant est mesuré sur l'enroulement auquel la tension d'impulsion est directement appliquée, que ce soit ou non l'enroulement sur lequel le niveau de tension d'essai spécifié est à appliquer, il comprend trois parties:

- une impulsion de courant capacitive initiale;
- une faible valeur de la composante inductive du courant et allant graduellement en augmentant, qui coïncide avec la traîne de la tension appliquée;
- une crête de courant concomitante avec toute saturation. Cette crête de courant coïncidera avec une chute ou une décroissance de la tension si elle est due à l'effet de la saturation.

Tout défaut de spire à spire ou d'une partie de l'enroulement produira également une crête de courant instantané, mais avec une chute beaucoup plus rapide de tension, indiquant un blocage du flux.

Lorsque les oscillogrammes ou les enregistrements numériques du courant de réponse d'impulsion sont réalisés, il est préférable d'utiliser le même temps de balayage ou d'échantillonnage que celui utilisé pour l'enregistrement de tension.

### 8.3 Bobines d'inductance

#### 8.3.1 Formes d'onde

La forme d'onde que l'on peut obtenir sur les bobines d'inductance sera d'une forme en cosinus amorti, sans aucun effet de saturation sur la traîne, puisqu'il n'y a aucun circuit ferromagnétique fermé dans les enroulements. Il convient que cette forme d'onde soit caractérisée principalement par sa fréquence, déterminée par l'inductance de la bobine d'inductance, la capacité du générateur et le coefficient d'amortissement. Toutefois, dans la pratique il a été spécifié des formes d'onde de bobine d'inductance comme pour les transformateurs, c'est-à-dire avec  $T_1$ ,  $T_d$  et  $T_z$  (voir les figures 3b et B.16).

Le temps d'attaque virtuel est principalement déterminé, comme pour les transformateurs, par la capacité effective d'enroulement, la capacité de charge additionnelle et la résistance série. Il convient qu'il soit assez long pour garantir une distribution approximativement uniforme dans tout l'enroulement essayé. Pour de grandes valeurs de  $T_1$ , le coefficient d'amortissement sera grand, entraînant ainsi un temps  $T_z$  relativement court. Pour de petites valeurs de  $T_1$ ,  $T_d$  deviendra court et la crête de polarité opposée peut très bien approcher les 75 % du niveau de la tension d'essai avec un risque consécutif de claquages entre phase et terre ou entre phases. En raison de ces implications, il semble logique, comme dans le cas des transformateurs, de limiter la crête de polarité opposée maximale à un niveau de sécurité, inférieur à 50 %, et accepter les valeurs correspondantes de  $T_1$ ,  $T_d$  et  $T_z$ .

Généralement la caractéristique du transformateur de  $T_d \geq 200 \mu s$  n'est pas un problème pour les petites bobines d'inductance (<100 Mvar pour les bobines d'inductance triphasées avec des impédances relativement élevées). Pour de grandes bobines d'inductance,  $T_d$  et  $T_z$  comme spécifiés pour les transformateurs exigeraient une augmentation excessive des capacités du générateur d'impulsion. Pour de tels cas, il convient que les valeurs minimales pour  $T_d$  et  $T_z$  soient respectivement de 120  $\mu s$  et 500  $\mu s$ , pour assurer une contrainte tension – temps appropriée.

#### 8.3.2 Raccordements aux bornes et méthodes de détection de défaillances applicables

##### 8.3.2.1 Raccordements aux bornes

Puisqu'il n'y a qu'un enroulement par phase, le point d'application de la tension d'essai est la borne de ligne de l'enroulement de la phase qui doit être essayée. Il convient de mettre à la terre l'autre borne de l'enroulement de cette phase.

Pour les bobines d'inductance triphasées, la prescription stipulant qu'une tension de 1,5 fois la tension entre phase et neutre doit être développée entre les phases, comme indiqué à la figure 4, ne peut pas être satisfaite. Le flux dans ces bobines d'inductance ne peut pas être dirigé par les enroulements sur les colonnes non essayées. Par conséquent, les méthodes normales d'essai d'impulsion sont requises, comme pour les essais d'impulsion de choc de foudre.

##### 8.3.2.2 Méthodes de détection de défaillances

Pour la détection des défaillances, comme pour les transformateurs, seule la mesure de la tension appliquée est généralement suffisante, mais il convient d'utiliser en plus le courant s'écoulant à la terre par l'enroulement essayé.

#### 8.3.3 Méthodes d'essai

Puisqu'il n'y a aucun effet de saturation de noyau, les méthodes d'essai pour des bobines d'inductance sont les mêmes que pour les essais d'impulsion de choc de foudre. Elles comprennent :

- la détermination de la forme d'onde de la tension d'impulsion de choc ;
- l'application d'une impulsion de niveau d'essai réduit de polarité négative ;
- l'application de trois impulsions de polarité négatives au niveau de tenue de l'impulsion de choc de manœuvre, sans aucune mesure de prémagnétisation.

#### **8.3.4 Enregistrement analogique et numérique de la forme d'onde de la tension et du courant de réponse à l'impulsion de choc**

Les mêmes principes généraux que ceux des transformateurs s'appliquent aux enregistrements de la tension et du courant des bobines d'inductance sous réserve des différences de forme d'onde décrites en 8.3.1. Toutefois, il est conseillé d'utiliser les temps de balayage, pour la tension et le courant, qui couvrent la deuxième moitié du cycle de la tension appliquée.

Pour les enregistrements de courant, il peut être avantageux d'utiliser, en plus, un temps de balayage plus court afin de pouvoir surveiller plus en détail le courant capacitif initial. La forme d'onde de base du courant correspondant à l'onde de tension en cosinus est sinusoïdale (voir les figures 3b et B.16).

### **9 Interprétation des oscillogrammes ou des enregistrements numériques**

La méthode de base utilisée pour l'évaluation des résultats d'un essai consiste à comparer les formes d'ondes d'essai obtenues au cours d'une séquence d'essai particulière. Généralement, il convient que les tracés enregistrés sur le même canal, dans les mêmes conditions d'essai et en utilisant les mêmes constantes de circuit d'essai, soient identiques sauf dans le cas de dispositifs non linéaires. Il est recommandé que les différents niveaux de tension d'essai soient compensés par des atténuations appropriées pour obtenir le même niveau d'enregistrement.

L'annexe B contient un certain nombre d'oscillogrammes et d'enregistrements numériques pris pendant les essais réels sur des transformateurs et bobines d'inductance, montrant quelles sont les conditions de défaut et de non-défaut. Cependant, il est manifeste que des divergences de forme d'onde similaires sur une autre unité peuvent ne pas être nécessairement considérées comme résultantes de la même cause que les défauts qui se présenteront différemment d'une conception à une autre.

#### **9.1 Impulsion de choc de foudre**

##### **9.1.1 Généralités**

L'interprétation des oscillogrammes ou des enregistrements numériques est fondée sur la comparaison des formes d'onde des enregistrements de tension et de courant entre les tensions d'essai réduites et nominales ou entre des enregistrements successifs à la tension d'essai nominale. C'est une tâche qui demande de la compétence et il est souvent difficile de trancher quant à la signification des divergences, même avec une expérience considérable, en raison du grand nombre de sources de perturbation possibles. Les divergences de toutes sortes sont concernées et il convient qu'elles soient étudiées.

Pour la recherche de ces divergences, il est recommandé de vérifier d'abord que le circuit d'essai, le circuit de mesure et les procédés de mise à la terre ne sont pas la cause des perturbations. Si les perturbations proviennent du circuit d'essai, il convient de faire tous les efforts pour les éliminer ou au moins pour réduire leur effet au minimum. Il convient de se souvenir que dans les générateurs à plusieurs étages, les différences dans les temps de démarrage des différents étages, peuvent donner lieu à des changements infimes de l'amplitude des enregistrements de courant avec des oscillations initiales à haute fréquence (sans changer la fréquence de base). Voir la figure B.13. Toutefois, dans la majorité des cas,



ces changements sont limités à une période de temps correspondant à 50 % du front d'onde de l'impulsion appliquée.

Il y a parfois aussi des divergences après la crête, qui peuvent également provenir du générateur avec fonctionnement en multi-étages parallèles, si les circuits de décharge ne coïncident pas dans le temps. Cela peut nécessiter un nouveau réglage des éclateurs à décharge sur les générateurs qui ont des éclateurs série et parallèles.

Deuxièmement, il convient de vérifier que la mise à la terre du noyau ou des éléments non linéaires de l'objet en essai n'est pas la source des perturbations. Les résistances sans éclateur et non linéaires peuvent produire une évolution logique et progressive ou une modification avec une augmentation des niveaux de tension, voir figure B.12.

Ayant éliminé ou expliqué les sources des divergences ci-dessus, les variations dans les enregistrements de forme d'onde de tension ou de courant entre la tension d'essai réduite et nominale ou entre des enregistrements successifs à la tension d'essai nominale dont on ne peut pas prouver que l'origine provient du circuit d'essai ou des résistances non linéaires dans l'objet en essai, sont des preuves de défaut d'isolement lors de l'essai.

### **9.1.2 Enregistrements de tension – Essais pleine onde**

Les oscillogrammes ou les enregistrements numériques de la tension appliquée sont des moyens relativement mal adaptés à la détection des défaillances. Ainsi, les divergences détectables indiquent les principaux défauts de l'isolement ou du circuit d'essai.

Une analyse plus détaillée des divergences est possible, à condition que la résolution de temps soit suffisamment élevée.

- Les défaillances directes à la terre, près de la borne en essai, auront comme conséquence une chute rapide et totale de la tension. Un claquage progressif, mais néanmoins total dans l'enroulement à l'essai aura comme conséquence une chute légèrement plus lente de la tension, ayant lieu généralement par échelons, voir la figure B.1.
- Un claquage dans une partie de l'enroulement réduira l'impédance de l'enroulement, ayant ainsi pour résultat une diminution du temps à demi-valeur. Des oscillations caractéristiques se produiront également sur l'onde de tension au moment du claquage, voir les figures B.1 à B.5.
- Des défauts moins importants, tels que la rupture de l'isolement de bobine à bobine ou même de spire à spire, ne sont généralement pas reconnaissables sur les enregistrements de tension mais peuvent parfois être détectés comme oscillations à haute fréquence; habituellement les enregistrements de courant révéleront ces défauts. Voir la figure B.6. De même, des défauts naissants sur ou près de la borne à l'essai ne peuvent aussi donner que de petits indices sur les oscillogrammes ou les enregistrements numériques.

Les enregistrements de tension transférée révéleront également les défauts mentionnés ci-dessus. La sensibilité de cette mesure est plus élevée que celle de la tension appliquée.

### **9.1.3 Enregistrements de courant – Essais pleine onde**

Les oscillogrammes ou les enregistrements numériques du courant de réponse de l'impulsion sont les moyens les plus sensibles pour la détection des défaillances. Cependant, cette sensibilité est associée à la possibilité pour les enregistrements de révéler un certain nombre d'effets non directement liés à une défaillance. Quelques possibilités ont été identifiées en 9.1. Elles peuvent être responsables de salves d'oscillations erratiques ou de modifications du front d'onde sur les tracés de courant et il convient de les étudier.

Les modifications majeures dans les enregistrements de courant, tels que l'amplitude et les changements de fréquence, indiquent généralement des claquages d'une partie d'enroulement dans l'enroulement essayé, entre les enroulements ou à la terre, voir la figure B.1. L'allure de la modification sera différente selon la méthode de détection de défaillance utilisée. Les courants peuvent augmenter ou diminuer et la direction de la variation ainsi que la méthode de détection de défaut donneront des renseignements sur la nature et l'endroit du défaut, voir la figure B.3.

Une augmentation significative, combinée avec une modification de la fréquence superposée d'un courant de neutre indique un défaut dans l'enroulement essayé, tandis qu'une diminution indique un défaut entre l'enroulement essayé et un enroulement adjacent ou à la terre.

Le courant transféré par capacité montrera un changement instantané de polarité pour des défauts dans l'enroulement essayé ou à la terre. Il y aura aussi une modification de la fréquence de base et il peut y avoir une diminution de l'amplitude. Un défaut entre l'enroulement essayé et un enroulement adjacent se révélera par une augmentation instantanée d'amplitude dans le même sens de polarité et par une modification de la fréquence de base.

Les petites perturbations locales, dentelées, qui peuvent être étalées sur 2  $\mu$ s ou 3  $\mu$ s, sont une indication possible de décharge sévère ou de claquage partiel dans l'isolement entre spires ou bobines ou des connexions de bobine. Pour des enroulements de faible capacité série, c'est-à-dire, présentant principalement un comportement d'onde progressive, il peut être possible d'identifier la source des perturbations en évaluant la différence de temps entre l'arrivée au neutre des perturbations capacitatives et les perturbations de l'onde progressive.

#### **9.1.4 Enregistrements de tension et de courant – Essais en onde hachée**

La comparaison des enregistrements en onde hachée après l'instant de hachage n'est généralement pas possible, à moins que les instants de hachage soient à peu près identiques. Des instants de hachage similaires, mais non nécessairement identiques sont réalisés au moyen d'éclateurs de hachage de type déclenché, voir la figure B.10. Même les petites différences dans l'instant de hachage, peuvent, pour quelques transformateurs, provoquer des différences marquées dans la forme des oscillations après le coup de hachage (cette forme étant une superposition des phénomènes transitoires dus au front de l'impulsion d'origine et au hachage) et ces différences peuvent compliquer la comparaison entre les enregistrements des applications réussies et celles pour lesquelles un défaut existe (voir la figure B.11).

Lors de l'utilisation des techniques d'enregistrement numérique, l'analyse de fonction de transfert, décrite à l'article 10, peut être utile pour éliminer cette complication (voir la figure B.17).

Il convient d'étudier toute modification de la fréquence des enregistrements de tension et de courant après le hachage. Ces modifications peuvent être provoquées soit par un claquage dans la boucle de retour à la terre du laboratoire, soit par une défaillance interne de l'objet en essai.

Lors de la conduite de l'essai en onde hachée, une défaillance de coupure de l'éclateur de hachage ou l'amorçage d'une partie externe donne une indication précise d'une défaillance de l'objet en essai ou du circuit d'essai, bien que l'enregistrement de tension montre une onde hachée.

A condition que le temps de hachage soit sensiblement identique d'une application de tension à l'autre, les défaillances pendant cet essai seront détectables sur les enregistrements à la fois de tension et de courant par des différences dans les oscillations après hachage. Voir les figures B.8 et B.9. Il y a cependant des cas où le défaut se produit avant l'instant du hachage et de ce fait les mêmes considérations que pour les essais pleine onde s'appliquent (voir les figures B.2 et B.7).

## 9.2 Impulsion de choc de manœuvre

### 9.2.1 Enregistrements de tension

Dans les essais d'impulsion de choc de manœuvre, du fait de la distribution uniforme de la tension dans tout l'enroulement, le défaut implique généralement une détérioration importante sous forme de court-circuit entre les sections, les parties d'un enroulement ou même entre les enroulements ou à la terre. Ces types de défauts provoquent une modification importante de l'onde de tension comme une chute totale de l'onde ou un raccourcissement de la traîne ou, parfois, comme un creux temporaire dans le tracé. Par conséquent, les enregistrements de tension lors des essais d'impulsion de choc de manœuvre sont des moyens suffisamment sensibles pour la détection de la plupart des défauts, voir la figure B.15.

Pour des transformateurs, tout défaut d'une partie d'enroulement (défaillance spire à spire, claquage disque à disque ou pannes dans des enroulements à prise) aura comme conséquence un blocage de flux et sera facilement détecté par les enregistrements de tension et de courant.

Pour les bobines d'inductance à noyau à entrefer, qui ont seulement un enroulement par phase et pas de circuit magnétique fermé, la détection des défauts spire à spire peut être très difficile ou bien ils peuvent même rester non détectés. Ici une résolution plus élevée du courant capacitif s'écoulant à la terre ou un second enregistrement de courant (le courant de cuve) peut être utile. Dans ces cas, une résolution d'enregistrement plus élevée est recommandée pour couvrir le moment de la crête et de la polarité opposée de l'onde cosinus appliquée.

Tout raccourcissement de la queue d'onde dans les essais de transformateur est habituellement tout à fait reconnaissable de la variation de la longueur de la queue d'onde résultant des états initiaux différents de la magnétisation du noyau pour des applications successives; néanmoins, plus les états initiaux peuvent être mis étroitement en correspondance, plus il devient facile de distinguer une condition de défaut d'une condition de non-défaut.

### 9.2.2 Enregistrements du courant de réponse à l'impulsion

La forme d'onde générale de l'enregistrement de courant a été décrite en 8.2.4.4 pour les transformateurs et en 8.3.4 pour des bobines d'inductance. Excepté au début de l'onde ou, dans le cas des transformateurs, à proximité de la saturation du noyau, des modifications brusques de courant ayant lieu en même temps qu'une déformation de l'onde de tension sont révélatrices de défaillance. Compte tenu de la nature des défauts attendus, les enregistrements de courant sont aussi sensibles que les enregistrements de tension.

## 10 Traitement numérique, comprenant l'analyse de fonction de transfert

Avec l'introduction des techniques d'enregistrement numérique dans les essais d'impulsion LI et SI, il existe maintenant les outils complémentaires qui sont disponibles pour l'analyse des défaillances :

Dans l'analyse de fonction de transfert, les enregistrements en temps réel de la tension appliquée  $U(t)$  et du courant de réponse de l'impulsion  $I(t)$  résultant, au neutre du transformateur ou à l'enroulement non essayé court-circuité à la terre (courant couplé par capacité), peuvent être transférés par les algorithmes de la transformation de Fourier rapide (FFT) dans le domaine des fréquences en respectivement  $U(\omega)$  et  $I(\omega)$ .

Les spectres de tension et de courant ( $U(\omega)$  et  $I(\omega)$ ) sont alors traités mathématiquement comme suit :

a) par division  $I(\omega)/U(\omega)$  pour former la fonction d'admittance de transfert,

ou

b) par division  $U(\omega)/I(\omega)$  pour former la fonction d'impédance de transfert.

Pour le réseau passif d'un transformateur, la fonction d'admittance et la fonction d'impédance sont considérées comme des fonctions caractéristiques dans le domaine des fréquences et devraient être indépendantes de la forme d'onde. Cependant, puisque le spectre de la tension  $U(\omega)$  ne présente aucun point nul, la fonction de transfert d'admittance  $I(\omega)/U(\omega)$  est utilisée de préférence dans l'analyse de fonction de transfert.

Des exemples d'une telle fonction de transfert sont donnés à la figure B.17.

D'après la théorie du quadripôle<sup>1)</sup>, pour la fonction d'admittance, les indices de défaillances sont révélés de la manière suivante.

- 1) Tout décalage de pôles significatifs de la fonction de transfert est l'indice d'une panne d'une partie d'enroulement.
- 2) Tout aplanissement des pôles serait un indice de décharges partielles.

Cependant, des modifications de l'impulsion de courant et/ou de la tension appliquée qui ne conduisent pas à une modification de la fonction d'admittance de transfert, indiquent un problème de circuit d'essai plutôt qu'un problème sur l'objet en essai et par conséquent est un outil pour différencier les défaillances internes et externes.

Il est à souligner que cette technique n'est pas entièrement éprouvée pour tous les cas et actuellement elle est uniquement recommandée comme une aide supplémentaire à l'interprétation des résultats. L'acceptation finale des résultats d'essai est toujours basée sur la comparaison des formes d'onde, comme indiqué en 7.5.

Les numériseurs ont été utilisés pour les essais d'impulsion depuis les années 80. Cependant, la documentation et l'expérience concernant l'analyse par fonction de transfert ont été longtemps contradictoires. Il y a plusieurs raisons à ces contradictions, notamment

- a) les transformateurs et en particulier les circuits d'essai d'impulsion de choc de foudre ne peuvent pas être représentés par un élément de circuit linéaire localisé pour lequel la théorie du quadripôle est entièrement applicable.
- b) les numériseurs peuvent avoir des filtres incorporés non normalisés pour filtrer le bruit du signal, qui peut
  - donner lieu à des indications filtrées (donc rejetées) d'un défaut naissant et non identifié ;
  - affecter l'indépendance de la forme d'onde de la fonction d'admittance ;
- c) les critères bon/mauvais pour les écarts dans les différentes conditions de défaut n'ont pas été encore établis à un degré satisfaisant.

Cette nouvelle technologie représente un outil très puissant à l'avenir, parce qu'elle peut également être utilisée pour la surveillance d'états en ligne, pour les défauts diélectriques et pour les défauts mécaniques après de graves courts-circuits.

Dans ce qui suit, quelques exemples d'enregistrements sont présentés, à la fois pour l'analyse en temps réel et en fonction de transfert.

<sup>1)</sup> La théorie du quadripôle est un outil mathématique pour décrire les relations entre les caractéristiques d'entrée et de sortie d'un circuit électrique linéaire dans les domaines des temps et des fréquences.

**Cas 1: Exemple d'enregistrements de forme d'onde non normalisée évaluée numériquement**

- Forme d'onde non normalisée 1,44/46  $\mu$ s avec 19 % de dépassement, évaluée par la tangente sur l'affaiblissement de traîne selon la CEI 60060-1, voir la figure B.18. Ici l'erreur dans l'évaluation d'amplitude peut être supérieure à 10 % du fait de la courbe intégrée non connue des algorithmes de lissage des numériseurs.
- Forme d'onde non normalisée 2,48/50  $\mu$ s, ayant des oscillations superposées avec une amplitude supérieure à 50 % et une fréquence inférieure à 0,5 MHz, voir la figure B.19. Ici le numériseur a évalué le temps à demi-valeur comme étant de 5  $\mu$ s, en se basant sur le premier passage de l'oscillation superposée, tandis que l'évaluation selon la CEI 60060-1 fait apparaître 50  $\mu$ s.
- Onde hachée non normalisée sur un enroulement de type couche, voir la figure B.20. Ici l'impédance de couche évite la chute rapide et les oscillations autour de zéro de l'onde hachée vers la terre. (Comparer les oscillogrammes ou les enregistrements numériques des figures B.8 à B.11 avec la figure B.20.)
- Comparaison de formes d'onde non normalisées par des numériseurs de différentes fabrications à partir du même enregistrement. Dans l'exemple de la figure B.21, il est trouvé une différence de 7 % pour l'amplitude (109,9 kV contre 102,3 kV) et de 9 % pour le paramètre  $T_1$  (2,55  $\mu$ s contre 2,34  $\mu$ s). La différence pour le paramètre  $T_2$  n'est pas explicable. La lecture du voltmètre de crête parallèle étalonné était de 110 kV.

**Cas 2: Réponses aux problèmes de circuit d'essai**

- Problème de circuit d'essai provoqué par un amorçage à la terre d'un câble de mesure. Voir la figure B.22a. Le courant transféré par capacité de l'enroulement BT amorce à une terre différente de la terre de cuve et de générateur, entraînant, après avoir comparé avec l'essai pleine onde réduite
  - a) aucune indication de la tension ;
  - b) une indication claire de courant ;
  - c) une indication claire de l'analyse de fonction de transfert.
- Dans la fonction de transfert, l'aplanissement des pôles est présent, mais aucune modification de la fréquence. Cela indique des décharges.
- Après la correction du défaut dans le câble de mesure, l'essai d'impulsion de choc a été répété. La figure B.22b montre une correspondance parfaite entre les fonctions de transfert aux essais d'impulsion pleine onde réduite.

**Cas 3: Réponses aux défaillances d'objet en essai**

- Un enregistrement numérique de défaillance par claquage de fil de changeur de prises, entre les prises est illustré à la figure B.23a. Les enregistrements en temps réel de tension et de courant à la pleine impulsion et la fonction de transfert montrent des modifications importantes comparées à l'essai d'impulsion pleine onde réduite.
- Un enregistrement numérique de défaillances entre un enroulement de régulation grossière et fine, voir la figure B.23b. Des modifications importantes se produisent dans tous les enregistrements en temps réel et de fonction de transfert.

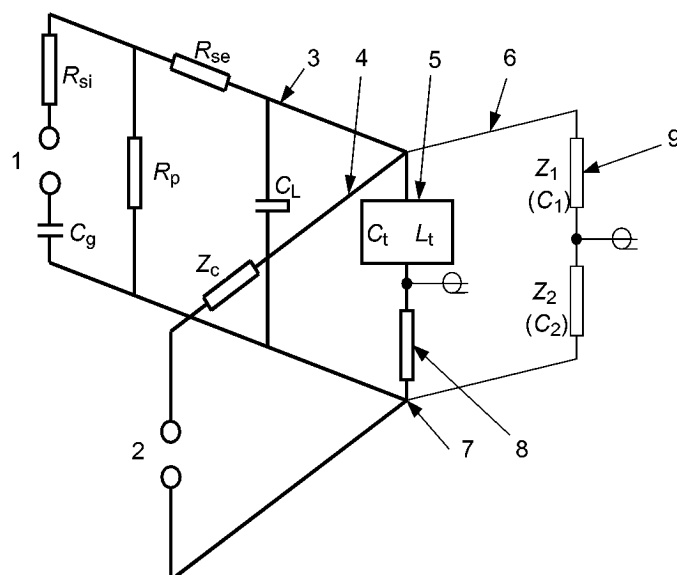
Comme on peut le voir à partir des enregistrements dans tous les exemples donnés précédemment, tous les défauts ont été aussi détectés par les enregistrements en temps réel.

**11 Rapports d'essai de l'impulsion de choc**

Il convient qu'un rapport des essais d'impulsion de choc conduits sur l'objet en essai comprenne au moins les informations qui suivent.

- a) Informations générales incluant

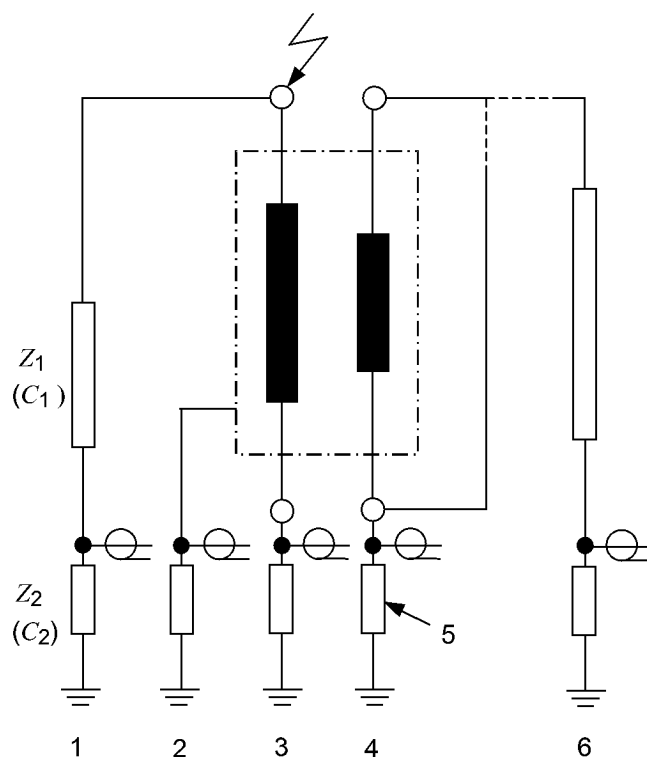
- le type, les caractéristiques et la tension des équipements essayés ;
  - le numéro de série ;
  - la position de la prise sur laquelle l'essai est effectué ;
  - le lieu et la date de l'essai ;
  - l'ingénieur d'essai du constructeur ;
  - l'ingénieur de l'acheteur qui assiste à l'essai ;
  - la norme à laquelle les équipements sont essayés ;
  - les niveaux d'essai et formes d'onde spécifiés.
- b) Une présentation sous forme de tableaux montrant les essais d'impulsion de choc conduits sur chaque borne comprenant
- le type et l'amplitude des ondes d'essai ;
  - la numérotation des enregistrements pour l'identification et pour faciliter la mise en référence croisée ;
  - les tensions d'essai réelles pour LI, les ondes pleines ou hachées et pour SI ;
  - les paramètres réels d'installation (internes et externes) pour le générateur d'impulsion ;
  - les paramètres réels de forme d'onde pour LI ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_c$ ) et pour SI ( $T_1$ ,  $T_d$ ,  $T_z$ ) ;
  - un dessin des raccordements pour chaque essai, incluant
    - les marquages des bornes ;
    - à quelle borne l'impulsion est appliquée ;
    - les dispositions de mise à la terre des bornes non essayées de la phase essayée et des phases non essayées, y compris les valeurs de toutes les résistances ou impédances de mise à la terre ;
  - les caractéristiques du circuit d'essai ;
  - les dispositions et les positions de mesure de courant et tension.
- t) Les reproductions des enregistrements pertinents pris pendant l'essai constituent une partie importante du rapport d'essais. Lorsque cela est spécifié, il convient que ces enregistrements soient correctement identifiés et organisés, de sorte que les comparaisons nécessaires entre les pleines ondes et les ondes hachées puissent être facilement réalisées. Il convient que les graduations de chaque axe (c'est à dire amplitude et temps) soient données sur chaque oscillogramme ou enregistrement numérique.



### Légende

1	générateur d'impulsion	$C_g$	capacité du générateur
2	éclateur de hachage	$C_L$	capacité de charge
3	circuit principal	$C_t$	capacité effective de l'objet en essai
4	circuit de hachage	$L_t$	impédance effective de l'objet en essai
5	objet en essai	$R_{si}$	résistance série interne
6	circuit de mesure de tension	$R_{se}$	résistance série externe
7	terre de référence	$R_p$	résistance parallèle
8	shunt de courant	$Z_c$	impédance additionnelle dans le circuit de hachage
9	diviseur de tension	$Z_1 (C_1)$	impédance (capacité) du côté haute tension du diviseur de tension
		$Z_2 (C_2)$	impédance (capacité) du côté basse tension du diviseur de tension

Figure 1 – Circuit d'essai d'impulsion de choc typique



### Légende

- |   |                                  |   |  |
|---|----------------------------------|---|--|
| 1   | circuit de mesure de tension     | 4 | courant transféré par capacité                     |
| 2   | courant de cuve                  | 5 | shunts de courant                                  |
| 3   | neutre, ou courant d'enroulement | 6 | circuit de mesure de tension et tension transférée |
| $Z_1 (C_1)$ , $Z_2 (C_2)$ impédances (capacités) du diviseur de tension (voir aussi figure 1) |                                  |   |  |

**Figure 2 – Raccordements aux bornes pour l'essai d'impulsion de choc de foudre et méthodes applicables de détection de défaillances**



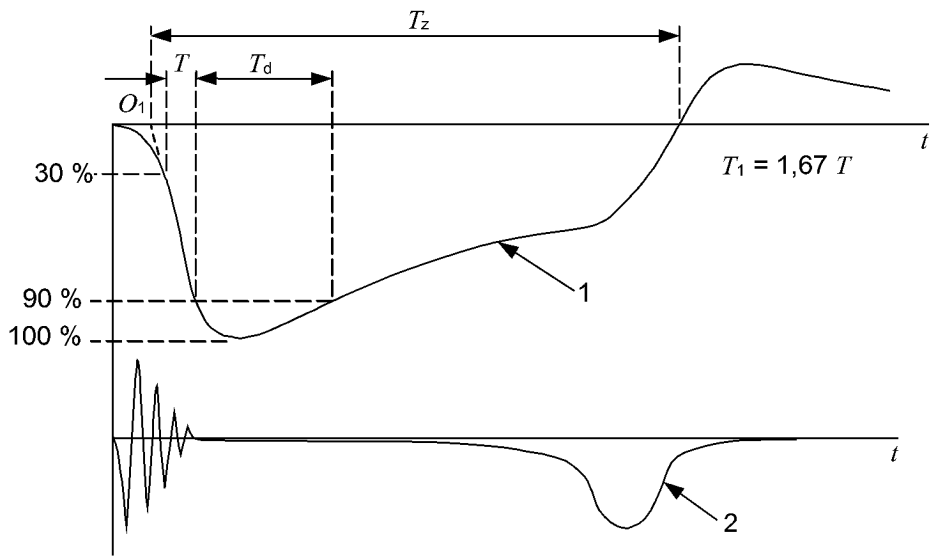


Figure 3a – Formes d'onde de l'impulsion de choc de manœuvre de transformateur

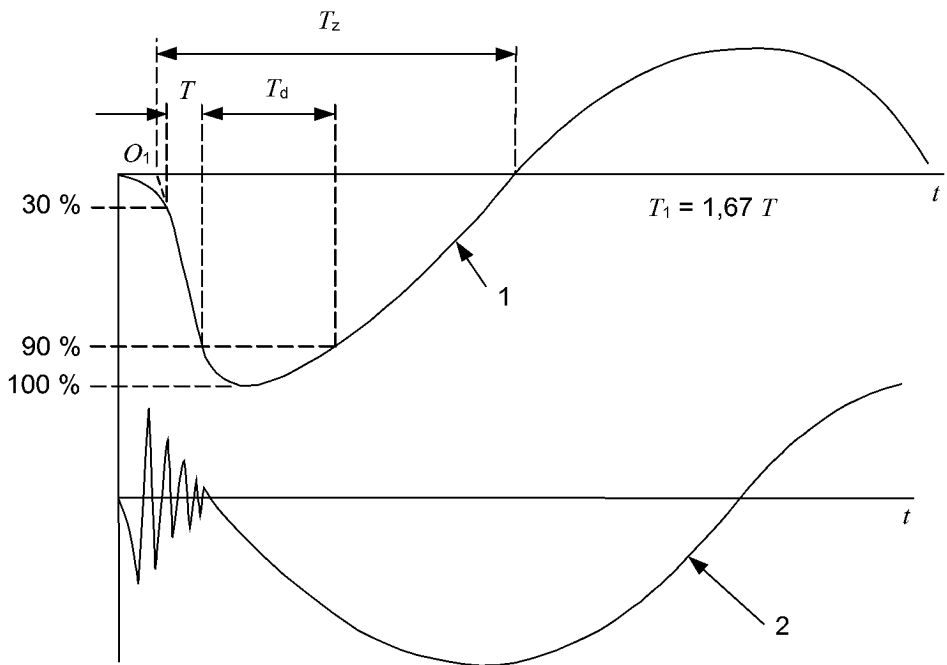
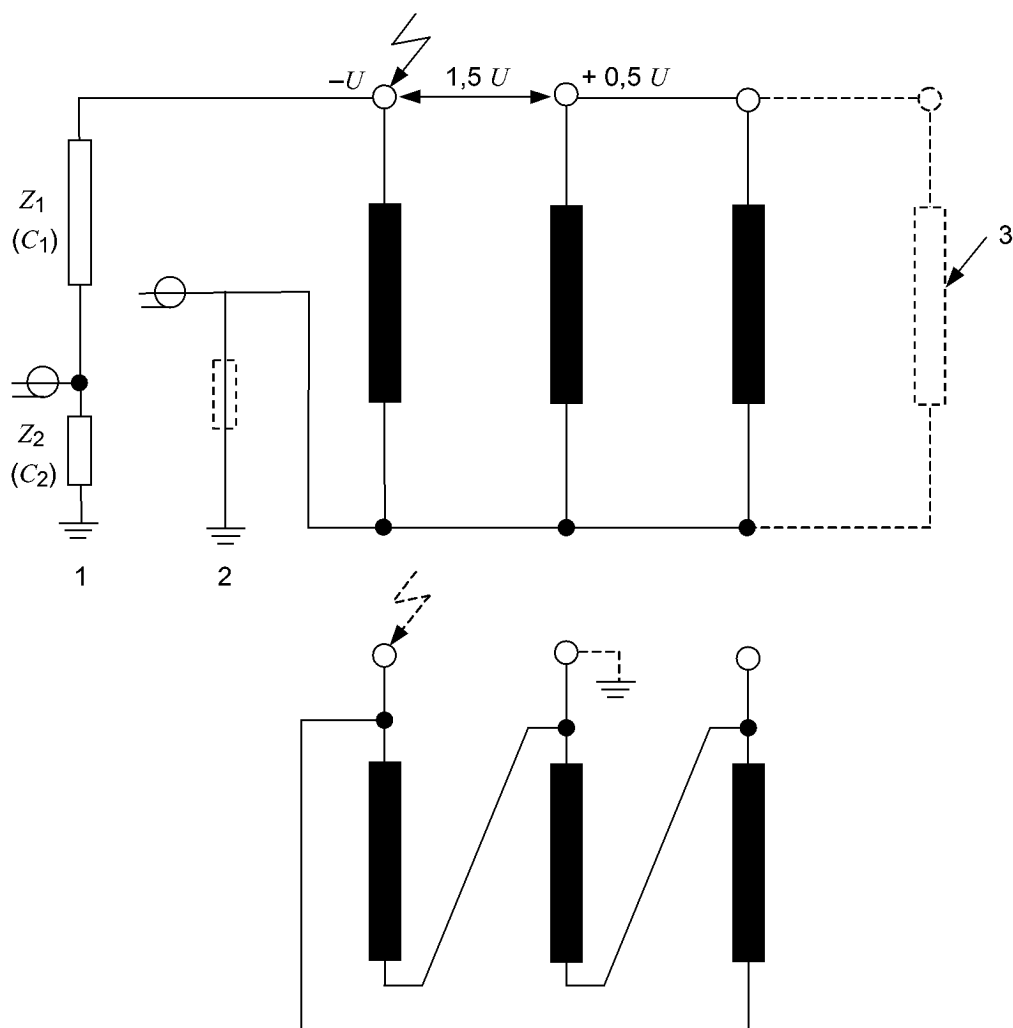


Figure 3b – Formes d'onde de l'impulsion de choc de manœuvre de bobine d'inductance

Légende

- |   |                         |       |   |
|---|-------------------------|-------|---|
| 1 | forme d'onde de tension | $T$   | temps entre l'instant où l'impulsion est à 30 % et à 90 % de la valeur maximale |
| 2 | forme d'onde de courant | $T_1$ | temps d'attaque virtuel   |
|   |                         | $T_z$ | temps du premier passage à zéro   |
|   |                         | $T_d$ | temps supérieur à 90 % de l'amplitude spécifiée                                 |

Figure 3 – Formes d'onde de l'impulsion de choc de manœuvre de transformateur et de bobine d'inductance



**Légende**

- 1 circuit de mesure de tension
- 2 circuit de mesure de courant
- 3 résistance de charge, voir 8.2.2.1

$Z_1$  ( $C_1$ ),  $Z_2$  ( $C_2$ ) impédances (capacités) du diviseur de tension (voir aussi figure 1)

NOTE L'application alternative de l'impulsion à l'enroulement connecté en triangle est représentée en pointillés.

**Figure 4 – Raccordements aux bornes pour l'essai d'impulsion de choc de manœuvre et méthodes de détection de défaillances**

## Annexe A (informative)

### Principes de contrôle de la forme d'onde

#### A.1 Généralités

Les ondes d'impulsion sont produites par un montage qui charge un groupe de condensateurs en parallèle et puis les décharge en série. L'amplitude de la tension est déterminée par la tension de charge initiale, le nombre de condensateurs en série en décharge et la régulation du circuit. La forme d'onde est déterminée en grande partie par les capacités et les résistances du générateur et par l'impédance de la charge.

Les principes régissant la façon de contrôler les formes d'onde dans l'essai d'impulsion de choc de foudre des transformateurs sont indiqués au moyen des diagrammes simplifiés donnés par les figures A.1 et A.2. Il est nécessaire de les considérer sous deux aspects principaux :

- pour des enroulements d'impédance élevée ;
- pour des enroulements d'impédance faible.

#### A.2 Enroulements d'impédance élevée ( $L_t > 100$ mH)

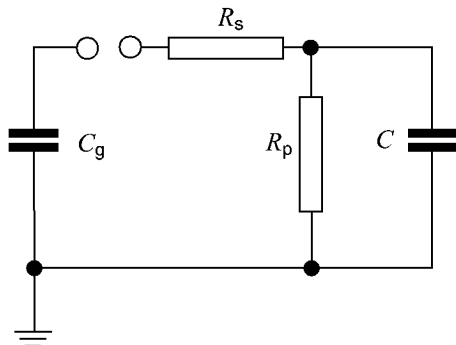


Figure A.1a

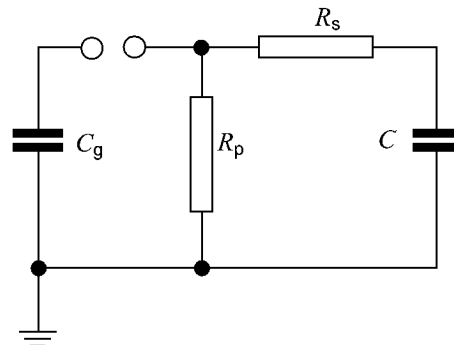


Figure A.1b

#### Légende

$C_g$  capacité du générateur

$C = C_t + C_L + C_1$  (voir figure 1)

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

$R_p$  résistance parallèle (voir figure 1)

**Figure A.1 – Contrôle de la forme d'onde pour des enroulements d'impédance élevée**

Le temps d'attaque sera

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

ou

$$T_1 \approx 3 R_s \times \frac{C_g C}{C_g + C} \quad (\text{figure A.1b}) \quad (\text{A.2})$$

Et le temps à demi-valeur sera

$$T_2 \approx 0,7(R_s + R_p)(C_g + C) \quad (\text{figure A.1a}) \quad (\text{A.3})$$

ou

$$T_2 \approx 0,7 R_p (C_g + C) \quad (\text{figure A.1b}) \quad (\text{A.4})$$

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

$$T_1 \approx 3 R_s \times C \text{ et } T_2 \approx 0,7 R_p \times C_g \quad (\text{A.5})$$

En général, des paramètres de front et de traîne sont réglés selon ces principes, applicables aux charges purement capacitives. Il convient cependant de préciser que la capacité effective  $C_t$ , incluse dans les valeurs de  $C$  est une grandeur physique différente, pour des considérations de front et de traîne.

Pour le temps d'attaque,  $C_t$  peut être calculé comme  $C_t \approx C_B + \sqrt{(C_s C_e)}$  où  $C_B$  est la capacité de bague,  $C_s$  est la capacité série de l'enroulement et  $C_e$  est la capacité de l'enroulement à la terre.

Pour la queue d'onde (la traîne),  $C_t$  peut être estimée comme  $C_B$  plus une partie de  $C_e$  en fonction de la distribution de tension initiale. Évidemment, la valeur de  $C_t$ , pour des considérations de traîne, est de moindre importance dans la plupart des cas pratiques (voir l'équation (A.5)).

Pour les enroulements d'inductances effectives  $L_t$  dans la plage de 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 directement ajustée en accord avec l'équation (A.5). Pour tenir compte de cet effet, l'expérience a montré que  $R_p$  doit être augmentée jusqu'à une valeur de deux à dix fois supérieure à la valeur dérivée de l'équation (A.5).

### A.3 Enroulements d'impédance faible ( $L_t < 20$ mH)

Pour les ajustements du front, le même raisonnement s'applique que pour les enroulements d'impédance élevée.

Pour les ajustements de l'onde de traîne, l'objet en essai peut être représenté par son inductance effective comme indiqué à la figure A.2.

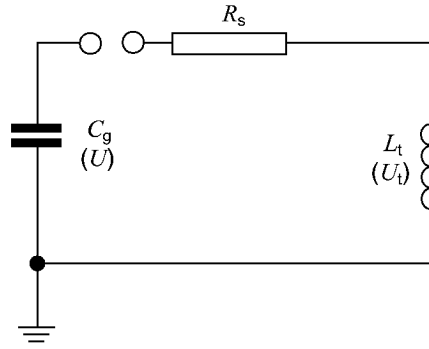


Figure A.2 – Contrôle de la queue d'onde pour des enroulements d'impédance faible

La tension d'essai  $U_t$  sera oscillatoire ou exponentielle, selon la valeur du coefficient d'amortissement  $k$  du circuit. Des circuits amortis de manière critique ( $k = 1$ ) ou sur-critique ( $k > 1$ ) engendrent des courbes exponentielles. Cependant, ceux-ci ne sont généralement pas applicables, puisque les valeurs correspondantes de résistance donnent des temps d'attaque de longueurs inacceptables.

Lorsque  $k < 1$ , la tension d'essai est donné par

$$U_t = U e^{-\alpha t} \left( \cos \omega t - \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t \right) = \frac{U}{\cos \varphi} e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \varphi) \quad (\text{A.6})$$

où

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \alpha^2$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L_t C_g}$$

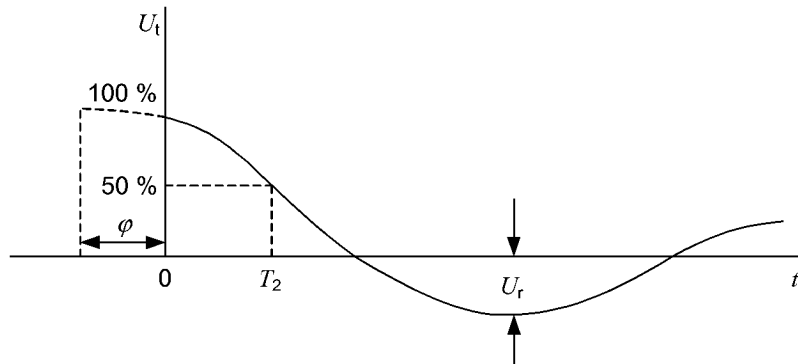
$$\alpha = \frac{R_s}{2L_t}$$

$$\tan \varphi = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{k}{\sqrt{1-k^2}}$$

et le coefficient d'amortissement

$$k = \frac{\alpha}{\omega_0} = \frac{R_s}{2 \sqrt{\frac{L_t}{C_g}}}$$

Cette tension constitue une onde d'oscillation amortie, représentée à la figure A.3.



**Figure A.3 – Oscillation amortie**

Pour une première évaluation de  $T_2$ ,  $R_s$  est supposé être à zéro. Donc l'équation (A.6) devient :

$U_t = U \cos \omega_0 t$  et le temps à demi-valeur est donné par

$$T_2 = \frac{1}{6} \times \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{\pi}{3} \sqrt{L_t C_g} \quad (\text{A.7})$$

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

Une telle oscillation de polarité opposée de forte valeur peut surcharger l'isolement entre spires et entre enroulements, du fait des fortes contraintes oscillatoires qui peuvent déclencher des décharges partielles et accroître les mécanismes d'électrode, dus uniquement aux limitations d'essai. Il convient donc de limiter la crête de polarité opposée  $U_r$  à 50 % de la tension de crête initiale.

Avec la limitation de 50 % de la crête de polarité opposée  $U_r$ , un coefficient d'amortissement considérable doit être introduit, avec comme effet, le temps à demi-valeur qui sera alors plus court que la valeur donnée par l'équation (A.7). Pour ce cas, le facteur d'amortissement  $k = 0,25$  et le temps à demi-valeur sera

$$T_2 = \sqrt{0,5 L_t C_g} \quad (\text{A.8})$$

Les équations (A.7) et (A.8) donnent des conseils pour le contrôle de la queue d'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 influencé par la connexion des enroulements non essayés. Avec les enroulements non essayés court-circuités et étant mis à la terre (connexion habituelle),  $L_t$  est l'inductance de fuite du transformateur. L'essai dans cette configuration produit généralement la plus grande contrainte sur l'isolement entre les enroulements ou les parties d'enroulements, même si une traîne plus courte en résulte. Cependant, la courte traîne ne contraindra pas trop le milieu de l'enroulement par rapport à la terre, comme d'autres configurations éventuelles pourraient le faire, puisque la courte traîne ne maintiendra pas longtemps la tension.

L'inductance effective peut être augmentée par la charge d'une résistance sur les enroulements non essayés, avec la limitation cependant, que les tensions sur les bornes de l'enroulement non essayé n'excèdent pas 75 % pour les enroulements raccordés en étoile ou 50 % pour les enroulements raccordés en triangle, par rapport à leur ou leurs niveaux associés de tenue à l'impulsion de choc de foudre.

$C_g$  peut être modifié par la connexion série ou parallèle des étages du générateur d'impulsion. Selon l'équation (A.9), la capacité minimale requise du générateur sera

$$C_g \approx 2 \frac{T_2^2}{L_t} \quad (\text{A.9})$$

Il y a, cependant, des cas où la condition de l'équation (A.9) ne peut pas toujours être satisfaite en raison des valeurs extrêmement basses de  $L_t$  ou lorsque  $L_t$  ne peut plus n'être augmentée par la mise à la terre par résistance des bornes des enroulements non essayés, en raison de la limitation de tension mentionnée ci-dessus. Dans ces cas, la constante de temps de décharge du circuit est donnée par

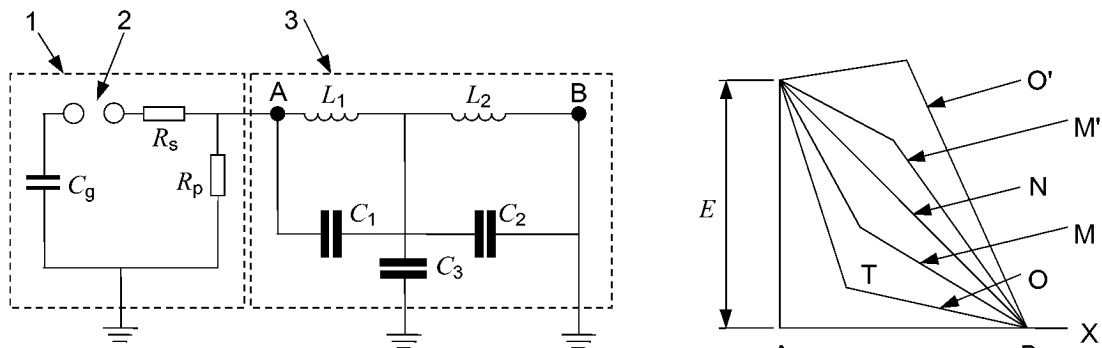
$$\tau = \frac{L_t}{R_s} \quad (\text{A.10})$$

Cette équation indique encore une manière d'ajuster la queue d'onde. Cependant, une forte réduction de  $R_s$  aura comme conséquence un dépassement excessif ou des oscillations superposées à la crête de l'onde d'impulsion et aussi, comme décrit plus haut, une crête de polarité opposée excessive. Dans ce cas, il est recommandé d'utiliser une capacité additionnelle de charge  $C_L$  pour le contrôle du front d'onde. La capacité de charge réduira alors les effets nuisibles d'une faible résistance série  $R_s$ .

Si les méthodes de contrôle de la queue d'onde mentionnées ci-dessus ne sont toujours pas suffisantes pour atteindre le temps à demi-valeur approprié, un compromis est nécessaire entre accepter un temps à demi-valeur plus court ou bien le recours à la mise à la terre par résistance à la ou aux bornes non essayées du ou des enroulements à l'essai, en accord avec la figure A.6. Dans ce cas encore, la limitation de tension de 75 %, sur la ou les bornes non essayées pour des enroulements relié en étoile et 50 % pour des enroulements reliés en triangle par rapport à leurs niveaux associés de tenue à l'impulsion de choc de foudre, s'applique. Il convient cependant de donner la préférence à un temps à demi-valeur plus court.

Le repère 3 de la figure A.4 montre le transformateur équivalent avec une extrémité de l'enroulement mis directement à la terre. Si les capacités de traversée  $C_1$  et  $C_2$  sont grandes comparées à la capacité  $C_3$  à la terre, il en résultera alors une distribution de tension semblable à la courbe M du graphique. La distribution finale est donnée par la ligne N, qui signifie que l'enveloppe de l'oscillation sera entre les courbes M et M'. Quand les capacités de traversée sont extrêmement petites comparées à la capacité à la terre, il en résultera alors une distribution de tension semblable à la courbe O, qui donnera une enveloppe de l'oscillation entre les courbes O et O'. Avec cette configuration, il y a des parties de l'enroulement qui peuvent excéder la tension appliquée aux bornes de ligne, mais généralement ces enroulements ont de longues constantes de temps et le temps pour que le point T oscille à son maximum est habituellement assez long pour que la tension appliquée sur les bornes ne soit plus qu'à 50 % de la valeur de crête. Cette configuration ne produit pas de contrainte prolongée entre l'enroulement et la terre, mais elle contraint l'isolement dans l'enroulement.

Cette configuration d'essai est bien appropriée aux mesures de courants puisqu'il n'y a aucune augmentation de la résistance du circuit et le circuit a donc une bonne réponse aux perturbations à haute fréquence.



#### Légende

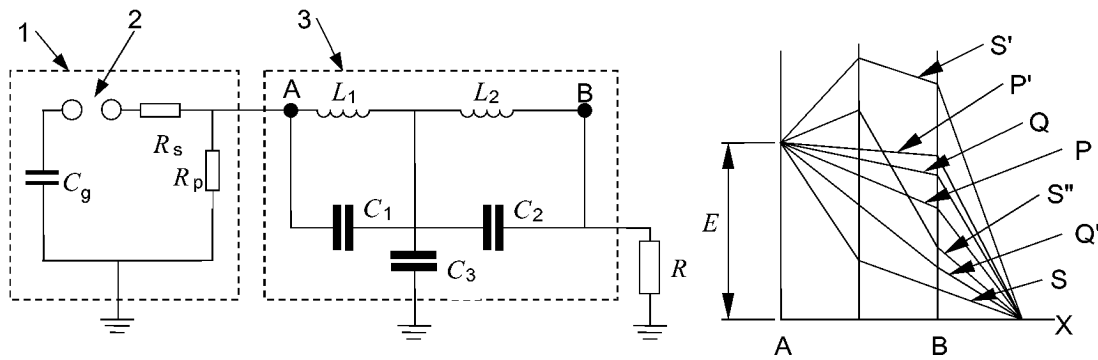
1	générateur d'impulsion	$C_1, C_2$	capacités de traversée
2	éclateur	$C_3$	capacité à la terre
3	transformateur	$C_g, R_s, R_p$	(voir figure 1)
X	terre	$L_1, L_2$	inductances
A	borne de l'enroulement		
B	extrémité neutre de l'enroulement		
E	amplitude de tension à la borne de l'enroulement		

**Figure A.4 – Effets dus à la courte longueur de la queue d'onde**

Une autre configuration possible consiste à insérer une résistance à l'extrémité mise à la terre de l'enroulement en l'essai. Cette configuration tend à modifier les contraintes spire à spire et bobine à bobine, la grandeur de la modification dépendant des constantes de temps de l'enroulement. Le repère 3 de la figure A.5 montre le réseau équivalent typique d'un transformateur avec l'extrémité non essayée de l'enroulement mis à la terre par une résistance. Si les capacités de traversée  $C_1$  et  $C_2$  sont très grandes par rapport à la capacité  $C_3$  à la terre, il en résultera une distribution semblable à la courbe P du graphique. La distribution finale sera semblable à la courbe Q, où toute, ou presque toute la tension apparaît aux bornes de la résistance. L'enveloppe de l'oscillation sera alors entre les courbes P et P'. Quand la capacité à la terre est grande comparée à la capacité de traversée, une distribution initiale semblable à la courbe S du graphique aura lieu et on peut supposer que la distribution finale sera encore la courbe Q. L'enveloppe de l'oscillation est maintenant entre S et S'. Il est encore possible de produire des tensions excessivement élevées par rapport à la terre dans des parties de l'enroulement. Il est généralement habituel d'insérer juste assez de résistance pour produire une longueur de traîne adéquate et la tension apparaissant aux bornes de la résistance est limitée à moins de 75 % du niveau de tenue d'impulsion de choc de foudre associé. Si dans le dernier exemple, la résistance requise pour produire une longueur de traîne adéquate avait été plus petite, la courbe de distribution finale serait abaissée à Q' et l'enveloppe de l'oscillation serait alors S et S'. Il convient de mesurer la longueur de traîne et la tension aux bornes de la résistance pour déterminer la valeur de la résistance à utiliser.

Cette configuration d'essai applique la forme d'onde appropriée à l'isolement d'extrémité de ligne et convient aux mesures de courant de terre, bien que la résistance puisse réduire légèrement la sensibilité de la détection de défaillances. Initialement, la pleine tension d'impulsion est appliquée aux bornes de l'enroulement et de la résistance en série; donc, la contrainte à travers l'enroulement sera réduite.



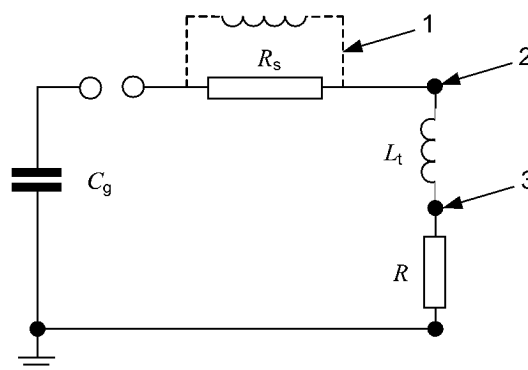
**Légende**

- 1 générateur d'impulsion
- 2 éclateur
- 3 transformateur
- X terre

**Figure A.5 – Enroulement mis à la terre par une résistance**

L'insertion d'une inductance entre le générateur d'impulsion et l'enroulement à essayer, parfois en parallèle avec  $R_s$  (voir la figure A.6), augmente l'inductance globale du circuit et peut souvent augmenter le temps de traîne au-delà de ce que peut faire le générateur d'impulsion seul. Cette configuration se fonde sur un transfert d'énergie vers l'inducteur à partir du générateur d'impulsion pendant le front d'onde et un transfert d'énergie de l'inducteur à l'enroulement pendant la queue d'onde. La grandeur de l'amélioration du temps de traîne avec cette configuration dépend des caractéristiques de l'enroulement et des valeurs d'inductance disponibles.

Presque les mêmes considérations s'appliquent pour l'ajustement du temps d'attaque de l'impulsion de choc de manœuvre. Cependant, dans ce cas la capacité effective du transformateur  $C_t$  pour le temps d'attaque plus long est égale à la capacité effective d'enroulement à la terre  $C_e$ .

**Légende**

- 1 Il est développé une autre méthode d'amélioration du temps à demi-valeur qui utilise un inducteur additionnel en parallèle avec  $R_s$ , augmentant de ce fait l'inductance globale du circuit.
- 2 borne essayée
- 3 borne non essayée

**Figure A.6 – Mise à la terre par résistance des enroulements à basse d'impédance**

## Annexe B (informative)

### Oscillogrammes et enregistrements numériques typiques

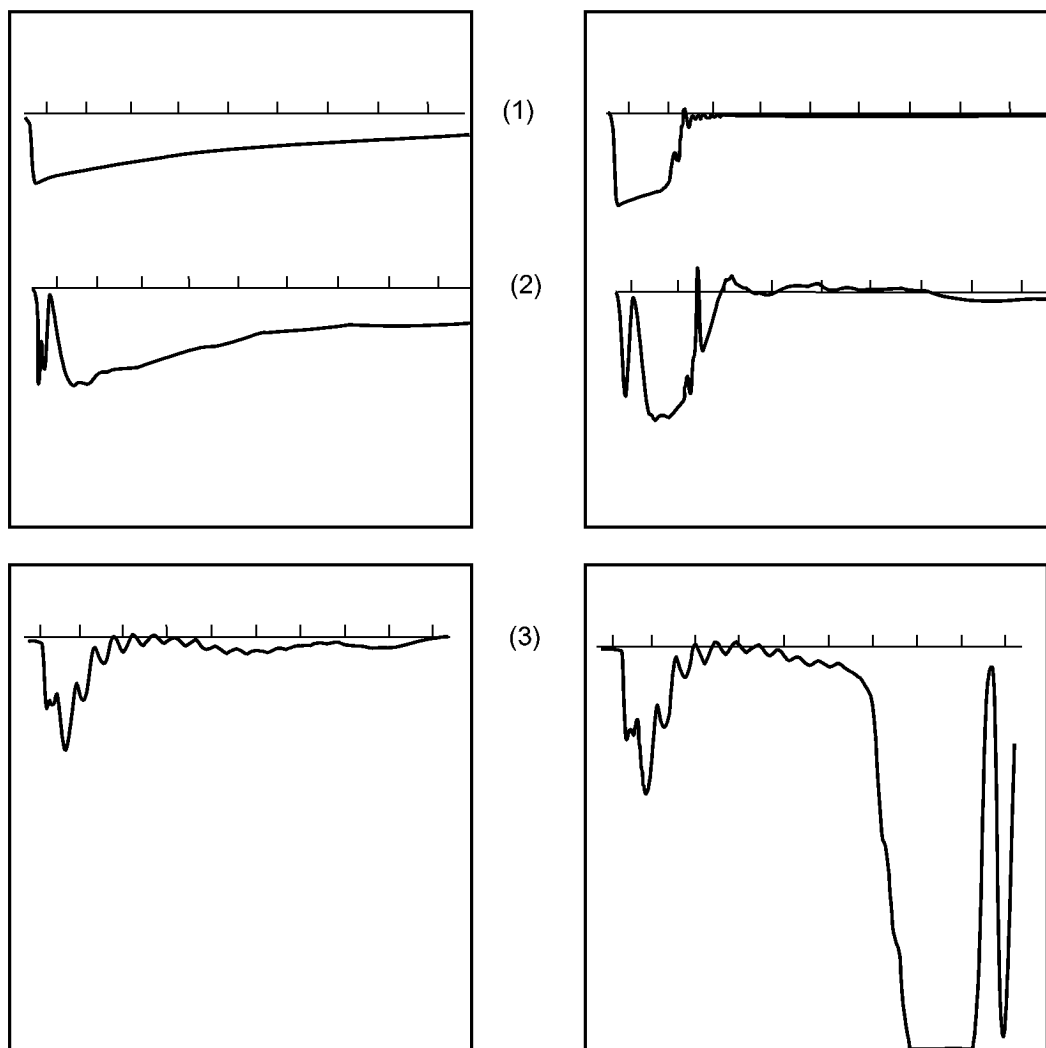
Les oscillogrammes et les enregistrements numériques des états de défaut et de non-défaut reproduits aux pages suivantes sont extraits d'enregistrements d'essais réels sur des transformateurs de puissance de type à noyau avec des enroulements cylindriques concentriques et sur des bobines d'inductance shunt. L'attention est de nouveau attirée sur le fait que, même si ces oscillogrammes sont typiques, on ne peut pas supposer qu'une divergence trouvée sur un autre transformateur ou sur une autre bobine d'inductance de tension, de conception et fabrication différentes, même semblables en apparence à ce qui est mentionné ici, soit provoquée par un défaut identique. L'intention est uniquement de donner des directives générales en les illustrant par des défauts particuliers.

**Tableau B.1 – Sommaire des exemples illustrés par les oscillogrammes et les enregistrements numériques**

Figures	Exemples	Articles
<b>Essais d'impulsion de choc de foudre</b>		
<b>Défauts pleine onde</b>		
B.1	Claquage, ligne au neutre, à travers l'enroulement haute tension essayé	9.1.2; 9.1.3
B.2	Claquage, entre disques, à l'entrée de l'enroulement haute tension essayé	9.1.2; 9.1.4
B.3	Claquage, entre couches, dans l'enroulement à prises à pas grossier	9.1.2; 9.1.3
B.4	Claquage entre les fils de prélèvement à l'extérieur de l'enroulement à prises	9.1.2
B.5	Claquage à travers une section dans un enroulement à prises à pas fin	9.1.2
B.6	Claquage entre conducteurs parallèles d'un enroulement principal à haute tension	9.1.2
B.7	Claquage entre les clinquants de bague	9.1.4
<b>Défauts onde hachée</b>		
B.8	Claquage entre les spires dans l'enroulement principal haute tension essayé	9.1.4; 10
B.9	Claquage entre les spires dans un enroulement à prises à pas fin	9.1.4; 10
<b>Ondes hachées – Effets des différences au hachage</b>		
B.10	Essais avec des temps de hachage identiques	9.1.4; 10
B.11	Essais avec de grandes et petites différences de temps de hachage	9.1.4; 10
<b>Non-défauts provoquant des divergences</b>		
B.12	Effet des résistances non linéaires dans le changeur de prises	9.1.1
B.13	Effet des différences de démarrage des étages du générateur	9.1.1
<b>Essais d'impulsion de choc de manœuvre</b>		
B.14	Essai satisfaisant sur un transformateur	8.2.2.1
B.15	Claquage de l'enroulement principal haute tension en essai d'un transformateur	9.2.1
B.16	Essai satisfaisant sur une bobine d'inductance	8.3.1; 8.3.4
<b>Analyse de fonction de transfert</b>		
B.17	Comparaison de la fonction de transfert d'une pleine onde et d'une onde hachée	9.1.4; 10

**Tableau B.1 (suite)**

<b>Évaluation de formes d'onde non normalisées</b>		
B.18	Influence des algorithmes de lissage de courbe des numériseurs	7.5.2; 7.5.4.1; 10
B.19	Evaluation avec des oscillations superposées	7.5.2; 7.5.4.1; 10
B.20	Onde hachée non normalisée sur un enroulement de type couche	7.2.2; 10
B.21	Comparaison de forme d'onde non normalisée avec différents numériseurs	7.5.2; 10; 7.5.4.1
<b>Réponses aux problèmes de circuit d'essai</b>		
B.22	Problème de circuit d'essai provoqué par l'amorçage à la terre d'un câble de mesure	10
<b>Réponses aux défaillances d'objet en essai</b>		
B.23	Pleine impulsion de choc de foudre, défaillance entre les prises du changeur de prises et entre enroulements des pas grossier et fin	10



**Figure B.1a – Pleine onde réduite (75 %) sans défaut**

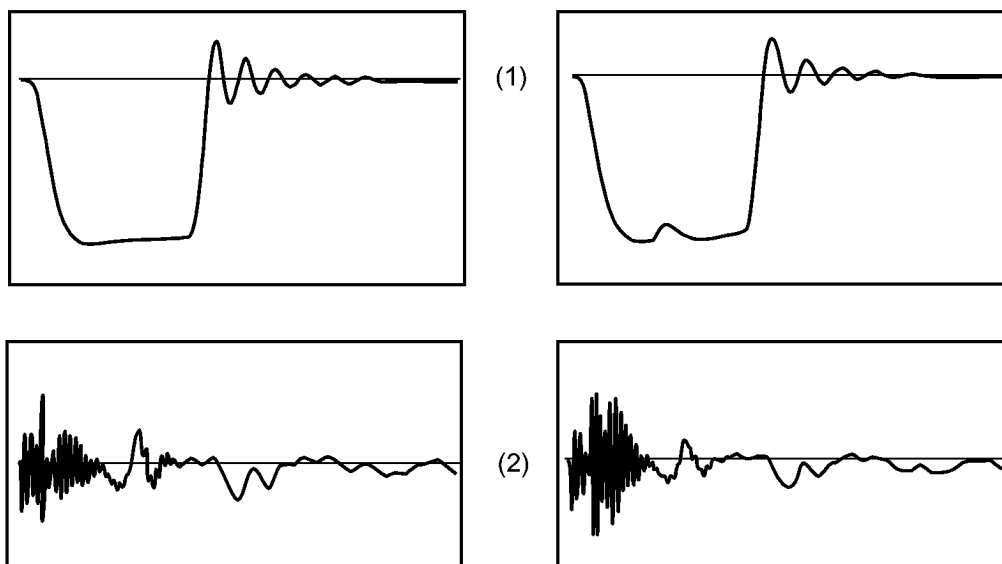
**Figure B.1b – Pleine onde (100 %) avec défaut**

(Amplitudes non égalisées)

#### Légende

- 1 impulsion appliquée, balayage de 100  $\mu$ s
- 2 tension transférée à l'enroulement basse tension, balayage de 100  $\mu$ s
- 3 courant de neutre, balayage de 25  $\mu$ s

**Figure B.1 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde –  
Claquage ligne au neutre à travers l'enroulement haute tension  
du transformateur de centrale 400 kV**



**Figure B.2a – Onde hachée (100 %) sans défaut (Note 1)**

**Figure B.2b – Onde hachée (100 %) avec défaut (Notes 1 et 2)**

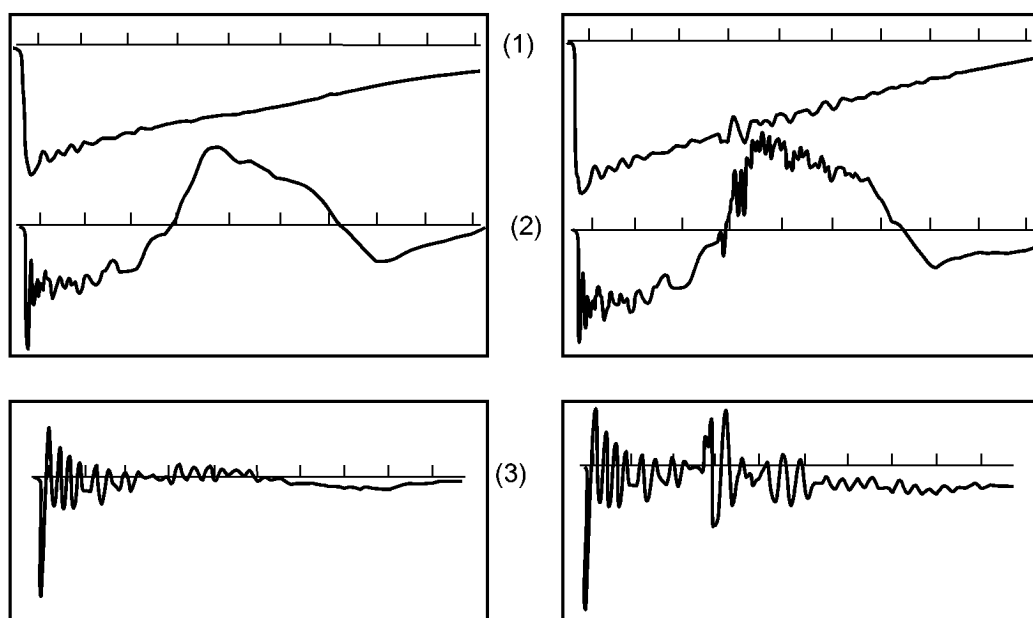
**Légende**

- 1 impulsion appliquée, balayage de 10  $\mu$ s
- 2 courant de neutre, balayage de 100  $\mu$ s

NOTE 1 Puisque la défaillance s'est produite avant l'instant de hachage, elle est considérée comme une défaillance pleine onde.

NOTE 2 Défaillance après approximativement 2  $\mu$ s clairement indiquée par les oscillogrammes de tension et courant de neutre.

**Figure B.2 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde –  
Claquage entre disques à l'entrée de l'enroulement haute tension  
du transformateur 115 kV**



**Figure B.3a – Pleine onde réduite (62,5 %) sans défaut**

**Figure B.3b – Pleine onde réduite (75 %) avec défaut**

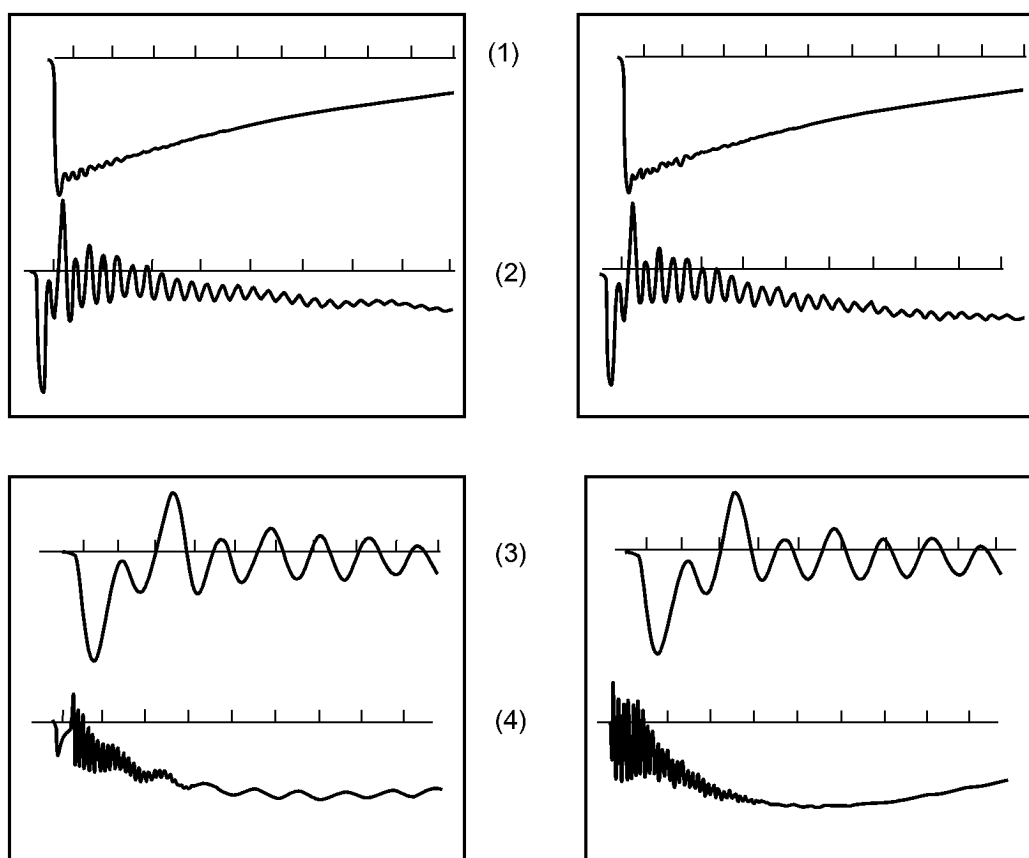
(Amplitudes non égalisées)

#### Légende

- 1 impulsion appliquée, balayage de 100  $\mu$ s
- 2 courant transféré par capacité de l'enroulement court-circuité, adjacent, à la terre, balayage de 100  $\mu$ s
- 3 courant de neutre, balayage de 100  $\mu$ s

NOTE Défaillance après 30  $\mu$ s, clairement indiquée par les oscillogrammes de tension, courant transféré par capacité et courant de neutre.

**Figure B.3 – Impulsion de choc de foudre, claquage entre couches, dans l'enroulement à prises à pas grossier d'un transformateur 400/220 kV**



**Figure B.4a – Pleine onde (100 %)  
sans défaut**

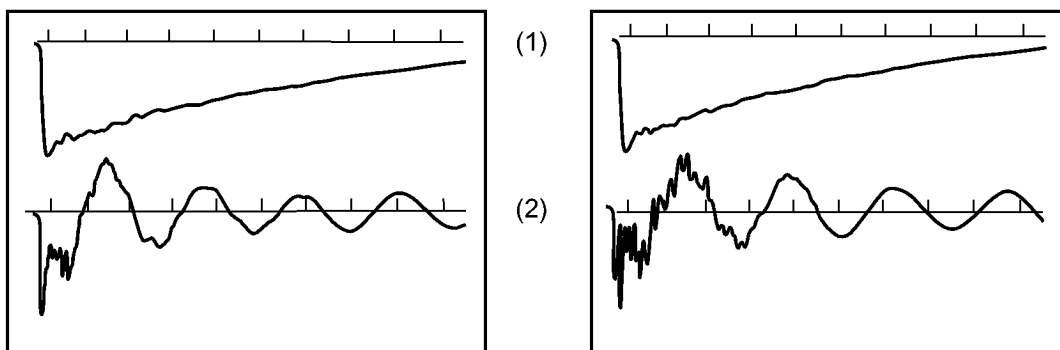
**Figure B.4b – Pleine onde (100 %)  
avec défaut**

#### Légende

- 1 impulsion appliquée, balayage de 100  $\mu$ s
- 2 courant de neutre, balayage de 100  $\mu$ s
- 3 courant de neutre, balayage de 25  $\mu$ s
- 4 courant de neutre, balayage de 250  $\mu$ s

NOTE Défaillance indiquée par des variations mineures sur tous les enregistrements de la deuxième application de la pleine d'onde de tension.

**Figure B.4 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde –  
Claquage entre les fils de deux sections 1,1 % de l'enroulement  
à prises extérieur du transformateur de centrale 400 kV**



**Figure B.5a – Pleine onde réduite (62,5 %) sans défaut**

**Figure B.5b – Pleine onde (100 %) avec défaut**

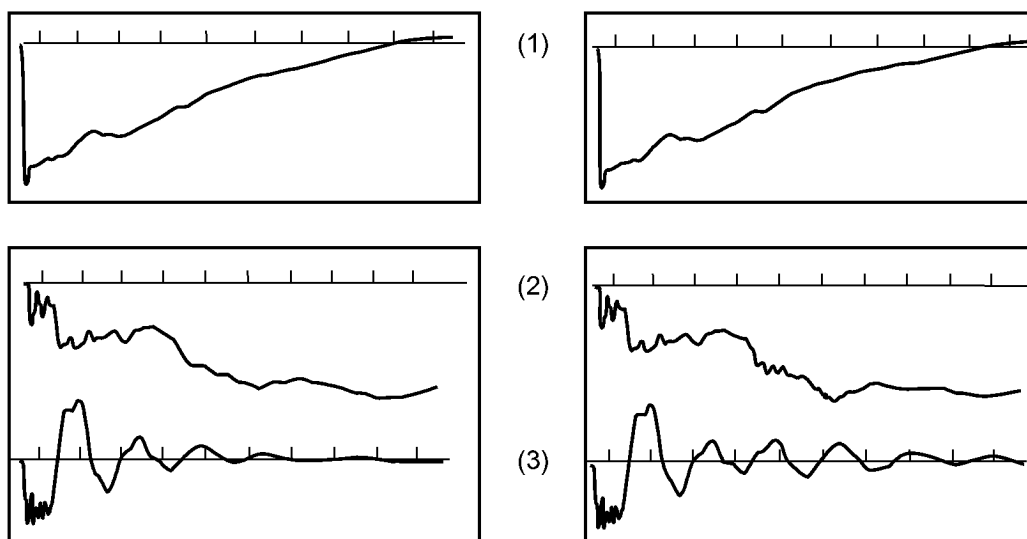
**Légende**

- 1 impulsion appliquée, pleine onde, balayage de 100  $\mu$ s
- 2 courant transféré par capacité de l'enroulement court-circuité, adjacent, à la terre, balayage de 100  $\mu$ s

NOTE Défaillance indiquée par les oscillogrammes de tension et de courant transféré par capacité.

**Figure B.5 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde –  
Claquage court-circuitant une section de l'enroulement à prises à pas fin  
d'un transformateur 220 kV**





**Figure B.6a – Pleine onde réduite (62,5 %) sans défaut**

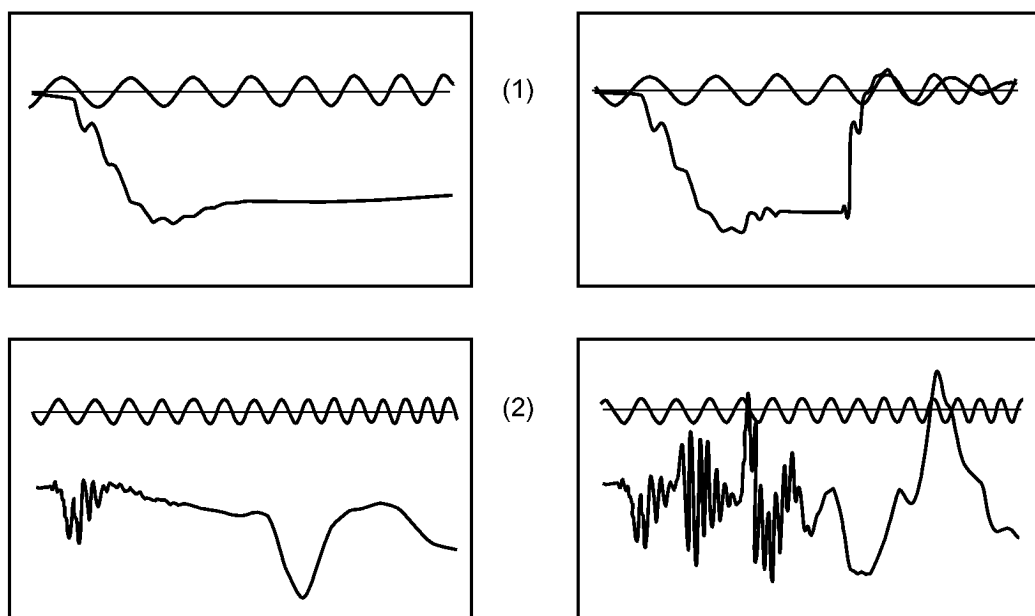
**Figure B.6b – Pleine onde (100 %) avec défaut**

**Légende**

- 1 impulsion appliquée, balayage de 100  $\mu$ s
- 2 courant de neutre, balayage de 100  $\mu$ s
- 3 courant transféré par capacité de l'enroulement court-circuité, adjacent, à la terre, balayage de 100  $\mu$ s

NOTE Défaillance après 30  $\mu$ s à 35  $\mu$ s, clairement indiquée par les oscillogrammes des courants de neutre et transféré par capacité et aucune indication dans l'oscillogramme de tension appliqué.

**Figure B.6 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde –  
Claquage entre les conducteurs parallèles d'un enroulement principal  
à haute tension d'un transformateur 220/110 kV**



**Figure B.7a – Pleine onde (100 %)  
sans défaut**

**Figure B.7b – Onde hachée (115 %)  
avec défaut (Note 1)**

(Amplitudes non égalisées)

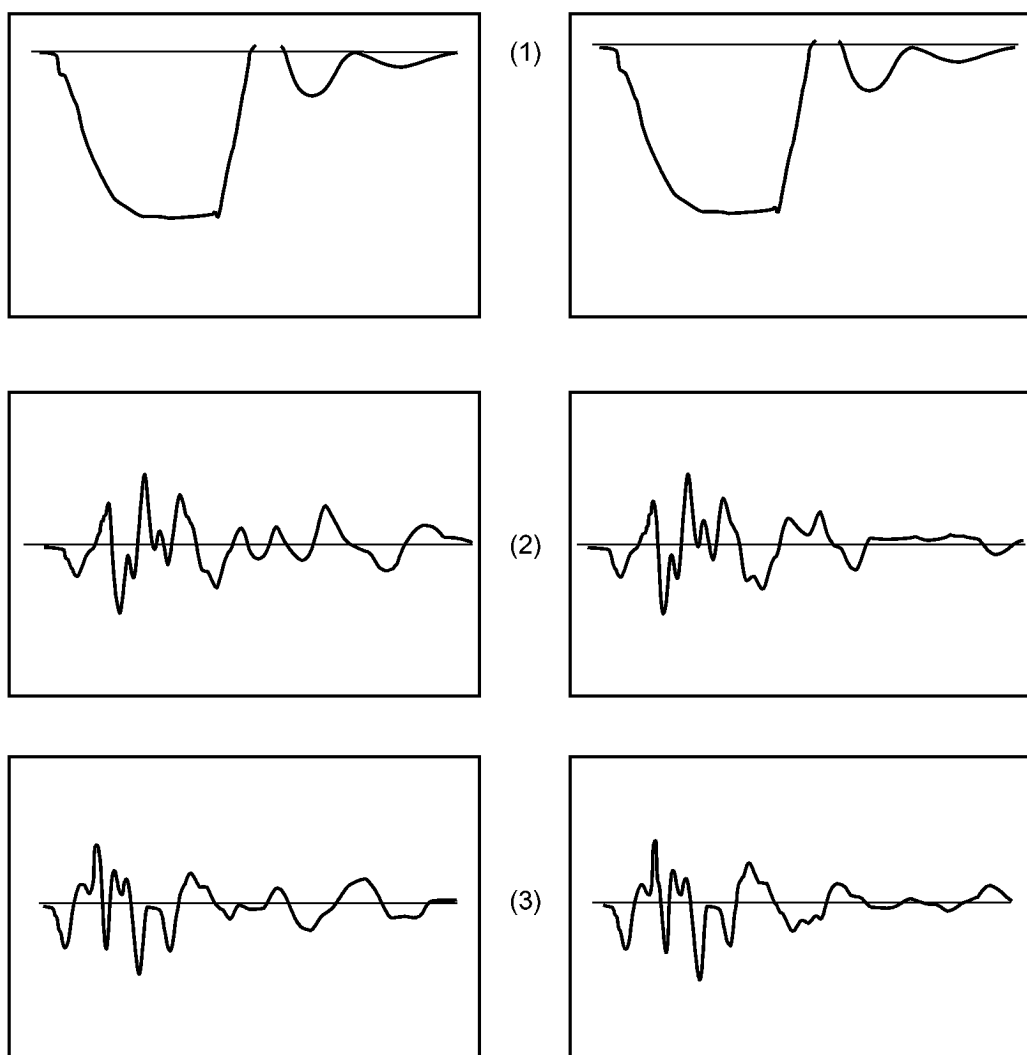
#### Légende

- 1 impulsion appliquée, balayage de 10  $\mu$ s
- 2 courant de neutre, balayage de 15  $\mu$ s

NOTE 1 Puisque la défaillance s'est produite avant l'instant de hachage, elle est considérée comme une défaillance pleine onde.

NOTE 2 Défaillance juste après la crête et avant l'instant de hachage indiquée par une chute de 10 % de l'onde de tension et par l'oscillogramme de courant de neutre.

**Figure B.7 – Impulsion de choc de foudre, défaillance pleine onde –  
Claquage entre clinquants de bague 66 kV sur l'enroulement essayé**



**Figure B.8a – Onde hachée réduite (60 %) sans défaut**

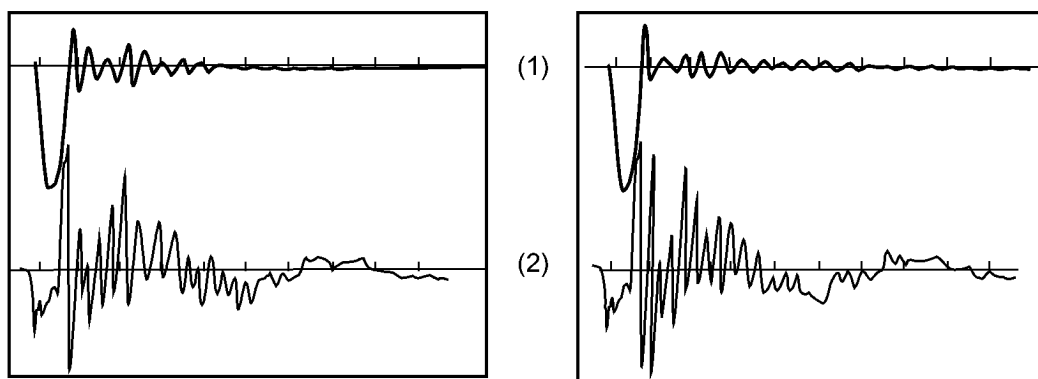
**Figure B.8b – Onde hachée (100 %) avec défaut**

**Légende**

- 1 impulsion appliquée, balayage de 10 µs
- 2 courant transféré par capacité de l'enroulement court-circuité, adjacent, à la terre, balayage de 50 µs
- 3 courant de neutre, balayage de 50 µs

NOTE Défaillance après 10 µs à 15 µs clairement indiquée par les oscillogrammes de courant transféré et de courant de neutre.

**Figure B.8 – Impulsion de choc de foudre, défaillance onde hachée –  
Claquage entre spires dans l'enroulement principal à haute tension  
d'un transformateur 115 kV**



**Figure B.9a – Onde hachée réduite (70 %) sans défaut**

**Figure B.9b – Onde hachée (115 %) avec défaut**

**Légende**

- 1 impulsion appliquée, onde hachée, balayage de 50  $\mu$ s
- 2 courant transféré par capacité de l'enroulement court-circuité, adjacent, à la terre, balayage de 50  $\mu$ s

NOTE Défaillance indiquée immédiatement après le hachage par les oscillogrammes de tension et de courant transféré par capacité

**Figure B.9 – Impulsion de choc de foudre, défaillance onde hachée –  
Claquage entre spires dans un enroulement à prises à pas fin  
d'un transformateur 220 kV**

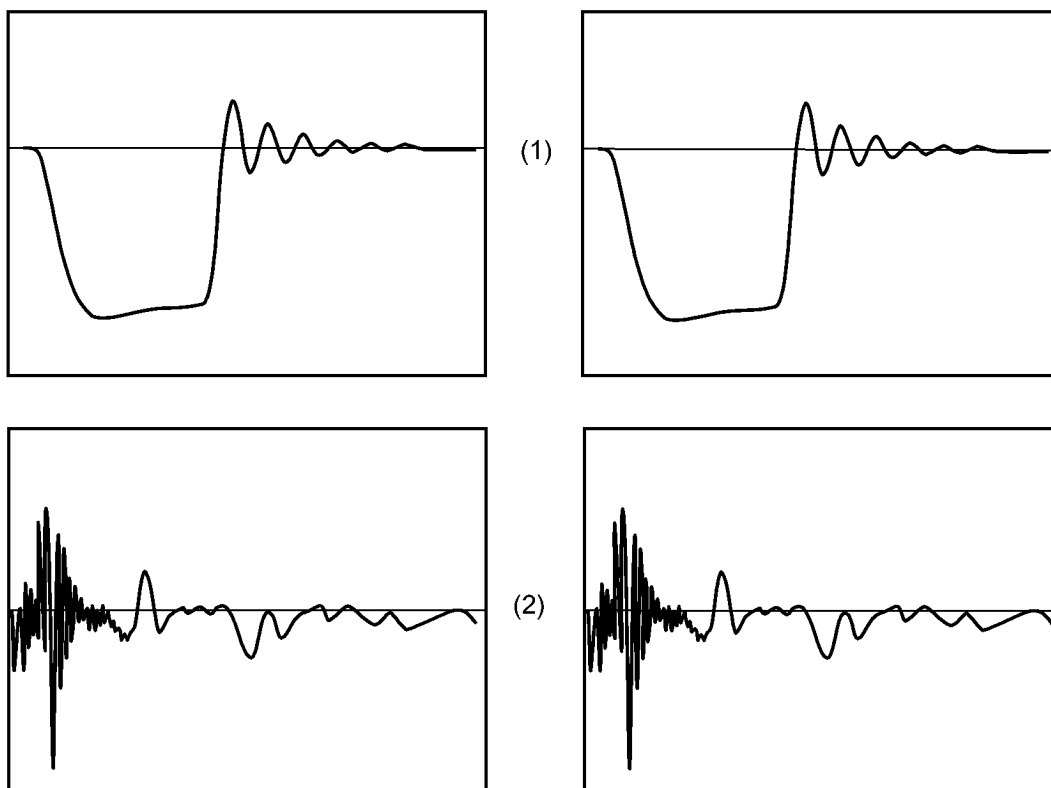


Figure B.10a – Onde hachée réduite (75 %)

Figure B.10b – Onde hachée (100 %)

#### Légende

- 1 impulsion appliquée, balayage de 10  $\mu$ s
- 2 courant de neutre, balayage de 100  $\mu$ s

NOTE Enregistrements de tension et de courant de neutre identiques, obtenus quand il n'y a aucune différence dans les temps de hachage

**Figure B.10 – Impulsion hachée de choc de foudre –  
Impulsions à différents niveaux de tension avec des temps de hachage identiques,  
lors des essais d'un transformateur 115 kV**

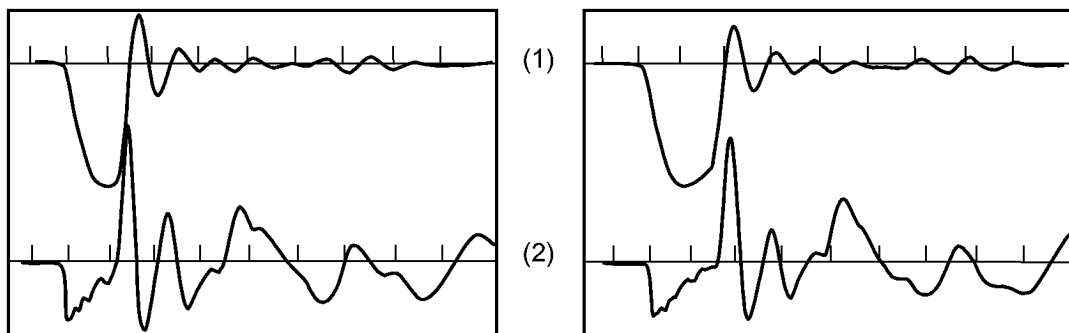


Figure B.11a – Onde hachée réduite (62,5 %)

Figure B.11b – Onde hachée (100 %)

NOTE Essais avec de grandes différences dans les temps de hachage (enroulement haute tension). Noter les changements dans les oscillations à haute fréquence superposées sur le courant transféré par capacité et les changements dans l'onde de tension après le hachage.

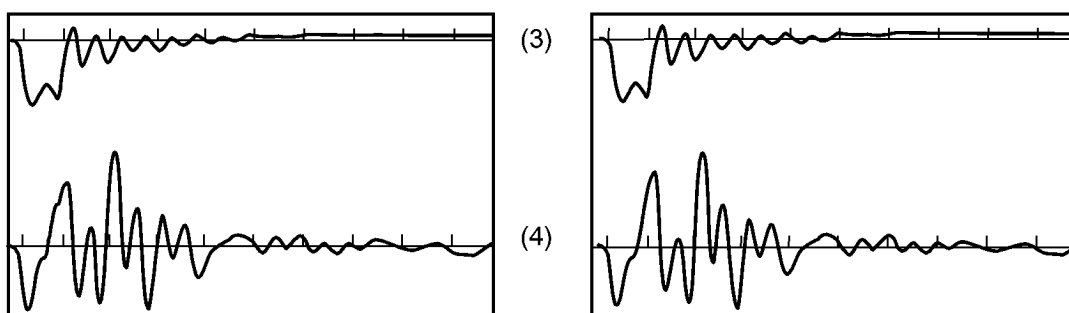


Figure B.11c – Onde hachée réduite (62,5 %)

Figure B.11d – Onde hachée (100 %)

NOTE Essais avec de petites différences dans les temps de hachage (enroulement basse tension). Noter les changements dans les oscillations à haute fréquence superposées sur le courant transféré par capacité, mais pratiquement pas de différence dans les ondes de tension.

#### Légende

- 1 impulsion appliquée, balayage de 25  $\mu$ s
- 2 courant transféré par capacité, balayage de 25  $\mu$ s
- 3 impulsion appliquée, balayage de 50  $\mu$ s
- 4 courant transféré par capacité, balayage de 50  $\mu$ s

**Figure B.11 – Impulsion hachée de choc de foudre –  
Effets des différences dans les temps de hachage lors des essais  
d'un transformateur 220 kV**

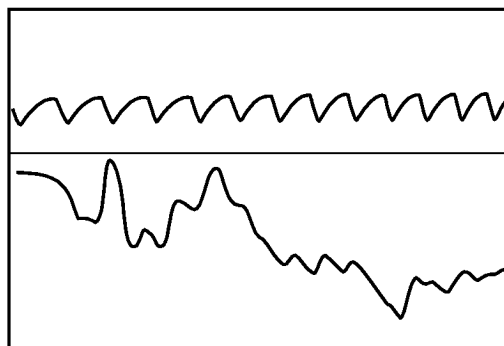


Figure B.12a – Pleine onde réduite (50 %)

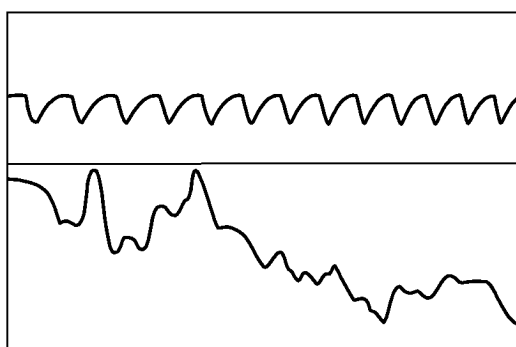


Figure B.12b – Pleine onde réduite (75 %)

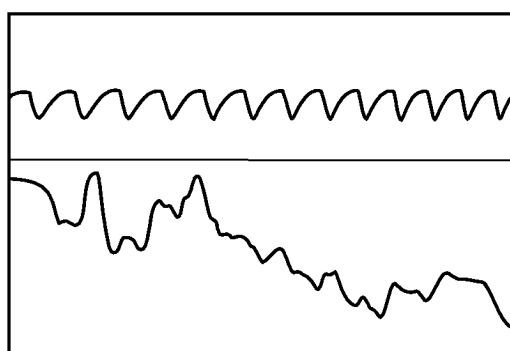


Figure B.12c – Pleine onde (100 %)

NOTE 1 Les trois oscillogrammes indiquent le courant de neutre, balayage de 75  $\mu$ s.

NOTE 2 Les modifications de la forme d'onde indiquées ci-dessus sont plus marquées que celles qui résultent généralement de la présence de résistances non linéaires.

**Figure B.12 – Pleine impulsion de choc de foudre – Effet des résistances non linéaires incorporées dans la sortie du neutre du changeur de prises en charge, d'un transformateur avec des enroulements séparés**

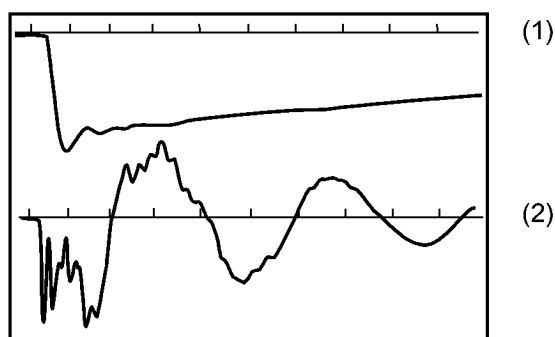


Figure B.13a – Pleine onde réduite (62,5 %)

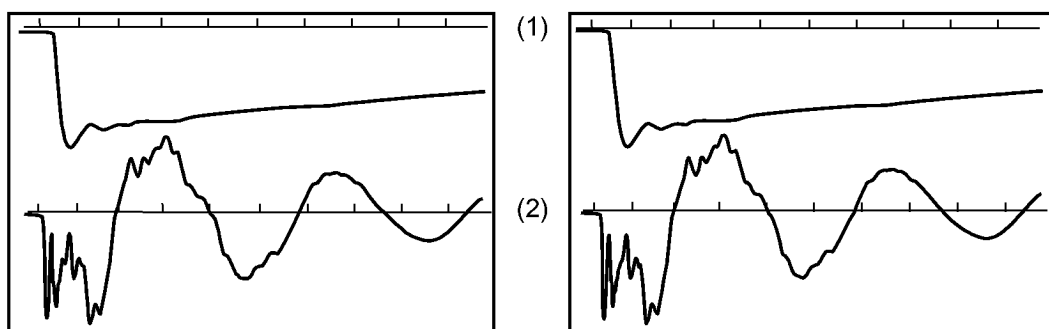


Figure B.13b – Première pleine onde (100 %)

Figure B.13c – Deuxième pleine onde (100 %)

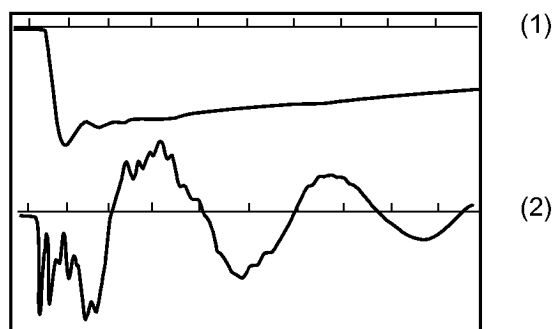


Figure B.13d – Pleine onde réduite finale (62,5 %)

#### Légende

- 1 impulsion appliquée, balayage de 50  $\mu$ s
- 2 courant transféré par capacité, balayage de 50  $\mu$ s

NOTE La comparaison des enregistrements de courant transféré par capacité pour le niveau de 100 % de tension avec ceux pour le niveau de 62,5 % de tension montre des modifications initiales à haute fréquence.

**Figure B.13 – Pleine impulsion de choc de foudre –  
Effet des différences de démarrage des étages du générateur à différents niveaux  
de tension, lors des essais d'un transformateur 400 kV**



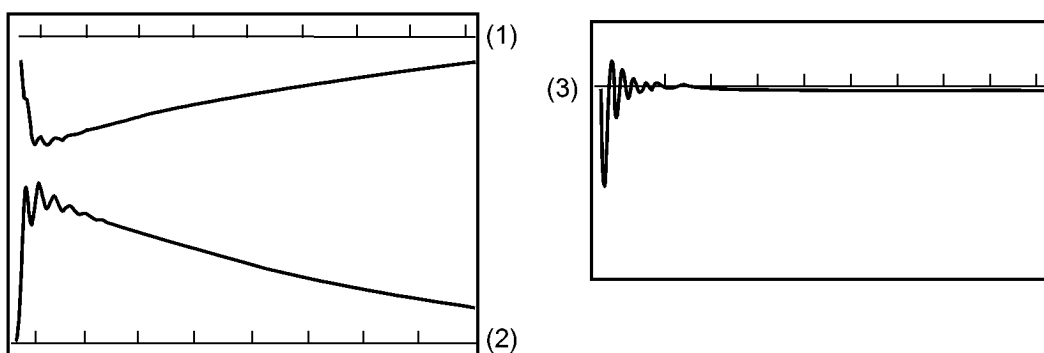


Figure B.14a – Niveau d'essai 62,5 %

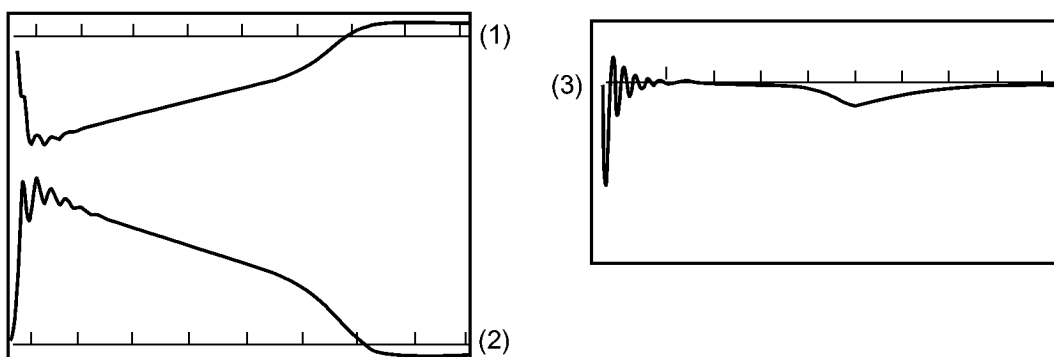


Figure B.14b – Premier niveau d'essai 100 %

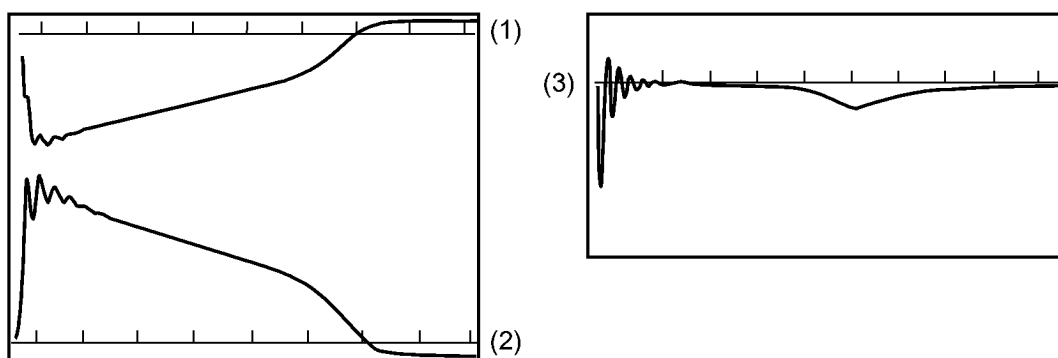
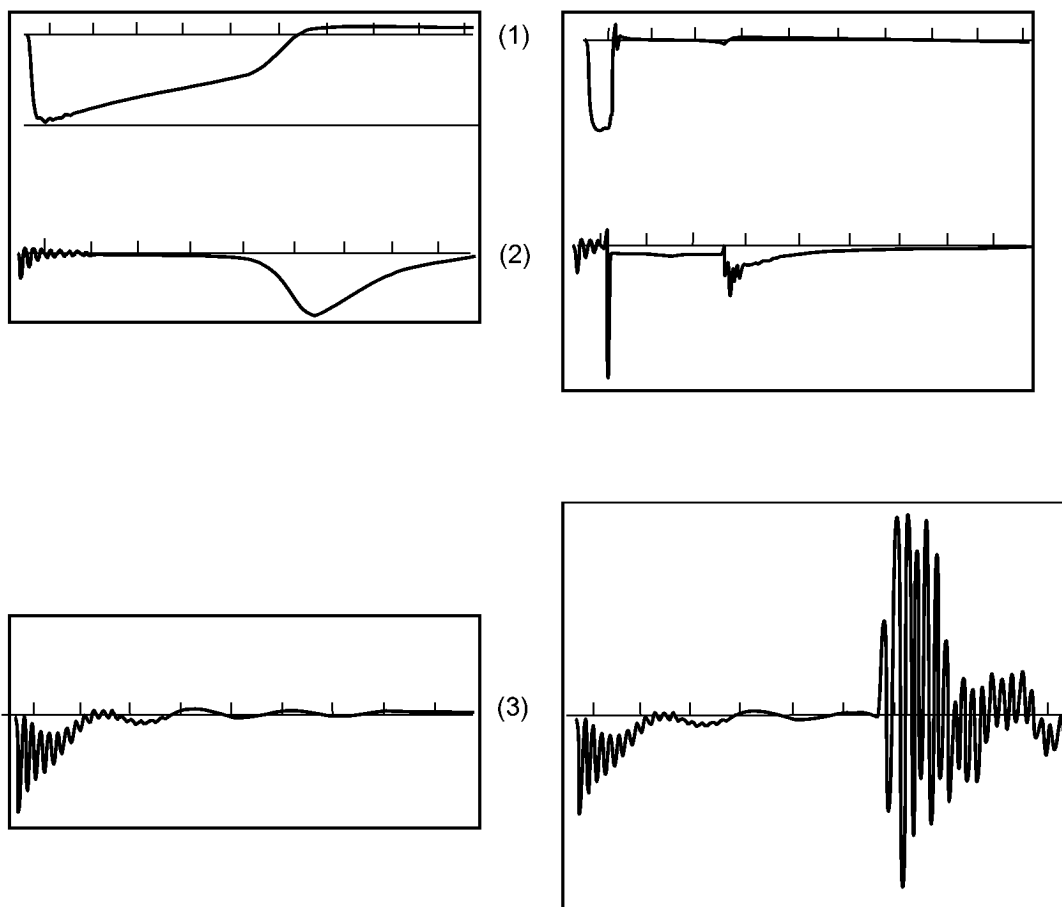


Figure B.14c – Deuxième niveau d'essai 100 %

#### Légende

- 1 impulsion de choc de manœuvre appliquée, balayage de 5 000  $\mu$ s
- 2 tension d'impulsion de choc de manœuvre induite entre les bornes interconnectées de l'enroulement de la phase non essayée et la terre (52 % de la tension appliquée, polarité positive), balayage de 5 000  $\mu$ s
- 3 courant de neutre, balayage de 5 000  $\mu$ s

**Figure B.14 – Impulsion de choc de manœuvre –  
Essai satisfaisant sur un transformateur de centrale triphasé 400 kV**



**Figure B.15a – Niveau d'essai 90 %  
sans défaut**

**Figure B.15b – Niveau d'essai 100 %  
avec défaut**

**Légende**

- 1 impulsion de choc de manœuvre appliquée, balayage de 5 000  $\mu$ s
- 2 courant de neutre, balayage de 5 000  $\mu$ s
- 3 courant de neutre, balayage de 500  $\mu$ s

NOTE Défaillance indiquée approximativement à 300  $\mu$ s à 100 % de niveau d'essai.

**Figure B.15 – Impulsion de choc de manœuvre –  
Claquage par amorçage axial de l'enroulement principal à haute tension  
d'un transformateur de centrale monophasé 525 kV**

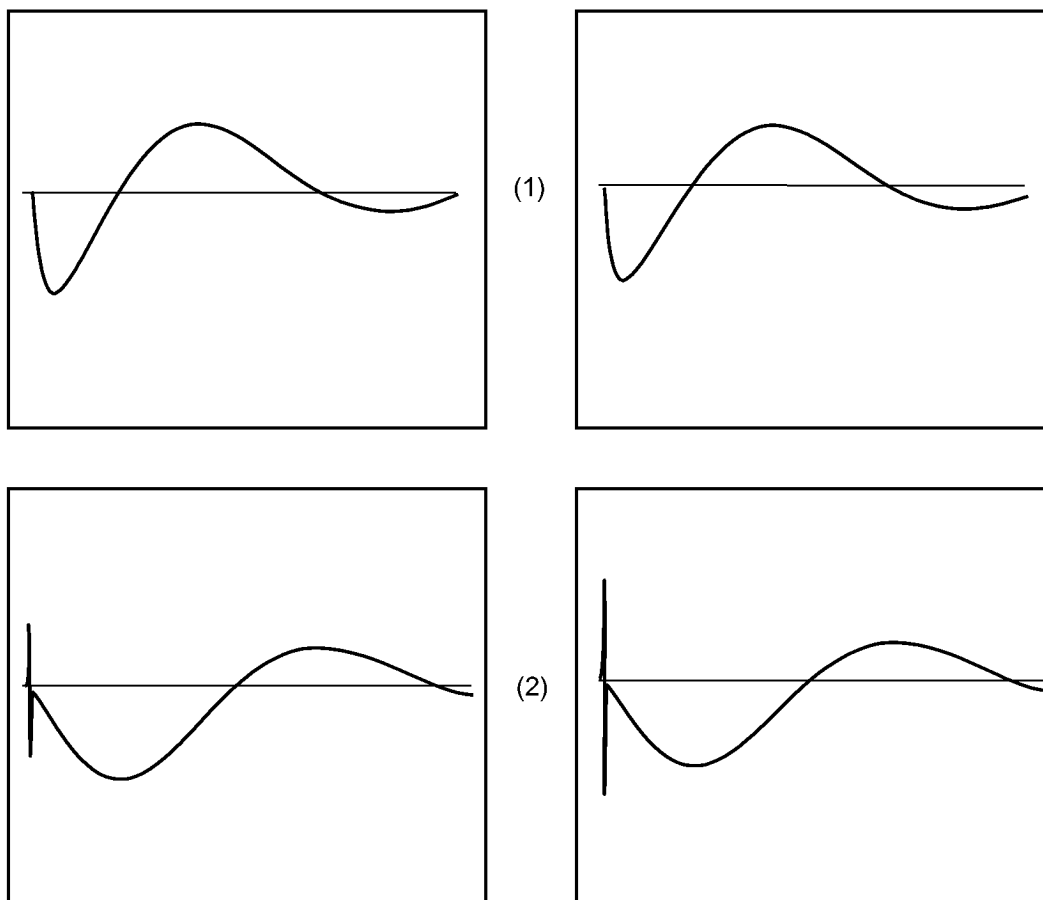


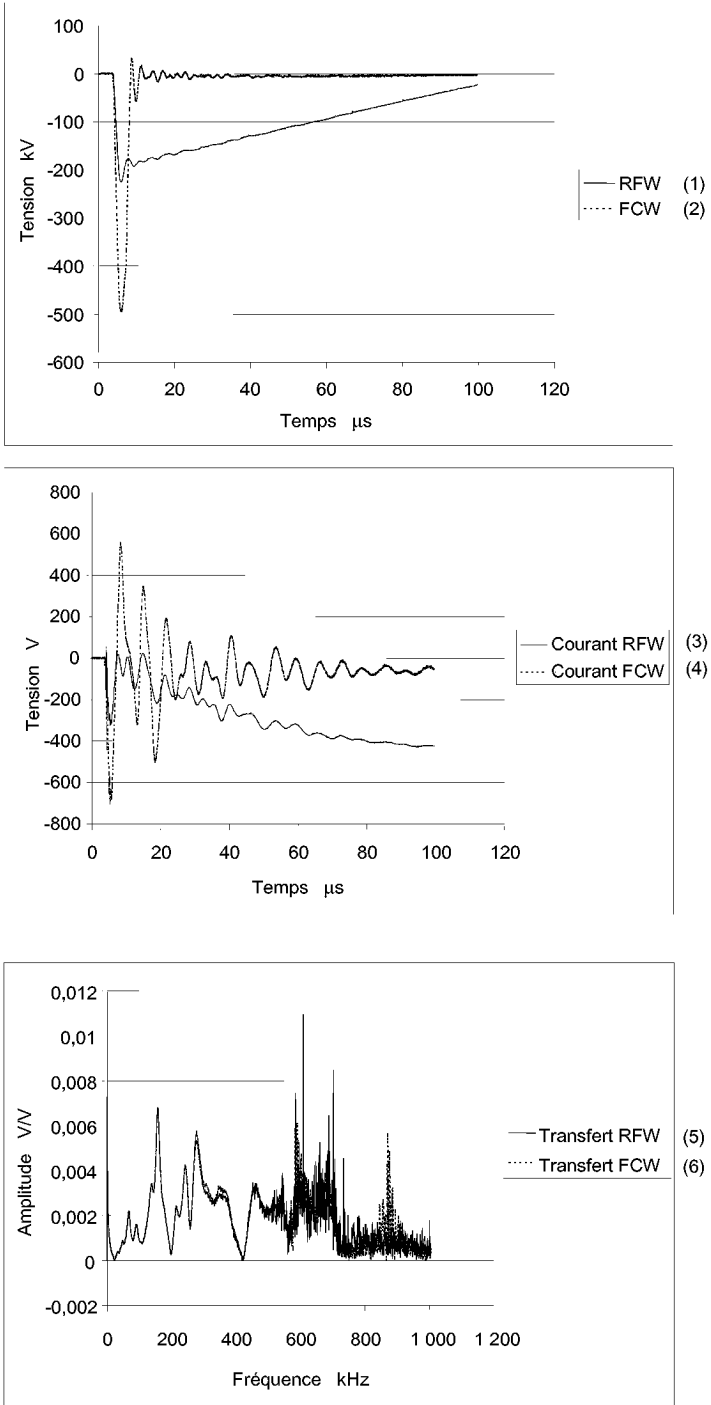
Figure B.16a – Niveau d'essai réduit (60 %)

Figure B.16b – Niveau d'essai (100 %)

**Légende**

- 1 impulsion appliquée, balayage de 5 000  $\mu$ s ( $T_1$  200  $\mu$ s,  $T_d$  225  $\mu$ s,  $T_z$  1 000  $\mu$ s)
- 2 courant de neutre, balayage de 5 000  $\mu$ s

**Figure B.16 – Impulsion de choc de manœuvre –  
Essai satisfaisant sur une bobine d'inductance monophasée 525 kV, 33 Mvar**



NOTE Comparaison d'une impulsion de choc de foudre pleine onde réduite (RFW) et d'une pleine onde hachée (FCW) sur la même borne du même transformateur. Du fait que l'onde hachée contient plus d'entrées à haute fréquence pour la fonction de transfert d'admittance, les écarts entre les fonctions de transfert RFW et FCW ont lieu uniquement aux hautes fréquences.

**Légende**

- |   |                         |   |  |
|---|-------------------------|---|--|
| 1 | pleine onde réduite RFW | 4 | courant de neutre à FCW                  |
| 2 | pleine onde hachée FCW  | 5 | fonction de transfert (admittance) à RFW |
| 3 | courant de neutre à RFW | 6 | fonction de transfert (admittance) à FCW |

**Figure B.17 – Impulsion de choc de manœuvre –  
Comparaison de la fonction de transfert d'une pleine onde et d'une onde hachée**



Figure B.18a – Tension appliquée

Figure B.18b – Courant de neutre

NOTE Onde avec 19 % de dépassement évaluée par la tangente le long de la décroissance de traîne selon la CEI 60060-1, conduisant à une erreur de plus de 10 % de l'évaluation de l'amplitude.

**Figure B.18 – Pleine impulsion de choc de foudre –  
Évaluation d'une forme d'onde non normalisée –  
Influence des algorithmes de lissage intégrés dans les numériseurs**

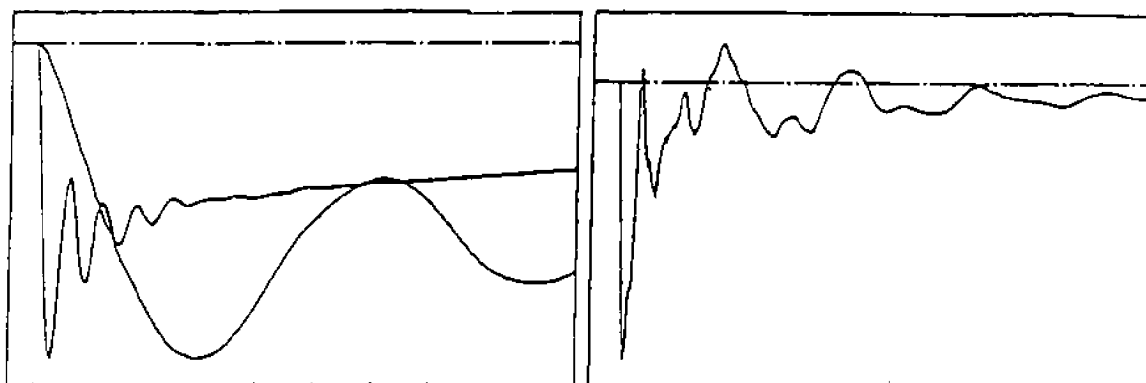
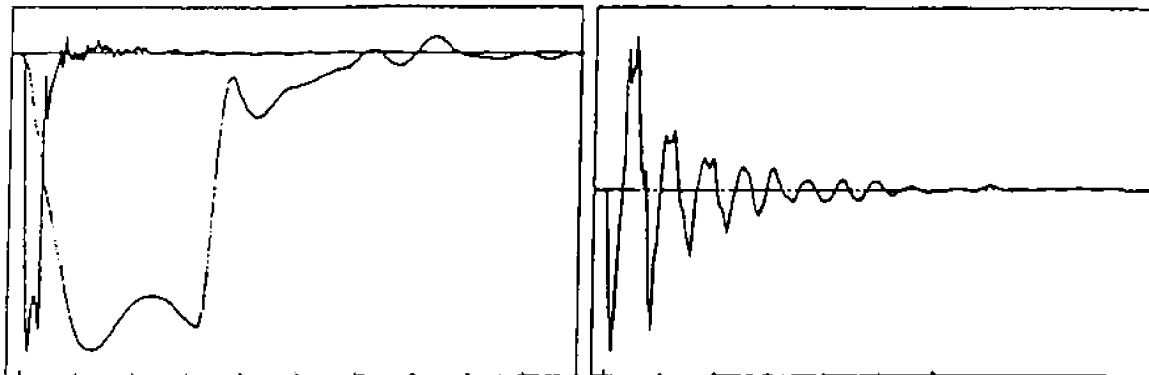


Figure B.19a – Tension appliquée

Figure B.19b – Courant de neutre

NOTE Le numériseur évalue le temps à demi-valeur comme étant de 5  $\mu$ s, en se basant sur le premier passage de l'oscillation superposée, tandis que l'évaluation selon la CEI 60060-1 fait apparaître 50  $\mu$ s.

**Figure B.19 – Pleine impulsion de choc de foudre –  
Forme d'onde non normalisée, oscillations superposées  
avec amplitude >50 % et fréquence <0,5 MHz**



**Figure B.20a – Tension appliquée**

**Figure B.20b – Courant de neutre**

NOTE Onde hachée non normalisée sur un enroulement de type couche. L'impédance de couche évite la chute rapide et les oscillations autour de zéro de l'onde hachée vers la terre.

**Figure B.20 – Impulsion hachée de choc de foudre –  
Onde hachée non normalisée sur un enroulement de type couche**

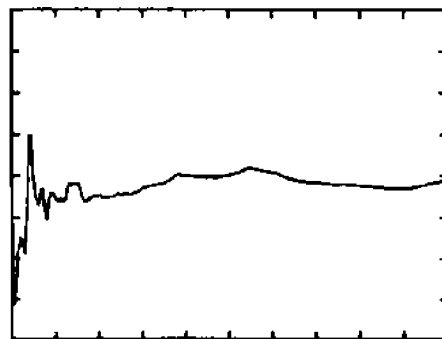
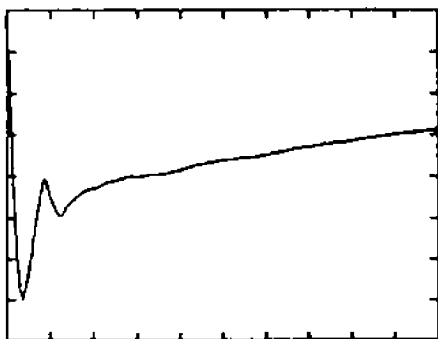
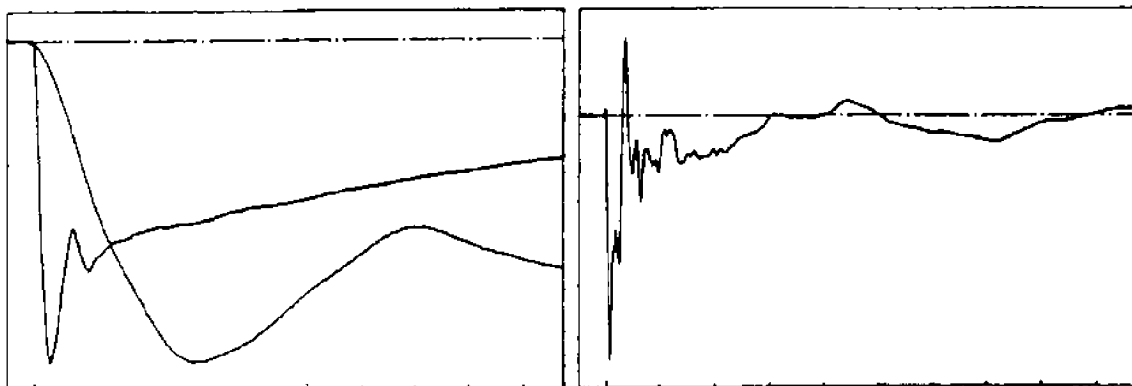
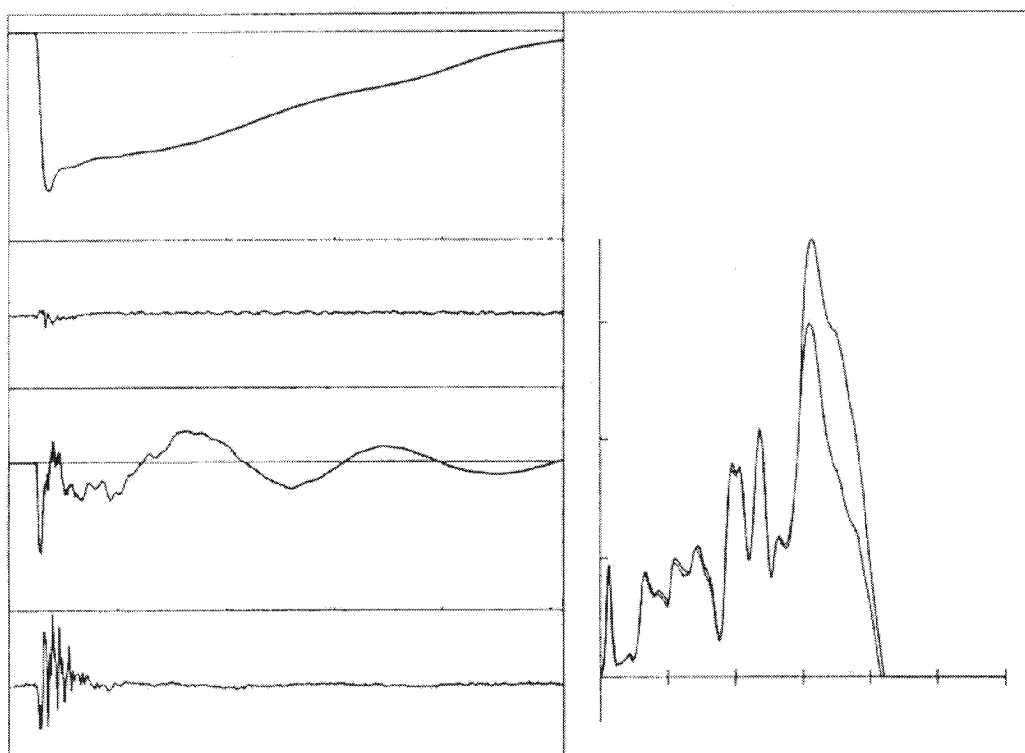


Figure B.21a – Tension appliquée

Figure B.21b – Courant de neutre

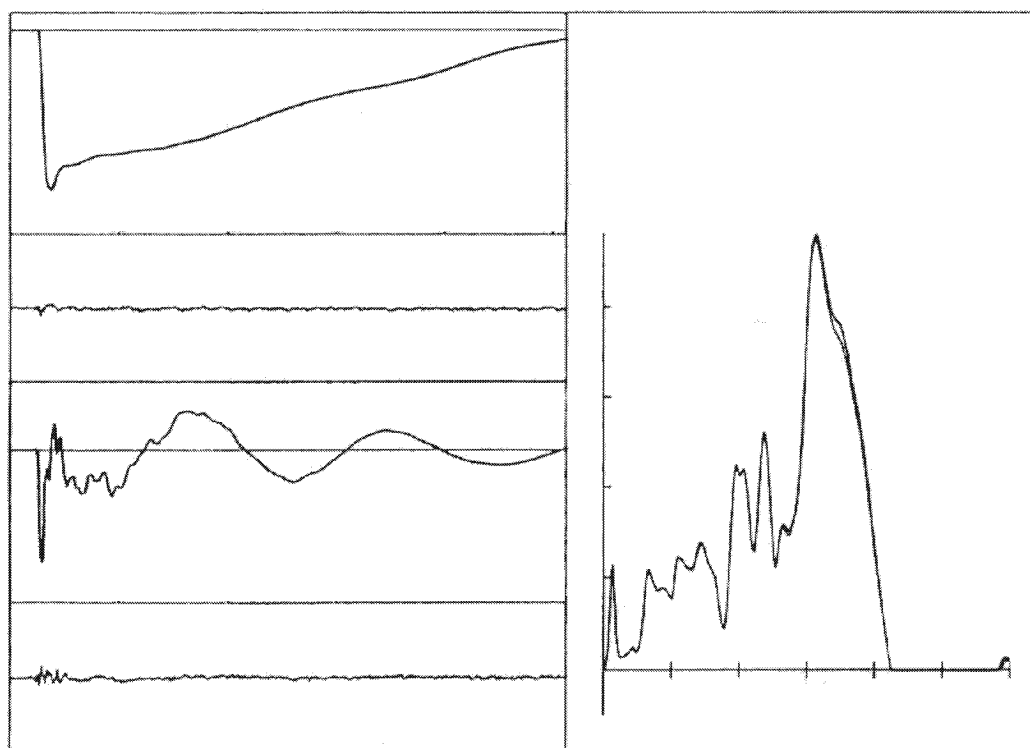
**Figure B.21 – Pleine impulsion de choc de foudre –**  
**Forme d'onde non normalisée, comparaison de formes d'onde non normalisées**  
**avec des numériseurs de différentes fabrications à partir du même enregistrement**



NOTE Amorçage du câble de mesure de l'enroulement BT à différentes terres que la terre de cuve et de générateur. 400 MVA G.S.U. 220/21 kV à l'essai HT.

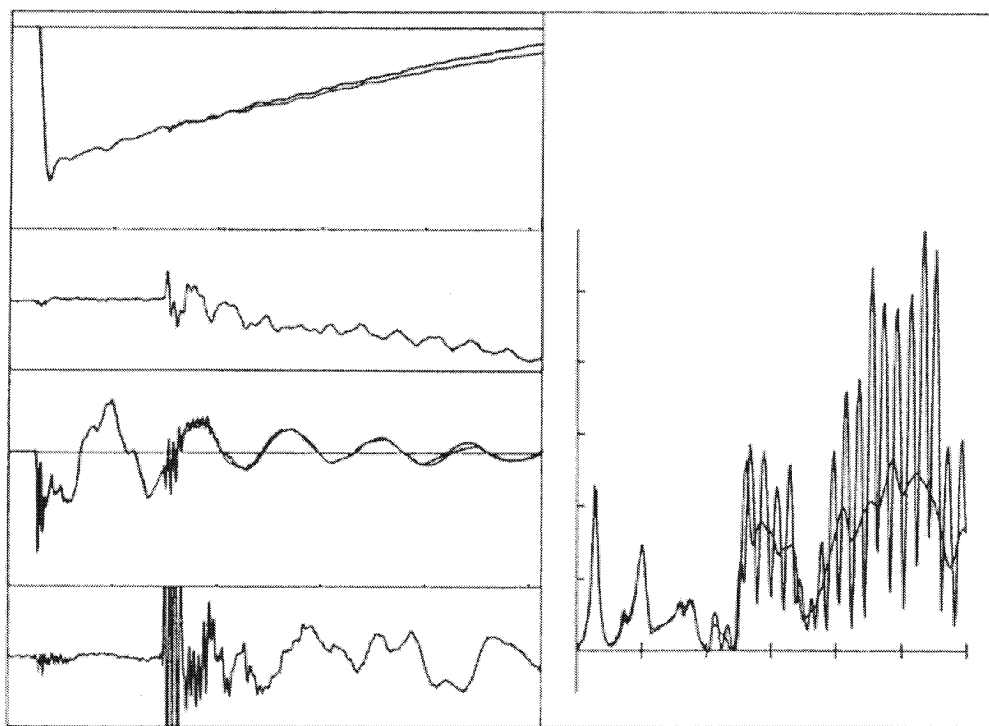
**Figure B.22a – Pas d'indication en tension; indication claire en courant ;  
indication claire en fonction de transfert**



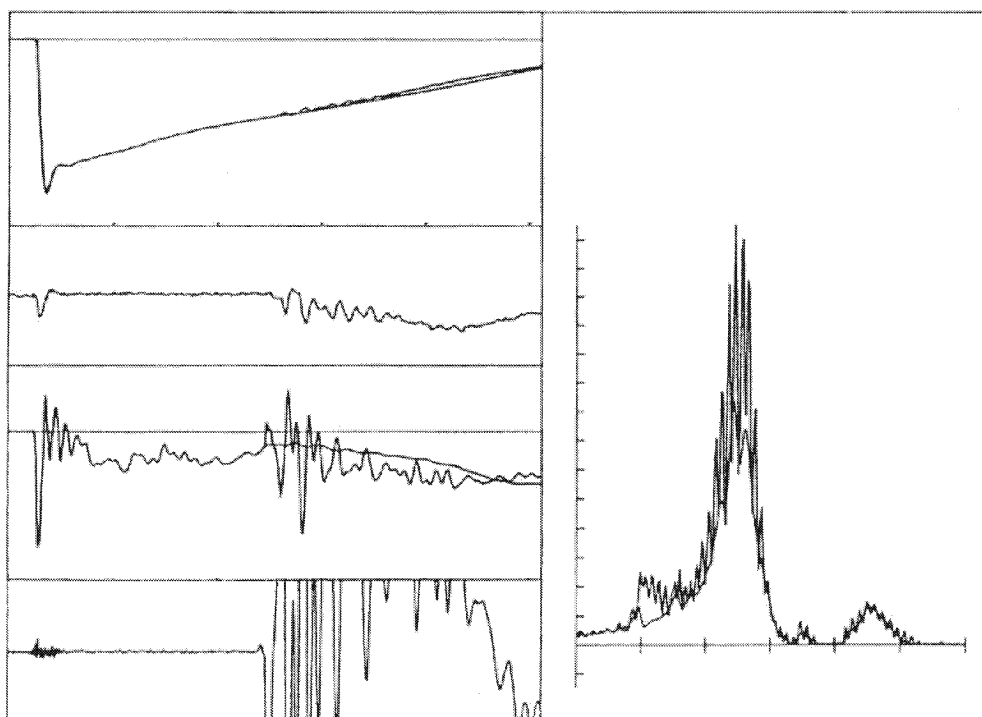


**Figure B.22b – Après correction, correspondance parfaite de tous les tracés en temps réel et de la fonction de transfert**

**Figure B.22 – Pleine impulsion de choc de foudre – Problème de circuit d'essai provoqué par un amorçage à la terre d'un câble de mesure**



**Figure 23a – Amorçage de fil de changeur de prises  
entre les prises d'un transformateur 400/110/30 kV, 300 MVA**



**Figure 23b – Amorçage entre enroulements des pas grossier et fin**

NOTE Modifications importantes dans la réponse en temps réel et dans la fonction de transfert.

**Figure B.23 – Pleine impulsion de choc de foudre –  
Oscillogramme de défaillance montrant un amorçage de fil de changeur de prises  
entre prises et un amorçage entre enroulements des pas grossier et fin**

-----

## Annexe ZA (normative)

### Références normatives à d'autres publications internationales avec les publications européennes correspondantes

Cette Norme européenne comporte par référence datée ou non datée des dispositions d'autres publications. Ces références normatives sont citées aux endroits appropriés dans le texte et les publications sont énumérées ci-après. Pour les références datées, les amendements ou révisions ultérieurs de l'une quelconque de ces publications ne s'appliquent à cette Norme européenne que s'ils y ont été incorporés par amendement ou révision. Pour les références non datées, la dernière édition de la publication à laquelle il est fait référence s'applique (y compris les amendements).

NOTE Dans le cas où une publication internationale est modifiée par des modifications communes, indiqué par (mod), il faut tenir compte de la EN / du HD approprié(e).

<u>Publication</u>	<u>Année</u>	<u>Titre</u>	<u>EN/HD</u>	<u>Année</u>
CEI 60060-1	- <sup>1)</sup>	Techniques des essais à haute tension Partie 1 : Définitions et prescriptions générales relatives aux essais	HD 588.1 S1	1991 <sup>2)</sup>
CEI 60060-2	- <sup>1)</sup>	Partie 2 : Systèmes de mesure	EN 60060-2	1994 <sup>2)</sup>
CEI 60076-3	- <sup>1)</sup>	Transformateurs de puissance Partie 3 : Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement dans l'air	EN 60076-3	2001 <sup>2)</sup>
CEI 60289	- <sup>1)</sup>	Bobines d'inductance	EN 60289	1994 <sup>2)</sup>
CEI 61083-1	- <sup>1)</sup>	Appareils et logiciels utilisés pour les mesures pendant les essais de choc à haute tension Partie 1 : Prescriptions pour les appareils	EN 61083-1	2001 <sup>2)</sup>
CEI 61083-2	- <sup>1)</sup>	Enregistreurs numériques pour les mesures pendant les essais de choc à haute tension Partie 2 : Evaluation du logiciel utilisé pour obtenir les paramètres des formes d'onde de choc	EN 61083-2	1997 <sup>2)</sup>

---

<sup>1)</sup> Référence non datée.

<sup>2)</sup> Edition valide à ce jour.