

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

(affiliée à l'Organisation Internationale de Normalisation — ISO)

RECOMMANDATION DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

IEC RECOMMENDATION

Publication 99-1A

Première édition — First edition

1965

Complément à la Publication 99-1 (1958)

Recommandations pour les parafoudres

Première partie: Parafoudres à résistance variable

Supplement to Publication 99-1 (1958)

Recommendations for lightning arresters

Part 1: Non-linear resistor-type arresters



Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varembé
Genève, Suisse

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60099-1A:1965

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

(affiliée à l'Organisation Internationale de Normalisation — ISO)

RECOMMANDATION DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

IEC RECOMMENDATION

Publication 99-1A

Première édition — First edition

1965

Complément à la Publication 99-1 (1958)

Recommandations pour les parafoudres

Première partie: Parafoudres à résistance variable

Supplement to Publication 99-1 (1958)

Recommendations for lightning arresters

Part 1: Non-linear resistor-type arresters



Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varembe

Genève, Suisse

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
Articles	
1. Objet	6
2. Généralités sur l'utilisation des parafoudres	6
3. Marche à suivre pour la protection des transformateurs de puissance et du matériel des installations électriques	8
3.1 Déterminer la tension maximale entre phase et terre à la fréquence de service à l'emplacement du parafoudre	8
3.2 Evaluer l'amplitude et la forme d'onde du courant de décharge à travers le parafoudre	10
3.3 Déterminer la tenue aux ondes de choc de l'installation à protéger	12
3.4 Choisir provisoirement le parafoudre	14
3.5 Déterminer le niveau de protection aux ondes de choc du parafoudre choisi provisoirement	18
3.6 Coordonner le niveau de protection du parafoudre avec le niveau de tenue aux ondes de choc de l'isolation à protéger	18
4. Protection des autres matériels	30
4.1 Protection des enroulements série des matériels tels que transformateurs survolteurs-dévolteurs, réactances, transformateurs de courant, etc.	30
4.2 Protection du matériel à isolation solide	30
5. Surtensions de manœuvre susceptibles d'entraîner le fonctionnement du parafoudre	32
5.1 Classification d'après la cause des surtensions de manœuvre	32
5.2 Classification des types de décharge à travers le parafoudre	34
6. Définitions nouvelles	36
6.1 Niveau de protection aux ondes de choc d'un parafoudre	36
6.2 Niveau de protection nominal aux ondes de choc d'un parafoudre	36
6.3 Rapport de protection	36

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
Clause	
1. Object	7
2. General procedure in applying lightning arresters	7
3. Step-by-step procedure for protection of power transformers and station equipment	9
3.1 Determine the maximum phase-to-earth power-frequency voltage at the arrester location	9
3.2 Estimate the magnitude and wave-shape of arrester discharge current	11
3.3 Determine the withstand strength of the insulation to be protected	13
3.4 Tentatively select arresters	15
3.5 Determine the impulse protective level for the tentatively selected arrester	19
3.6 Co-ordinate the arrester protective level with the impulse withstand strength of the insulation to be protected	19
4. Protection of other equipment	31
4.1 Protection of series windings of equipment such as booster transformers, reactors, current transformers and so forth	31
4.2 Protection of dry-type insulated equipment	31
5. Switching surges liable to cause operation of the arrester	33
5.1 Classification by cause of switching surges	33
5.2 Classification by type of discharge through arrester	35
6. New definitions	37
6.1 Impulse protective level of an arrester	37
6.2 Rated impulse protective level of an arrester	37
6.3 Protective ratio	37

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

COMPLÈMENT A LA PUBLICATION 99-1 (1958)

RECOMMANDATIONS POUR LES PARAFOUDRES

Première partie: Parafoudres à résistance variable

Guide d'application des parafoudres à résistance variable utilisés sur les réseaux à courant alternatif

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la C E I en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager cette unification internationale, la C E I exprime le vœu que tous les Comités nationaux ne possédant pas encore de règles nationales, lorsqu'ils préparent ces règles, prennent comme base fondamentale de ces règles les recommandations de la C E I dans la mesure où les conditions nationales le permettent.
- 4) On reconnaît qu'il est désirable que l'accord international sur ces questions soit suivi d'un effort pour harmoniser les règles nationales de normalisation avec ces recommandations dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Les Comités nationaux s'engagent à user de leur influence dans ce but.

PRÉFACE

La présente recommandation a été établie par le Comité d'Etudes N° 37 de la C E I: Parafoudres.

Elle constitue le premier complément à la Publication 99-1 de la C E I: Recommandations pour les parafoudres; première partie: Parafoudres à résistance variable.

Elle contient le texte de l'Annexe C: Guide d'application des parafoudres du type à résistance non linéaire utilisés sur les réseaux à courant alternatif.

Un projet fut élaboré par un Comité d'experts et discuté lors des réunions tenues à Interlaken en 1961 et à Bucarest en 1962. A la suite de cette dernière réunion, un projet fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en décembre 1962.

Les pays suivants se sont explicitement prononcés en faveur de la publication de ce complément:

Allemagne	Norvège
Australie	Pays-Bas
Belgique	Royaume-Uni
Canada	Suède
Danemark	Suisse
Etats-Unis d'Amérique	Tchécoslovaquie
Finlande	Turquie
France	Union des Républiques
Hongrie	Socialistes Soviétiques
Japon	

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SUPPLEMENT TO PUBLICATION 99-1 (1958)

RECOMMENDATIONS FOR LIGHTNING ARRESTERS

Part 1: Non-linear resistor-type arresters

Application guide of non-linear resistor-type lightning arresters for alternating current systems

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the I E C on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote this international unification, the I E C expresses the wish that all National Committees having as yet no national rules, when preparing such rules, should use the I E C recommendations as the fundamental basis for these rules in so far as national conditions will permit.
- 4) The desirability is recognized of extending international agreement on these matters through an endeavour to harmonize national standardization rules with these recommendations in so far as national conditions will permit. The National Committees pledge their influence towards that end.

PREFACE

This Recommendation was prepared by I E C Technical Committee No. 37, Lightning Arresters.

It forms the first supplement to I E C Publication 99-1, Recommendations for Lightning Arresters; Part 1, Non-linear Resistor-type Arresters.

It gives the text of Appendix C, Application guide of non-linear resistor-type lightning arresters for alternating current systems.

A draft was prepared by a Committee of Experts and was discussed at the meetings held in Interlaken in 1961 and in Bucharest in 1962. As a result of this latter meeting, a draft was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in December 1962.

The following countries voted explicitly in favour of publication of this Supplement:

Australia	Netherlands
Belgium	Norway
Canada	Sweden
Czechoslovakia	Switzerland
Denmark	Turkey
Finland	Union of Soviet
France	Socialist Republics
Germany	United Kingdom
Hungary	United States of America
Japan	

COMPLÉMENT A LA PUBLICATION 99-1 (1958)

RECOMMANDATIONS POUR LES PARAFOUDRES

Première partie: Parafoudres à résistance variable

Guide d'application des parafoudres à résistance variable utilisés sur les réseaux à courant alternatif

1. Objet

Le présent guide concerne l'application des parafoudres à résistance variable à la protection des appareils contre les risques des tensions anormales de diverses natures. De telles surtensions peuvent provoquer des amorçages et causer de sérieux dommages au matériel et compromettre ainsi la fourniture d'énergie aux consommateurs. Il importe d'éliminer ces risques par une coordination appropriée des dispositifs de protection et de la rigidité diélectrique de l'isolation.

Il s'agit là d'un sujet étendu, comportant de nombreuses ramifications et il faudrait un gros volume pour contenir les explications détaillées de tous les cas possibles. Il n'est pas proposé de traiter ce sujet de cette manière dans le présent guide, mais de discuter les cas les plus essentiels et de fournir le moyen d'avancer pas à pas dans la recherche de solutions convenables et économiques. Dans quelques cas, l'expérience ou les techniques préexistantes fournissent suffisamment de renseignements pour franchir certains de ces pas sans autre examen. Les cas plus complexes rencontrés dans des installations importantes auxquelles sont reliés un grand nombre de lignes ou de câbles, méritent sans aucun doute une étude spéciale par des ingénieurs expérimentés.

Dans l'état actuel de l'art, une protection totale contre les dommages résultant des surtensions peut se révéler extrêmement coûteuse, et son emploi peut ne pas être de bonne pratique, du point de vue de l'art de l'ingénieur. On recommande des manières de procéder dont on attend des solutions sûres pouvant être économiquement justifiées. Ces manières de procéder reposent sur des études théoriques, des résultats d'essais et l'expérience.

On obtiendra des renseignements complémentaires en se reportant à la Publication 71A de la C.E.I.: Recommandations pour la coordination de l'isolement -- Guide d'application.

2. Généralités sur l'utilisation des parafoudres

Ce guide présuppose que les bornes de terre du parafoudre sont reliées aux parties mises à la terre du matériel, et de plus que les connexions qui relient le parafoudre à la ligne et à la terre sont aussi courtes que possible.

La marche à suivre pour déterminer le choix et l'emplacement des parafoudres, en relation avec l'isolation à protéger, peut être réduite à une série d'opérations qui sont décrites dans les paragraphes ci-dessous:

- a) déterminer la tension maximale entre phase et terre à la fréquence de service à l'emplacement du parafoudre;
- b) évaluer l'amplitude et la forme d'onde du courant de décharge le plus sévère à travers le parafoudre;
- c) déterminer la tenue aux ondes de choc de l'isolation à protéger, en tenant compte de la décroissance de l'isolation de l'air avec l'augmentation de l'altitude;

SUPPLEMENT TO PUBLICATION 99-1 (1958)

RECOMMENDATIONS FOR LIGHTNING ARRESTERS

Part 1: Non-linear resistor-type arresters

Application guide of non-linear resistor-type lightning arresters for alternating current systems

1. Object

This guide covers the application of non-linear resistor-type lightning arresters to safeguard apparatus against the hazards of abnormal voltages of various kinds. Such overvoltages may cause flashovers and serious damage to equipment and thereby jeopardize the supply of power to users. It is essential to prevent this by the proper co-ordination of protective devices with insulation strength.

The subject is a broad one with many ramifications and it would require a volume of considerable bulk to explain all possible cases in detail. It is not proposed to do this in this guide, but the more basic cases are discussed and step-by-step direction toward proper and economical solutions are provided. In some cases, experience or predetermined practices give sufficient information for some of these steps to be performed without further consideration. The more complex cases of some installations, to which a number of lines or cables are connected, no doubt merit special study by experienced engineers.

In the present state of the art, complete protection against damage from overvoltage may prove to be extremely costly and it may not be good engineering practice to provide it. Procedures are recommended which are expected to provide conservative solutions that can be justified economically. These procedures are based on theoretical studies, the results of tests, and experience.

For supplementary information see IEC Publication 71A, Recommendations for Insulation Coordination – Application Guide.

2. General procedure in applying lightning arresters

This guide presumes that lightning arrester earth terminals are interconnected with earthed parts of equipment, also that both line and earth connections of the arrester are as short as is practicable.

The procedure for the selection and location of arresters in relation to the insulation to be protected can be reduced to a series of steps, which are elaborated in subsequent paragraphs:

- a) determine the maximum phase-to-earth power-frequency voltage at the arrester location;
- b) estimate the magnitude and wave-shape of the most severe arrester discharge current;
- c) determine the impulse withstand strength of the insulation to be protected, bearing in mind that air insulation decreases with increasing altitude;

- d) choisir provisoirement la tension nominale et la classe du parafoudre;
- e) déterminer le niveau de protection aux ondes de choc;
- f) placer le parafoudre aussi près que possible de l'appareil à protéger sans perdre de vue que la proximité d'objets mis à la terre et la hauteur du parafoudre, au-dessus du sol peuvent avoir une influence défavorable sur les caractéristiques d'amorçage du parafoudre, notamment aux très hautes tensions;
- g) déterminer la tension sur l'isolation à protéger, telle qu'elle sera limitée par le parafoudre, en tenant compte de la distance qui les sépare et des autres facteurs propres au point d'utilisation;
- h) si les opérations c) ou g) indiquent que le parafoudre choisi ne convient pas, il peut être nécessaire de choisir un parafoudre ayant d'autres caractéristiques nominales ou appartenant à une autre classe, ou bien s'il s'agit d'équiper un poste entièrement nouveau, d'augmenter le niveau d'isolement du matériel à protéger.

3. Marche à suivre pour la protection des transformateurs de puissance et du matériel des installations électriques.

(Pour le cas spécial des transformateurs de puissance de type sec, voir paragraphe 4.2.1.)

3.1 Déterminer la tension maximale entre phase et terre à la fréquence de service à l'emplacement du parafoudre

3.1.1 En multipliant la tension la plus élevée du réseau par le coefficient de mise à la terre à l'endroit du réseau où est installé le parafoudre (article 17 de la Publication 99-1). La valeur du coefficient de mise à la terre peut être estimée d'après les courbes de la figure 1. L'expérience montre qu'en ce qui concerne l'utilisation des parafoudres, les coefficients de mise à la terre peuvent être classés en un nombre limité de groupes.

- a) *Le coefficient de mise à la terre n'excède pas 80% (réseau effectivement mis à la terre)*
Une valeur ne dépassant pas 80% est obtenue à l'emplacement du parafoudre lorsque, pour toutes les conditions du réseau, le rapport de la réactance homopolaire à la réactance directe (X_0/X_1) est compris entre 0 et +3, et le rapport de la résistance homopolaire à la réactance directe (R_0/X_1) est compris entre 0 et +1. En cet endroit, le réseau est considéré comme étant effectivement à la terre.

Notes 1. — Sur certains réseaux de distribution à 4 conducteurs où les neutres des transformateurs et les conducteurs neutres sont mis à la terre en de nombreux points le long du circuit, le coefficient de mise à la terre peut être inférieur à 80%.

2. — Sur de nombreux réseaux de transport d'énergie à haute tension, le coefficient de mise à la terre ne dépasse pas 75% et peut même descendre à 70% aux très hautes tensions.

3. — La possibilité d'une augmentation du coefficient de mise à la terre résultant du sectionnement du réseau doit être envisagée comme l'un des facteurs à considérer.

- b) *Le coefficient de mise à la terre excède 80% (réseaux dont le neutre n'est pas mis effectivement à la terre et réseaux à neutre mis à la terre ou isolé où apparaissent des conditions de résonance).*

Ce cas peut être celui des réseaux dont le neutre est mis à la terre par l'intermédiaire de résistances ou de réactances, y compris les bobines d'extinction des défauts à la terre, ou encore dont certains points neutres, ou tous ceux-ci sont isolés de la terre. Dans de tels réseaux, le coefficient de mise à la terre à l'endroit où est installé le parafoudre peut atteindre 100% et même davantage si le rapport X_0/X_1 est négatif.

Note. — Si le rapport X_0/X_1 varie entre 0 et -20, les conditions de résonance peuvent se trouver remplies. Dans le cas des réseaux à neutre isolé, le rapport X_0/X_1 est toutefois généralement inférieur à -20 de sorte qu'il est peu probable que se produisent les conditions de résonance.

- d) tentatively select the arrester voltage rating and class;
- e) determine the impulse protective level for the tentatively selected arresters;
- f) locate the arrester as close as is practical to the apparatus to be protected, bearing in mind that the proximity of earthed objects and the height of the arrester above earth may adversely affect the arrester sparkover characteristics, particularly at very high voltages;
- g) determine the voltage at the insulation to be protected as limited by the arrester, taking into consideration the separation distances and other factors applicable to the point of application;
- h) in the event that steps c) and g) indicate that the arrester selected is inadequate, it may be necessary to choose another arrester rating or class, or in the case when an entirely new station is being designed, to increase the insulation level of the equipment to be protected.

3. Step-by-step procedure for protection of power transformers and station equipment

(For special treatment of dry-type power transformers see Sub-clause 4.2.1).

3.1 Determine the maximum phase-to-earth power-frequency voltage at the arrester location

3.1.1 By multiplying the highest system voltage by the coefficient of earthing at the point of installation of the arrester (Clause 17 in Publication 99-1). The value of the coefficient of earthing can be estimated from the curves in Figure 1. Experience shows that for arrester application the coefficient of earthing can be classified into a limited number of groups.

a) *Coefficient of earthing does not exceed 80% (effectively-earthed system)*

A value not exceeding 80% is obtained at the arrester location when for all system conditions the ratio of zero sequence reactance to positive sequence reactance (X_0/X_1) is between 0 and +3, and the ratio of zero sequence resistance to positive sequence reactance (R_0/X_1) is between 0 and +1. At this point the system is considered to be effectively earthed.

Notes 1. — On certain distribution systems of the 4-wire type where transformer neutrals and neutral conductors are directly earthed at frequent points along the circuit, the coefficient of earthing may be less than 80%.

2. — On many high-voltage transmission systems the coefficient of earthing will not exceed 75% and in some cases may be as low as 70%, particularly on extra high voltage systems.

3. — The possibility of increases in the coefficient of earthing due to system sectionalizing should be recognized as a factor to be considered.

b) *Coefficient of earthing exceeds 80% (non-effectively earthed neutral, resonant earthed or isolated neutral systems)*

This may be the case in systems which are earthed through resistors or reactors, including ground fault neutralizer (arc suppression coils), or which have some or all neutrals isolated from earth. In such systems the coefficient of earthing may be 100% or higher at the point of arrester installation if the ratio X_0/X_1 is negative.

Note. — If X_0/X_1 lies between 0 and -20, resonance conditions may occur. For systems with isolated neutrals, the ratio X_0/X_1 is, however, usually lower than -20 so that resonance conditions are not likely.

3.1.2 En vérifiant l'influence sur la tension maximale entre phase et terre:

- a) des diminutions brusques de la charge;
- b) des survitesses des machines.

3.1.3 En tenant compte des surtensions dues aux effets de résonance, à l'induction des circuits parallèles et à des facteurs analogues connus pour avoir une certaine importance; dans le cas contraire, elles sont en général négligées (voir la discussion sur les tensions anormales dans les réseaux au paragraphe 3.4.2).

3.2 *Evaluer l'amplitude et la forme d'onde du courant de décharge à travers le parafoudre*

Evaluer l'amplitude et la forme d'onde du courant de décharge principalement d'après le degré de protection contre les coups de foudre directs des lignes, centrales, postes et installations de transformation des réseaux de distribution. De telles installations peuvent être divisées en deux classes:

- effectivement protégées, et
- non effectivement protégées.

3.2.1 *Amplitude et forme d'onde du courant de décharge pour les installations ou les jonctions de lignes aériennes effectivement protégées*

Les installations effectivement protégées sont munies d'écrans assurant la protection, contre les coups de foudre directs, du poste et de toutes les lignes qui y sont raccordées. Les lignes peuvent être protégées soit sur toute leur longueur soit sur un petit nombre de portées au départ du poste (protection terminale de ligne). La protection par écran est considérée comme efficace si la probabilité de défauts sur les fils de garde, ou les amorçages en retour des fils de garde ou des charpentes mises à la terre vers les conducteurs ou d'autres parties sous tension, est si faible que le risque est considéré comme acceptable pour l'application particulière dont il s'agit.

L'expérience pratique acquise par certains pays fait apparaître que la protection par écrans n'est pas très efficace pour les lignes à moyenne tension (au-dessous de 100 kV). Ces lignes sont alors considérées comme des installations non effectivement protégées. Pour des tensions plus élevées, une technique efficace de protection utilisée dans certains pays prévoit un angle de protection des fils de terre qui n'excède pas 30° et une résistance de terre pour chaque pylône qui ne dépasse pas 10 ohms. Les courants maximaux de décharge des parafoudres dans ce cas varient habituellement de 4 000 A environ pour une tension de 110 kV aux alentours de 10 000 A pour des sous-stations à 400 kV. On peut obtenir sur les lignes comportant des conducteurs en faisceaux des courants de décharge compris entre 5 000 et 10 000 A. (Ces courants de décharge correspondent à l'onde 8/20 microsecondes utilisée pour les essais des parafoudres).

La mise sous écran (shielding) des parties terminales des lignes à moyenne tension sur poteaux en bois au moyen d'un fil de terre mis à la terre à chaque poteau, mais sans mise à la terre des bras en dehors de la zone de protection, peut ne pas empêcher les amorçages en retour si la résistance de terre aux poteaux est élevée. Toutefois, la mise sous écran dérive le courant de foudre et limite également les surtensions qui arrivent d'au-delà de la mise sous écran. Ces surtensions peuvent être très élevées en raison des poteaux de bois. Bien que ne remplissant pas les conditions pour un poste effectivement sous écran, ce genre de mise sous écran limite l'amplitude du courant de décharge à une valeur inférieure à celle qui est discutée (paragraphe 3.2.2) pour les postes non effectivement protégés par écran; le montant de cette réduction dépend des conditions particulières au lieu d'installation.

3.1.2 By checking the influence on the maximum phase-to-earth voltage of:

- a) sudden loss of load;
- b) the effect of machine overspeeds.

3.1.3 By considering overvoltages caused by resonance effects, induction from parallel circuits and similar factors known to be significant; otherwise they generally are neglected. (See the discussion of abnormal system voltages in Sub-clause 3.4.2).

3.2 *Estimate the magnitude and wave-shape of arrester discharge current*

Estimate the magnitude and wave shape of the discharge current, largely by the degree of shielding against direct lightning strokes to lines, stations, substations and distribution transformer installations. Such installations may be divided into two classes:

- effectively shielded, or
- non-effectively shielded.

3.2.1 *Magnitude and wave-shape of discharge current for effectively-shielded installations or overhead line-cable junctions*

Effectively-shielded installations have shielding against direct strokes provided for the station and for all connected lines. The lines may be shielded either on the whole length or on a few spans from the station (line end protection). Shielding is regarded as effective if the probability of shielding failures or back flashes from shield wires or earthed supporting structures to the conductors or other live parts is so small that the risk is considered acceptable for the specific application.

Practical experience of some countries shows that the shielding is not very effective for medium voltage lines (below 100 kV), and these are treated as non-effectively shielded installations. For higher voltages, effective shielding practice in some countries prescribes that the protective angle of the earth wires should not exceed 30° and that the earthing resistance of each tower should not exceed 10 ohms. The maximum lightning arrester discharge currents in such a case vary usually from about 4 000 A at 110 kV up to about 10 000 A at 400 kV substations. Lines with bundled conductors may attain a discharge current between 5 000 and 10 000 A. (These discharge currents are for the 8/20 microsecond wave used for lightning arrester testing).

Shielding for line end protection on medium voltage lines located on wooden poles with an earth wire which is earthed at each pole, but with no earthing of crossarms outside the protected zone, may not prevent back flashes (back flashovers) if the earth resistance at the poles is high. However, the shielding will tap off the lightning stroke current, and also will limit overvoltages entering from beyond the shielding. Such overvoltages may be very high because of the wood insulation. This shielding, while not fulfilling the requirements for an effectively-shielded station, will limit the magnitude of the discharge current below that discussed in Sub-clause 3.2.2 for non-effectively-shielded stations, the amount depending on the particular conditions at the installation.

Les courants de décharge des parafoudres dans le cas d'installations effectivement protégées dépendent de nombreux facteurs dont les plus importants sont les suivants:

- a) l'étendue de l'installation et la tension du réseau;
- b) la tenue aux ondes de choc de l'isolation des lignes aboutissant au poste; pour les lignes sur pylônes en acier ou en béton, tenir compte de la tenue des isolateurs (ou des éclateurs s'il en est fait usage);

Dans le cas des lignes équipées de poteaux en bois, il faut tenir compte en plus de la tenue du bois aux ondes de choc;

- c) le nombre de lignes raccordées. En raison de la réflexion des ondes mobiles, le courant de décharge des parafoudres est affecté par les impédances d'onde des lignes et des câbles montés en parallèle;
- d) la longueur des parties protégées par écrans des lignes aboutissant au poste. (Cette longueur est à l'étude).

La vitesse d'accroissement du courant de décharge dépend de la vitesse d'accroissement de la tension. On estime que, lorsqu'une onde provenant d'une ligne effectivement protégée pénètre dans l'installation, la vitesse maximale d'accroissement de la tension peut atteindre 500 kV par microseconde.

3.2.2 *Amplitude et forme d'onde du courant de décharge pour les installations ou jonctions de lignes aériennes non effectivement protégées*

Dans les installations ou les jonctions de câbles de lignes aériennes non effectivement protégées au moyen d'écrans, à la fois l'isolation et le parafoudre peuvent être soumis à des coups de foudres directs très rapprochés produisant des tensions et des courants extrêmement élevés, ayant des taux d'accroissement très rapides, de l'ordre de 1 000 kV par microseconde. Des conditions très dures peuvent résulter également d'un amorçage en retour au voisinage du parafoudre. L'expérience montre que, pour la tension incidente probable, un degré de protection satisfaisant est obtenu en coordonnant la tension résiduelle du parafoudre à un courant de décharge compris entre 5 000 et 20 000 A (onde 8/20 microsecondes) suivant:

- a) l'importance de l'installation;
- b) la probabilité d'apparition de courants plus élevés;
- c) l'étendue et la tension de l'installation;
- d) l'isolation de la ligne dans le cas d'emploi de ligne à pleine isolation sur poteaux en bois; il est vraisemblable qu'un parafoudre est soumis dans ce cas à des ondes de courant beaucoup plus élevées qu'un parafoudre relié à une ligne de tension plus élevée dont les bras des poteaux sont mis à la terre, à moins que le coup de foudre ne tombe si près du parafoudre que l'impédance et l'isolation de la ligne ne puissent avoir aucune influence sur la surtension.

Note. — Cette question a trait au nombre de jours par an au cours desquels se produisent des orages dans la localité et à l'importance de ces derniers, à la manière dont est réalisée la mise sous écran de la ligne et de l'équipement terminal, ainsi qu'à la nature du terrain. Lorsque les conditions sont sévères, il est bon de calculer ou de déterminer d'une façon quelconque la vitesse d'accroissement de la tension et l'amplitude du courant de décharge.

3.3 *Déterminer la tenue aux ondes de choc de l'installation à protéger*

Déterminer la tenue aux ondes de choc de l'isolation et, dans certains cas, la tenue aux surtensions de manœuvre de l'isolation du matériel installé.

3.3.1 *Tenue aux ondes de choc de l'isolation autre que l'air du matériel*

La tenue aux ondes de choc du matériel est définie par sa tension d'essai aux ondes de choc en onde pleine (voir le tableau des Niveaux d'isolements normalisés de la Publication 71 de la CEI: Recommandations pour la coordination de l'isolement).

The arrester discharge currents in effectively shielded installations depend on many factors. The most important of them are listed below:

- a) the size of the installation and system voltage;
- b) the impulse insulation withstand strength of the incoming lines; in steel and concrete tower lines the withstand strength of insulators (or gaps, if used) should be taken into account;

In wood pole lines the additional impulse withstand strength of the wood must be taken into account;

- c) the number of connected lines. Owing to reflection of travelling waves, the discharge current of arresters is affected by the parallel-connected surge impedance of lines and cables;
- d) the length of the shielded portions of the incoming lines. (Minimum values of lengths involved are under consideration.)

The rate-of-rise of discharge current is dependent on the rate-of-rise of voltage. The maximum rate-of-rise of voltage when it enters the station from an effectively shielded line is estimated to be 500 kV per microsecond.

3.2.2 *Magnitude and wave-shape of discharge current for installations or overhead line-cable junctions not effectively shielded*

With installations or overhead line-cable junctions not effectively shielded, both the insulation and the arrester can be subjected to nearby direct strokes producing extremely high voltages having very steep rates-of-rise, of the order of 1000 kV per microsecond, as well as high currents. Severe conditions may result also from a back flashover close to the arrester. Experience indicates that for the expected incident voltage a satisfactory degree of protection is obtained by co-ordinating the arrester residual voltages at a discharge current of 5000 to 20000 A (8/20 microsecond value) depending on:

- a) the importance of the installation;
- b) the probability of the occurrence of the higher currents;
- c) the size and voltage of the installation;
- d) the line insulation where fully insulated wood pole lines are used; thus an arrester connected to a fully insulated line of lower voltage is likely to be subjected to much higher surge current than one connected to a higher voltage line with earthed crossarms, unless the stroke occurs so close to the arrester that the impedance and insulation of the line cannot influence the surge.

Note. — This problem is related to the number of days in the year in which thunderstorms occur in the locality, their severity and the design of the shielding of the line and terminal equipment and the nature of the terrain. Where conditions are severe, it is advisable to calculate or to otherwise determine the rate-of-rise of the voltage and the magnitude of the discharge current.

3.3 *Determine the withstand strength of the insulation to be protected*

Determine the insulation impulse withstand strength and in some cases the insulation switching-surge withstand strength of the equipment being installed.

3.3.1 *Impulse withstand strength for equipment insulation other than air*

The impulse withstand strength for equipment is defined by its full wave impulse test voltage (see Table of Standard insulation levels in IEC Publication 71, Recommendations for Insulation Co-ordination).

La plupart des types d'isolation peuvent supporter des pointes de tension de courte durée dont la valeur de crête est plus élevée que celle qui correspond aux essais de tenue en onde pleine normale. La différence la plus faible se rencontre dans les éclateurs irradiés tels que ceux qui sont utilisés dans les parafoudres. Viennent ensuite, et dans l'ordre, l'isolation solide, l'isolation à l'huile et au papier et enfin les éclateurs dans l'air à distribution non uniforme du potentiel tels que les éclateurs à tiges.

L'effet de la durée sur la tenue diélectrique de l'isolation est une fonction compliquée avec une grande dispersion, et aucun renseignement numérique précis ne peut être fourni. Toutefois, on admet généralement en tant qu'hypothèse de travail que l'isolation à l'huile et au papier des transformateurs immergés dans l'huile a une tension de tenue supérieure de 15% au moins à la tension tenue en onde pleine pour des pointes de tension d'une durée inférieure à 3 microsecondes.

Note. — Certains types d'isolations solides, telles que celles des machines tournantes et des transformateurs du type sec (ou d'autres appareils) peuvent ne pas avoir une marge aussi grande que 15%. Les machines tournantes et les transformateurs secs sont traités séparément au paragraphe 4.2. L'article 3 ne s'applique qu'aux transformateurs immergés dans un liquide.

3.3.2 Tenue aux ondes de choc de l'isolation dans l'air

Voir la section 6 de la Publication 71 A de la CEI: Recommandations pour la coordination de l'isolement – Guide d'application, pour des indications sur les distances dans l'air équivalentes pour diverses tensions de choc particulières.

3.3.3 Tenue aux surtensions de manœuvre

Aucune forme d'onde normale représentative des surtensions de manœuvre n'a été acceptée de façon générale jusqu'à maintenant, ni en ce qui concerne la tenue de l'isolation à de telles surtensions de manœuvre, ni en ce qui concerne la tenue des dispositifs de protection en présence de telles surtensions. On peut cependant obtenir du constructeur du parafoudre des courbes caractéristiques tension-temps d'amorçage au choc jusqu'à 2 000 microsecondes.

Déterminer, au besoin en consultant le constructeur, la tenue aux surtensions de manœuvre du matériel à protéger dans les postes à haute tension (100 kV et plus). Ceci est important lorsque la tenue aux ondes de choc de l'isolation est inférieure de plus d'un niveau aux niveaux d'isolement normalisés (voir le tableau de la Publication 71 de la CEI), car, dans ce cas, le besoin d'une protection résulte en général plutôt de la possibilité de surtensions de manœuvre que de la foudre (paragraphe 3.6.2.3.3 et section 5).

3.4 Choisir provisoirement le parafoudre

3.4.1 Choisir entre les différentes classes de parafoudres à résistance variable

(Les parafoudres sont classés suivant leurs courants de décharge nominaux normaux indiqués à l'article 41 de la Publication 99-1).

Choisir la classe appropriée suivant:

- a) la nécessité d'un niveau de protection moyen ou bas pour l'isolation à protéger. Les parafoudres à résistance variable du type 10 000 ampères assurent les meilleurs niveaux de protection. Viennent ensuite les parafoudres 5 000 ampères, série A, les parafoudres 5 000 ampères, série B au Canada et aux Etats-Unis, et enfin les parafoudres 2 500 ampères en Europe (voir tableaux III et IV de la Publication 99-1);

Most types of insulation withstand short-duration voltage peaks of higher peak value than the withstand strength for standard full waves. The smallest difference is exhibited by irradiated spark gaps such as are used in lightning arresters. Next in order are solid insulation, oil and paper insulation, and finally air gaps with non-uniform field distribution such as rod gaps.

The effect of duration of the impulse on the insulation withstand strength is a complicated function with great dispersion, and no accurate numerical information can be given. However, as a working hypothesis it is generally assumed that oil and paper insulation in liquid-filled transformers has a withstand strength of not less than 15% above its full-wave withstand strength for voltage peaks shorter than 3 microseconds.

Note. — Certain types of solid insulation, such as that in rotating machines and in dry-type transformers (or other apparatus) may not possess so high a margin as 15%. Rotating machines and dry-type transformers are treated separately in Sub-clause 4.2. Clause 3 applies only to liquid-filled transformers.

3.3.2 Impulse withstand strength for air insulation

Refer to Section 6 of IEC Publication 71 A, Recommendations for Insulation Co-ordination – Application Guide, for guidance on equivalent clearances for particular impulse voltages.

3.3.3 Switching surge withstand strength

No standard wave-shape representative of switching surges has been accepted generally as yet, either for the withstand strength of the insulation to such overvoltage or the behaviour of protective devices against such overvoltages. However, impulse sparkover voltage-time characteristic curves up to 2 000 microseconds should be obtainable from the arrester manufacturer.

Determine where necessary, by consultation with the manufacturer, the switching surge insulation withstand strength of the equipment to be protected in high-voltage stations (100 kV and higher). This is important when the impulse insulation withstand strength is more than one level below the standard insulation levels (see Table in IEC Publication 71) since in this case the need for protection generally results from the possibility of switching surges rather than from lightning (Sub-clause 3.6.2.3.3 and Section 5).

3.4 Tentatively select arresters

3.4.1 Choose between the various classes of non-linear resistor-type arresters

(Arresters are classified by the standard nominal discharge currents in Clause 41 of Publication 99-1).

Choose the proper class of arrester based on:

- a) the need for a medium or low protective level for the insulation to be protected. The 10 000 ampere non-linear resistor type arresters provide the best protective levels. The 5 000 ampere series A arresters are next, and in Canada and the U.S.A. the 5 000 ampere Series B, or in Europe the 2 500 ampere arresters are last (see Tables III and IV of Publication 99-1);

- b) la nécessité de la meilleure protection. En général, les parafoudres 10 000 ampères (connus dans certains pays sous le nom de parafoudres pour postes) sont utilisés sur les réseaux à haute tension (100 kV et au-dessus) et dans des postes à des tensions moins élevées, mais qui sont considérés comme suffisamment importants pour justifier la meilleure protection. Les parafoudres à 10 000 et 5 000 ampères de série A sont utilisés sur les réseaux de transport à moyenne tension, les parafoudres à 5 000 ampères de série B et 2 500 ampères sur les réseaux de distribution pour la protection des petits transformateurs;
- c) les conditions particulières qui peuvent justifier le choix d'une classe plus élevée de parafoudre, soit que:
 - 1) l'intensité des orages est anormalement élevée;
 - 2) les conditions des surtensions de manœuvre imposent l'emploi de parafoudres d'un pouvoir de décharge plus élevé, pour permettre la décharge des courants de capacité des longues lignes, câbles et batteries de condensateurs, lorsque les disjoncteurs réamorcent ou que d'autres surtensions de manœuvre provoquent des amorçages sur le parafoudre (article 5);
 - 3) des installations alimentées par une ligne unique sont considérées comme suffisamment importantes pour nécessiter la meilleure protection possible, notamment lorsqu'elles ne sont pas effectivement protégées au moyen d'écrans. Une étude des courants de décharge escomptés est conseillée dans de tels cas (voir paragraphes 3.2 et 3.6).

3.4.2 Choisir provisoirement la tension nominale du parafoudre

Choisir provisoirement la tension nominale du parafoudre en se basant sur la tension la plus élevée entre phase et terre déterminée comme l'indique le paragraphe 3.1. Cette tension nominale doit être choisie au moins égale à la tension la plus élevée entre phase et terre, afin d'obtenir l'extinction dans toutes les circonstances du courant de suite à la fréquence de service, c'est-à-dire un fonctionnement correct du parafoudre. Comme la tension la plus élevée entre phase et terre n'est connue dans un réseau que de façon très approximative, il est recommandé de n'utiliser des tensions nominales de parafoudres égales à la tension la plus élevée entre phase et terre, ou très voisines de cette dernière, que s'il est nécessaire de ménager un rapport de protection approprié entre le niveau de tenue de l'isolation du matériel et le niveau de protection au choc du parafoudre. L'emploi de parafoudres d'une tension nominale trop basse peut entraîner une proportion excessive de défaillances des parafoudres pendant l'exploitation. Lorsque ce risque est couru délibérément pour protéger une isolation faible, il y a lieu d'envisager l'emploi de parafoudres disposés de façon à ne pas mettre en danger le personnel ou le matériel avoisinant si le parafoudre est mis en défaut.

Les conditions spéciales qui doivent entrer en ligne de compte dans le choix de la tension nominale du parafoudre sont les suivantes:

a) Tensions de réseau anormales

Le choix des caractéristiques nominales du parafoudre correspondant à la tension la plus élevée du réseau (U_m) multipliée par le coefficient de mise à la terre, est basé sur l'hypothèse qu'en service la tension la plus élevée du réseau U_m n'est dépassée que dans des conditions d'exploitation anormales et que la probabilité d'un fonctionnement du parafoudre coïncidant avec une tension supérieure à la tension la plus élevée du réseau est très petite. Si des tensions anormales du réseau sont susceptibles de se reproduire fréquemment, accroissant ainsi la probabilité de fonctionnement du parafoudre dans ces conditions, il peut être nécessaire d'utiliser un parafoudre d'une tension nominale légèrement supérieure à celle qui est recommandée ci-dessus, selon les conditions particulières.

b) the need for the best protection. As a general rule, 10 000 ampere arresters (referred to in some countries as station arresters) are applied to high-voltage systems (100 kV and above) and to important stations of lower voltage systems which are considered important enough to require the best protection; 10 000 ampere or 5 000 ampere Series A arresters are used on medium voltage transmission systems, 5 000 ampere Series B arresters or 2 500 ampere arresters on distribution systems for the protection of small transformers;

c) special requirements which indicate that a higher class of arrester is advisable because:

- 1) the lightning severity is unusually high;
- 2) the switching surge conditions indicate the use of arresters with increased current discharge capacity for discharging long lines, cables and capacitor banks in case the circuit breakers restrike or other switching surges cause sparkover of the arrester (Clause 5);
- 3) of installations with a single incoming line which are considered important enough to require the best protection and particularly those which are not effectively shielded. A study of expected discharge currents is advisable in such cases. (See Sub-clauses 3.2 and 3.6).

3.4.2 Choose the tentative arrester voltage rating

Choose the tentative voltage rating based on the highest phase-to-earth power-frequency voltage determined as indicated in Sub-clause 3.1. This voltage rating should be chosen at least equal to the highest phase-to-earth voltage in order to assure extinction of the power follow current under any circumstances, that is, proper arrester operation. As the highest phase-to-earth voltage for a system often is known only very approximately, it is recommended that arrester voltage ratings equal to or very closely above this highest phase-to-earth voltage be used only when this is necessary in order to get a suitable protective ratio between the equipment insulation withstand level and the arrester impulse protective level. Use of arresters with the voltage ratings too low may result in an excessive failure rate of the arresters in service. When this risk is deliberately taken in order to protect weak insulation, consideration must be given to the use of arresters arranged so as not to endanger personnel and neighbouring equipment should the arrester fail.

Special conditions which should be considered in choosing the arrester voltage rating are:

a) Abnormal system voltages

The selection of the arrester voltage ratings corresponding to the highest system voltages (U_m) multiplied by the coefficient of earthing, is based on the assumption that in service the highest system voltage (U_m) is only exceeded under abnormal operating conditions, and that the probability of an arrester operation coinciding with a voltage exceeding the highest system voltage is very small. If abnormal system voltages are likely to be a frequent occurrence, thereby increasing the probability of arrester operations during such conditions, it may be necessary to use an arrester with a voltage rating higher than recommended above, depending upon the particular circumstances.

b) Fréquences de réseau anormales

L'emploi de courants alternatifs de fréquence inférieure à 48 Hz ou supérieure à 62 Hz peut nécessiter des mesures spéciales dans la construction ou dans l'utilisation des parafoudres et doit faire l'objet de discussions entre l'utilisateur et le constructeur.

Comme il est indiqué au paragraphe 3.6.3, ce choix provisoire de la classe et de la tension nominale du parafoudre peut nécessiter une révision ultérieure.

3.5 Déterminer le niveau de protection aux ondes de choc du parafoudre choisi provisoirement

Note. — La proximité d'appareils mis à la terre et la hauteur du parafoudre au-dessus du sol peuvent avoir une influence défavorable sur les caractéristiques d'amorçage du parafoudre, notamment aux tensions élevées.

3.5.1 Pour des lignes et des installations effectivement protégées au moyen d'écran (voir paragraphe 3.2.1)

Déterminer, pour le courant de décharge estimé en fonction des considérations du paragraphe 3.2.1, la tension résiduelle du parafoudre choisi provisoirement d'après les renseignements fournis par le constructeur. Lorsqu'on utilise des parafoudres 10 000 ampères (ondes 8/20 microsecondes), la coordination au courant nominal de décharge fournit normalement un facteur de sécurité.

3.5.2 Pour des lignes et des installations qui ne sont pas effectivement protégées au moyen d'écran (voir paragraphe 3.2.2)

Déterminer la tension résiduelle correspondant à un courant de décharge évalué d'après les indications données au paragraphe 3.2.2. Ce dernier peut dépasser le courant de décharge nominal du parafoudre.

Notes 1. — La tension d'amorçage sur front d'onde d'un parafoudre (pour les vitesses d'accroissement spécifiées dans la Publication 99-1) divisée par 1,15 peut être inférieure à la tension résiduelle pour le courant de décharge nominal normal du parafoudre. S'il en est ainsi, il n'y a pas lieu de prendre en considération cette tension d'amorçage. Les parafoudres possédant à la fois des éclateurs intérieurs et des éclateurs extérieurs peuvent constituer une exception.

2. — Les manières de procéder indiquées aux paragraphes 3.5.1 et 3.5.2 suffisent pour des parafoudres situés au voisinage immédiat de l'isolation à protéger et dans le cas où les lignes aériennes pénètrent directement dans le poste. L'influence de l'emplacement du parafoudre par rapport à l'isolation (distance d'éloignement) sera discutée dans le paragraphe 3.6.2.3. La présence d'un câble entre la ligne aérienne et le poste sera discutée au paragraphe 3.6.4.

3. — L'attention est attirée sur la nécessité d'obtenir du constructeur l'indication du niveau de protection relativement aux surtensions de manœuvre, comme indiqué aux paragraphes 3.3.3 et 3.6.2.3.3.

3.6 Coordonner le niveau de protection du parafoudre avec le niveau de tenue aux ondes de choc de l'isolation à protéger

3.6.1 Généralités

La façon de procéder recommandée varie avec les différentes catégories d'installations, suivant qu'elles sont protégées effectivement par écran ou non, suivant le nombre de lignes normalement raccordées et l'extension physique de l'installation.

Le principe général suivant est appliqué:

Il doit exister un certain rapport de protection entre la tenue aux ondes de choc de l'isolation du matériel à protéger (qui est une valeur minimale garantie) et le niveau de protection aux ondes de choc qui est réalisé à l'emplacement de la partie de matériel dont il s'agit, dans les hypothèses énoncées aux paragraphes 3.3 et 3.5. Ce rapport de protection est destiné à couvrir des circonstances exceptionnelles telles que des amplitudes ou des raideurs anormalement élevées de probabilité faible.

b) Abnormal system frequency

Alternating current of frequency less than 48 or more than 62 Hz (c/s) may require special consideration in the manufacture or application of lightning arresters and should be subject to discussion between the user and the manufacturer.

As noted in Sub-clause 3.6.3, this tentative choice of arrester class and voltage rating may require modification.

3.5 Determine the impulse protective level for the tentatively selected arrester

Note. — The proximity of earthed apparatus and the height of the arrester above earth may adversely affect the arrester sparkover characteristics, particularly at high voltages.

3.5.1 For effectively-shielded lines and installations (see Sub-clause 3.2.1)

Determine the residual voltage at a discharge current estimated in accordance with the considerations in Sub-clause 3.2.1 for the tentatively selected arrester from information furnished by the manufacturer. When 10 000 ampere arresters are used (8/20 microsecond waves), co-ordination at the nominal discharge current normally provides a factor of safety.

3.5.2 For lines and installations which are not effectively shielded (see Sub-clause 3.2.2)

Determine the residual voltage for a discharge current estimated in accordance with the considerations in Sub-clause 3.2.2. This may exceed the nominal discharge current of the arrester.

Notes 1. — The front-of-wave impulse sparkover voltage for an arrester (at rates-of-rise specified in Publication 99-1) divided by 1.15 may be lower than the residual voltage at the standard nominal discharge current of the arrester. If so, they need not be further considered. Arresters having both internal and external gaps may be an exception.

2. — The procedures in Sub-clauses 3.5.1 and 3.5.2 are sufficient for arresters located close to the insulation to be protected, and with the overhead lines brought directly into the station. The influence of location of the arrester with respect to this insulation (separation distance) will be discussed in 3.6.2.3. The introduction of a cable between the overhead lines and the installation will be discussed in Sub-clause 3.6.4.

3. — Consideration should be given to the need for obtaining the switching surge protective level of the arrester from the manufacturer, as covered in Sub-clauses 3.3.3 and 3.6.2.3.3.

3.6 Co-ordinate the arrester protective level with the impulse withstand strength of the insulation to be protected

3.6.1 General

The recommended treatment is different for different categories of installations depending on whether they are effectively shielded or not, on the number of lines normally connected, and on the physical extension of the installation.

The following general principle is applied:

There shall be a certain protective ratio provided between the impulse withstand strength of the equipment installation to be protected (a guaranteed minimum value) and the impulse protective level which is achieved at the piece of equipment in question under the assumptions given in Sub-clauses 3.3 and 3.5. This protective ratio is intended to cover exceptional circumstances such as abnormally higher magnitude or steepness of infrequent occurrence.

Le rapport minimal recommandé entre la tenue aux ondes de choc et le niveau de protection est de 1,2. Il est sous-entendu que les terres de tous les parafoudres et du matériel sont reliées ensemble directement.

On doit tenir compte de la réduction de la rigidité diélectrique de l'isolation dans l'air lorsque l'altitude croît, en utilisant les recommandations s'appliquant à chaque appareil particulier.

3.6.2 *Coordination basée sur le type d'installation*

3.6.2.1 *Installations non effectivement protégées par écran où aboutit une seule ligne aérienne*

Une installation typique de cette nature est constituée par un transformateur unique, avec ou sans appareillage de coupure simple, généralement sans équipement de mesure, relié à une ligne d'arrivée unique sans fil de terre.

Installer les parafoudres au voisinage immédiat du transformateur.

Comparer la tenue au choc en onde pleine du transformateur (déterminée au paragraphe 3.3) avec le niveau de protection aux ondes de choc des parafoudres (déterminé au paragraphe 3.5.2) et vérifier qu'il existe un rapport de protection satisfaisant.

3.6.2.2 *Installations non effectivement protégées par écran où aboutissent plusieurs lignes*

Les installations de cette nature diffèrent de celles du paragraphe 3.6.2.1 en ce que plusieurs lignes sont raccordées en service normal. Un exemple typique est celui des postes à moyenne tension et, même s'il y a plus d'un transformateur, l'étendue de la surface du poste est plutôt faible. Quelques équipements de coupure et de mesure sont généralement installés.

Installer un jeu de parafoudres près du transformateur ou des transformateurs et vérifier le rapport de protection comme dans le cas précédent au paragraphe 3.6.2.1, en tenant compte de ce que les ondes de surtension incidentes sont réduites par la division de l'énergie lorsque plusieurs lignes se rencontrent dans le poste. Cependant on doit tenir compte de ce qu'une ou plusieurs lignes peuvent être déconnectées par des manœuvres de coupure.

Lorsque, dans un tel poste, un ou plusieurs disjoncteurs ou sectionneurs sont ouverts, les entrées de lignes correspondantes ou certaines parties du poste peuvent rester sans protection par les parafoudres des transformateurs. S'il est reconnu que de tels cas nécessitent une protection supplémentaire, des parafoudres à résistance variable, des éclateurs ou des parafoudres à expulsion de la classe «ligne» doivent être installés aux entrées respectives des lignes.

3.6.2.3 *Installations effectivement protégées par écran*

Les surtensions incidentes sont limitées en amplitude et en raideur, ce qui permet en général d'admettre une certaine distance entre les parafoudres et l'isolation à protéger (voir paragraphe 3.5.1) comme il est indiqué plus loin. Selon qu'il s'agit d'une petite ou d'une grande installation, on opère comme suit:

3.6.2.3.1 *Petites installations où aboutit une seule ligne aérienne*

- i) Installer un jeu de parafoudres en un point qui assure la protection de tout le matériel, mais donner la préférence au transformateur. Une certaine distance entre le parafoudre et l'isolation à protéger est admissible dans les installations protégées effectivement par écran.

The recommended minimum protective ratio between insulation withstand strength and impulse protective level is 1.2. It is pre-supposed that the earths of all arresters and equipment are directly connected together.

The reduction in the electric strength of air insulation with increasing altitude should be considered, using the recommendations for the specific apparatus.

3.6.2 *Co-ordination based on the type of installations*

3.6.2.1 *For non-effectively shielded installations with a single incoming overhead line*

A typical installation of this type consists of a single transformer with or without simple switching equipment, generally without measuring equipment, which is connected to a single incoming line without shielding by earth wires.

Install the arrester right at the transformer.

Compare the full-wave impulse withstand strength of the transformer (determined in Sub-clause 3.3) with the impulse protective level of the arresters (determined in Sub-clause 3.5.2) and check that there is a satisfactory protective ratio.

3.6.2.2 *For non-effectively shielded installations with several incoming lines*

Installations of this type differ from Sub-clause 3.6.2.1 since in normal operation more than one line is connected. Typically, this is a medium-voltage station, and even if there is more than one transformer the extension of the station area is rather small. Some switching and measuring equipment is usually installed.

Install a set of arresters at or close to the transformer or transformers and check the protective ratio as in the previous case of Sub-clause 3.6.2.1, taking into account that the incoming overvoltage waves are reduced by sharing of energy when several lines meet in the station. However, consideration should be given to the case when one or more of the lines are disconnected by switching.

When, in such a station, one or more circuit-breakers or disconnecting switches are open, the corresponding line entrances or certain parts of the station may be left without protection from the arresters at the transformers. If such cases are recognized to require additional protection, non-linear resistor arresters, gaps, or transmission-class expulsion arresters are installed at the respective line entrances.

3.6.2.3 *For effectively shielded installations*

The incoming overvoltages are limited in amplitude and steepness, which generally permits a certain separation between the arresters and the insulation to be protected (see Sub-clause 3.5.1), as will be discussed later. Depending on whether it is a small or large installation, proceed as follows:

3.6.2.3.1 *For small installations with one incoming overhead line*

- i) Install one set of arresters at a point which provides protection to all equipment but gives preference to the transformer. Separation between the arrester and the insulation to be protected is permissible in effectively-shielded installations.

- ii) Déterminer les distances d'éloignement maximales admissibles entre le parafoudre et le matériel protégé qui n'entraînent pas encore de tensions excessives sur le matériel de l'installation. Ceci peut s'effectuer par le calcul, les caractéristiques de l'onde pénétrant dans l'installation étant suffisamment bien connues. Une détermination précise peut être effectuée en utilisant des méthodes figurant dans la littérature. Une méthode graphique est à l'étude et pourra être ajoutée sous forme d'annexe D, à une date ultérieure.

3.6.2.3.2 *Grandes installations où aboutissent plusieurs lignes aériennes et qui comportent des transformateurs et de l'appareillage de coupure et de mesure*

Déterminer aussi bien que possible les emplacements les mieux appropriés du parafoudre ainsi que le nombre de parafoudres qui assureront le degré de protection nécessaire aux différents appareils, ce qui peut être assez difficile.

Une méthode graphique est à l'étude et pourra être ajoutée sous forme d'annexe D, à une date ultérieure. La littérature donne des exemples de cas traités à l'aide d'études sur modèles et à l'aide de méthodes utilisant des calculateurs numériques. On doit tenir compte de la possibilité de sectionner le poste ou de déconnecter des lignes pendant l'exploitation, avec ou sans perturbations. Il doit être possible de maintenir la protection, au moins des transformateurs, dans des circonstances qui conduisent parfois à augmenter le nombre de parafoudres.

3.6.2.3.3 *Installations comportant des transformateurs à isolation réduite inférieure de plus d'un niveau au-dessous des niveaux d'isolement normalisés (voir les tableaux de la Publication 71).*

Installer le parafoudre près des transformateurs et procéder comme l'indique les paragraphes 3.6.2.3.1 ou 3.6.2.3.2. Dans ces installations, les parafoudres doivent, dans beaucoup de cas, limiter les surtensions de manœuvre aussi bien que les surtensions atmosphériques.

Pour les surtensions de manœuvre, le niveau de tenue de l'isolation aussi bien que le niveau de protection des parafoudres aux surtensions de manœuvre ont des valeurs différentes de celles qui correspondent aux surtensions atmosphériques et, en conséquence, la coordination de l'isolement aux surtensions de manœuvre doit faire l'objet d'une étude séparée (voir paragraphe 3.3.3). Les résultats d'une telle étude peuvent conduire à des changements dans la disposition des parafoudres. Aucune valeur normalisée n'étant établie en ce qui concerne la coordination aux surtensions de manœuvre, il peut être parfois nécessaire de demander conseil aux constructeurs du matériel.

3.6.2.3.4 *Installations du paragraphe 3.6.2 raccordées à des câbles*

Dans des installations raccordées à des câbles, le (ou les) parafoudres doit (ou doivent) être utilisé(s) conformément au paragraphe 3.6.4.

3.6.3 *Autres considérations*

3.6.3.1 *Quand la coordination n'est pas obtenue*

Si la coordination n'est pas obtenue par les manières de procéder des paragraphes 3.6.1 et 3.6.2 avec le parafoudre choisi provisoirement selon le paragraphe 3.4, il devient nécessaire de considérer d'autres mesures en variante, telles que:

- a) le choix d'un parafoudre d'une meilleure classe ou de tension nominale moins élevée en vue d'obtenir un niveau de protection au choc plus faible.

Le choix d'un parafoudre d'une tension nominale moins élevée que celle résultant du

- ii) Determine the maximum permissible separation distances between the arrester and the protected equipment which will not permit excessive voltages at this equipment installation. This can be calculated because the characteristics of the surge entering the installation are reasonably well known. A precise determination can be made using methods detailed in the trade literature. A graphical method is being considered which may be added as Appendix D at a later date.

3.6.2.3.2 *For large installations with several incoming overhead lines, transformers, switchgear and measuring equipment*

Determine as well as possible the most strategic arrester locations and the number of arresters which will give the wanted degree of protection to different pieces of equipment. This can be rather difficult.

A graphical method is being considered which may be added as Appendix D at a later date. Examples of cases treated by model studies and digital computer programming methods are given in the trade literature. Consideration must be given to the possibility that the station may become sectionalized or that lines are disconnected during service, with or without disturbances. It must be possible to maintain the protection of at least the transformers under all circumstances. Sometimes this involves increasing the number of arresters.

3.6.2.3.3 *For installations with transformers having reduced insulation more than one step below standard insulation levels (see Tables in Publication 71)*

Install the arrester at the transformers and proceed as directed in Sub-clauses 3.6.2.3.1 or 3.6.2.3.2. In such installations, in many cases the arrester must limit switching overvoltages as well as lightning overvoltages.

For switching overvoltages, the insulation withstand level as well as the switching surge impulse protective level of the arresters have values different from those for lightning overvoltages and, therefore, the insulation coordination for switching surges must be studied separately (see Sub-clause 3.3.3). The results of such a study may lead to modification of the arrester arrangement. As no standard values are established for the insulation co-ordination at switching overvoltages, it may sometimes be necessary to obtain guidance from equipment manufacturers.

3.6.2.3.4 *For cable-connected installations of Sub-clause 3.6.2*

For cable-connected installations the arrester or arresters should be applied as covered in Sub-clause 3.6.4.

3.6.3 *Other considerations*

3.6.3.1 *When co-ordination is not achieved*

If co-ordination is not achieved by the procedure of Sub-clauses 3.6.1 and 3.6.2 with the arrester tentatively selected in Sub-clause 3.4, it becomes necessary to consider alternative measures such as:

- a) selecting an arrester of better class or lower rating to obtain a lower impulse protective level.

Selecting an arrester with a lower voltage rating than that indicated by consideration of

paragraphe 3.4.2 implique un certain risque de défaut du parafoudre, en raison de l'incapacité de ses éclateurs à couper des courants sous des tensions supérieures à sa tension nominale;

- b) le changement d'emplacement du parafoudre pour réduire la distance d'éloignement et/ou la longueur de la connexion du parafoudre;
- c) l'augmentation du niveau d'isolement du matériel à protéger;
- d) l'amélioration des dispositifs de protection par écran.

3.6.3.2 Conditions spéciales entraînant un nouvel examen du choix du parafoudre

Les conditions spéciales susceptibles d'entraîner un nouvel examen du choix provisoire du parafoudre suivant le paragraphe 3.4 peuvent être:

3.6.3.2.1 Une grande résistance de terre ou un éloignement exagéré

(L'examen de ces questions dépend de l'achèvement de l'annexe D.)

Les terres des parafoudres et du matériel doivent si possible être réunies électriquement ensemble. Toutefois si une connexion directe entre le parafoudre et l'appareil protégé n'a pas été faite et si la résistance de la prise de terre du parafoudre est élevée, ou bien si les connexions entre le parafoudre et l'appareil protégé ont une longueur excessive, les tensions de choc qui peuvent apparaître sur l'appareil protégé peuvent être notablement plus élevées que celles aux bornes du parafoudre. Pour obtenir le degré de protection désiré de l'appareil, il peut être nécessaire soit d'améliorer ces conditions, soit de choisir une classe de parafoudre ayant un niveau de protection inférieur. Le choix d'un parafoudre ayant une tension nominale inférieure à celle qui résulte du paragraphe 2.3.4.2, entraîne un risque de défaut du parafoudre si celui-ci est appelé à fonctionner au moment où la tension à fréquence industrielle à ses bornes dépasse sa tension nominale.

3.6.3.2.2 Des appareils à faible isolation

La protection des appareils ayant un faible niveau d'isolement peut nécessiter un examen spécial lors du choix ou de la conception du parafoudre et nécessite le recours au constructeur.

Le matériel qui rentre dans cette catégorie est l'ancien matériel construit avant l'apparition des essais aux ondes de choc et le matériel qui n'est pas construit en vue d'être utilisé dans des situations exposées. Le problème de la protection de tels matériels est analogue à celui qui est discuté au paragraphe 4.2.

3.6.4 Matériels connectés par câbles pour les installations à une seule ligne

Ces matériels comprennent une centrale, un poste ou des appareils individuels connectés à un câble, dont l'armature métallique est mise à la terre, et qui est relié à son tour à une ligne aérienne en situation exposée, laquelle est ou n'est pas protégée par des fils de garde à la jonction du câble et de la ligne.

3.6.4.1 Emplacement des parafoudres

3.6.4.1.1 Généralités

Installer les parafoudres près du matériel ou à la jonction du câble avec la ligne aérienne ou encore à la fois au voisinage du matériel et à la jonction si cela apparaît nécessaire. Les parafoudres doivent être installés à la jonction du câble et de la ligne aérienne s'il est impossible de les installer au voisinage du matériel. Le manque de place pour l'instal-

Sub-clause 3.4.2 will involve some risk of arrester failure resulting from the inability of the arrester gaps to reseal against a voltage exceeding its rating;

- b) changing the location of the arrester to reduce the separation distance and/or the arrester lead length;
- c) increasing the insulation level of the equipment to be protected;
- d) improving the shielding.

3.6.3.2 *Special conditions requiring reconsideration of the choice of the arrester*

Special conditions affecting the need for reconsideration of the arrester tentatively selected in Sub-clause 3.4 may be:

3.6.3.2.1 *High earth resistance or excessive separation*

(The consideration of this is dependent on the completion of Appendix D.)

The earths of all arresters and equipment (if possible) should be connected together electrically; however, if a direct connection between the arrester and the protected apparatus has not been made and the arrester earth resistance is high or the connections between the arrester and the protected apparatus are of excessive length, the impulse voltages which appear at the protected apparatus may be substantially higher than those across the terminals of the arrester. In order to obtain the desired degree of protection for the apparatus, it may be necessary either to improve these conditions, or to select a class of arrester with lower protective characteristics. The use of an arrester with a lower voltage rating than that indicated by consideration of Sub-clause 2.3.4.2 will result in a risk of failure of the arrester if it is required to operate when the power-frequency voltage across its terminals exceeds the voltage rating.

3.6.3.2.2 *Apparatus of low insulation strength*

The protection of apparatus having low insulation strength may require special consideration in the selection or design of the arrester and should be referred to the manufacturer.

Equipments which can be included in this classification are old equipment built prior to the time impulse tests were made, and equipment not built for exposed locations. The problem of protecting such equipment is similar to the problem discussed in Sub-clause 4.2.

3.6.4 *Cable-connected equipment for single-line installations*

Cable-connected equipment involves a station, substation or individual apparatus connected to a cable (with earthed metallic sheath) which in turn is connected to an overhead exposed line that may or may not be effectively shielded at the line-cable junction.

3.6.4.1 *Location of arresters*

3.6.4.1.1 *General*

Install arresters at the equipment, or at the overhead line-cable junction or at both the equipment and the junction, if necessary. Arrester installations must be made at the overhead line-cable junction if it is impossible to apply the arresters at the equipment. Limi-

lation des parafoudres au voisinage du matériel peut également rendre opportun l'installation des parafoudres à la jonction.

Dans le cas de lignes sans fils de terre, il peut être avantageux d'installer des dispositifs de protection supplémentaires quelques portées avant la jonction du câble et de la ligne aérienne.

La borne de terre des parafoudres installés au voisinage du matériel doit être reliée à la terre du poste par un conducteur aussi court que possible. Les parafoudres installés au point de jonction du câble doivent être mis à la terre et reliés au point de jonction à l'enveloppe du câble lorsque ce dernier comporte une enveloppe métallique. Pour éviter les courants de circulation dans les enveloppes de câble, il se peut qu'il ne soit pas souhaitable de les relier également à la terre du côté du matériel à protéger. Si le câble ne possède pas d'enveloppe métallique, le parafoudre de la jonction doit être mis à terre en ce point et relié à la terre du poste au moyen d'un connecteur posé au voisinage du câble.

3.6.4.1.2 *Parafoudres installés uniquement près du matériel*

Si les parafoudres sont installés près du matériel, on doit rechercher jusqu'à quel point l'isolation à la jonction du câble et de la ligne aérienne sera protégée.

3.6.4.1.3 *Parafoudres installés uniquement à la jonction du câble et de la ligne aérienne*

Si les parafoudres sont installés uniquement à la jonction du câble et de la ligne aérienne, on doit rechercher jusqu'à quel point l'isolation du matériel sera protégée. La protection dépend dans ce cas de facteurs tels que la tenue aux ondes de choc de l'installation à protéger, de la classe et de la tension nominale du parafoudre au point de jonction, de la longueur du câble, et de l'absence ou de la présence de fils de garde sur la ligne. Pour la détermination précise de la longueur maximale admissible du câble, pour laquelle la protection de l'isolation du matériel est encore assurée, se reporter à la littérature existante et/ou également faire procéder à une étude par des personnes bien versées dans cette technique. De bons résultats peuvent être obtenus par des études du réseau au moyen de la méthode analogique.

Une méthode graphique de calcul des longueurs de câble admissibles est à l'étude et pourra être ajoutée comme annexe D, à une date ultérieure.

3.6.5 *Protection des points neutres des transformateurs isolés de la terre*

3.6.5.1 *Généralités*

Ceci s'applique aux groupes de transformateurs connectés en étoile, et dont le(s) point(s) neutre(s) est(sont) isolé(s) de la terre ou mis à la terre par l'intermédiaire d'une impédance élevée. Des ondes de surtension peuvent apparaître au point neutre à la suite de la propagation à travers l'enroulement des surtensions aux bornes. Avec des lignes sur poteaux en bois du type sans mise à la terre, ces surtensions peuvent atteindre des valeurs élevées. Tous les points neutres sortis par l'intermédiaire d'un isolateur de traversée doivent être protégés par des parafoudres. Dans le cas des transformateurs avec isolation graduée décroissant vers le neutre, il est encore plus important d'assurer la protection.

Bien que les courants à travers le parafoudre, dus aux surtensions atmosphériques ou aux surtensions de manœuvre ne soient pas très élevés (jusqu'à 1 000 A), il y a lieu de tenir compte de la durée plus longue de ces courants.

3.6.5.2 *Choisir et installer les parafoudres*

Installer entre la borne de neutre et la terre (c'est-à-dire la borne de terre du transformateur) le parafoudre choisi selon le paragraphe 3.4. La tension nominale du parafoudre sera

tations of space for the arresters at the equipment may also make application at the junction desirable.

In the case of unshielded lines, it may be advantageous to mount additional protective devices a few spans before the overhead line-cable junction.

The arresters installed at the equipment should be connected to the station earth with the shortest possible lead. Arresters installed at the cable junction should be earthed and interconnected at the junction with the cable sheath if a metallic sheath is used. For the prevention of circulating currents in the cable sheaths it may not be desirable to earth these at the equipment end also. If the cable has a non-metallic sheath, the arrester at the junction should be earthed at the junction and interconnected with the station earth by a conductor installed adjacent to the cable.

3.6.4.1.2 *Arrester located only at equipment*

If the arresters are located only at the equipment, consideration should be given as to whether the insulation at the overhead line-cable junction will be protected.

3.6.4.1.3 *Arrester located only at overhead line-cable junction*

If arresters are installed only at the overhead line-cable junction, consideration should be given as to whether the insulation of the equipment will be protected. The protection depends on factors such as the impulse withstand strength of the insulation to be protected, the class and voltage rating of the arrester at the junction, the length of the cable and whether or not the overhead line is shielded. For precise determination of the maximum permissible cable length up to which protection will be provided to the equipment insulation, refer to the existing literature and/or have a study made by those well versed in the art. Good results can be achieved by analogue network studies.

A graphical method for calculation of permissible cable lengths is being considered which may be added as Appendix D at a later date.

3.6.5 *Protection of transformer unearthed neutral(s)*

3.6.5.1 *General*

This applies to star (Y)-connected transformer banks, the neutral(s) of which is (are) isolated or earthed through a high impedance. Surge voltage may appear on the neutral as a result of overvoltage at the line terminals propagating through the transformer windings. With wood pole lines of unearthed construction this voltage can be very high. All neutral points brought out through a bushing should be protected by lightning arresters. In the case of transformers with insulation graded toward the neutral point, it is even more important to provide protection.

Although the currents through the arrester due to lightning and switching overvoltages are small (up to 1 000 A), account must be taken of their longer duration..

3.6.5.2 *Select and install the arresters*

Install the arrester between the neutral terminal and earth (i.e. the transformer earth terminal) selecting it as directed in Sub-clause 3.4. The arrester rating should be at least 0.7

au moins égale à 0,7 fois la tension entre phases la plus élevée du réseau ($0,7 U_m$) sous réserve que le transformateur soit prévu pour la pleine isolation.

Pour la classification des transformateurs à isolation graduée, consulter les tableaux C I et C II. On peut obtenir du constructeur des renseignements concernant la protection.

TABLEAU C I
Catégories d'isolations graduées

Catégorie	Conditions de mise à la terre
1	L'extrémité de l'enroulement côté neutre est directement reliée à la terre par une connexion ne comprenant aucune adjonction volontaire d'impédance. <i>Note.</i> — La liaison à la terre par l'intermédiaire d'un transformateur de courant répond à cette condition.
2	L'extrémité de l'enroulement côté neutre est reliée à un transformateur de réglage dont le neutre est ou n'est pas relié à la terre et est muni d'un dispositif approprié de limitation de la tension.
3	Le point neutre de l'enroulement n'est pas relié ou est relié à la terre à l'aide d'une impédance ou d'une résistance avec un dispositif approprié de limitation de la tension branché entre le point neutre de l'enroulement et la terre.
4	Le point neutre de l'enroulement est relié à la terre par l'intermédiaire d'une bobine d'extinction avec un dispositif approprié de limitation de la tension branché entre le point neutre d'un enroulement et la terre.

TABLEAU C II
Niveaux d'isolement des extrémités des enroulements côté neutre de transformateurs à isolation graduée

(Pour des tensions les plus élevées de réseaux égales ou supérieures à 72,5 kV)

Isolation par rapport à la terre	Tension à fréquence industrielle d'une source séparée kV eff
Catégorie 1	38
Catégorie 2	$\text{ENR} + (\text{ELT} - \text{ENR}) \times \frac{\text{tension complémentaire du transformateur de réglage}}{\text{tension nominale de l'enroulement du transformateur avec un minimum de 38 kV}}$ ENR tension d'essai du point neutre du transformateur de réglage ELT tension d'essai de l'extrémité côté ligne de l'enroulement du transformateur
Catégorie 3	35 à 65 % de la tension d'essai côté ligne déterminée en fonction des caractéristiques du matériel et du réseau
Catégorie 4	58 à 65 % de la tension d'essai côté ligne

Notes 1. — En choisissant la catégorie d'isolation du neutre, on doit tenir compte des possibilités de modification ultérieure de la mise à la terre du neutre et des changements de transformateurs.

2. — Demander au constructeur la tenue au choc correspondant à ces tensions à fréquence industrielle.

times the highest phase-to-phase voltage of the system ($0.7 U_m$), provided the transformer is fully insulated.

For transformers with graded insulation, refer to Tables C I and C II for classification of these transformers. Information on protection should be obtained from the manufacturer.

TABLE C I
Categories of graded insulation

Category	Recognized conditions of earthing
1	Neutral end of winding, solidly connected to earth through a connection where no impedance has been added intentionally. <i>Note.</i> — The connection to earth via a current transformer is deemed to meet this condition.
2	Neutral end of winding connected to a regulating transformer whose neutral is or is not connected to earth and is provided with an appropriate voltage-limiting device.
3	Neutral point of winding not connected, or connected to earth via an impedance or a resistance, with an appropriate voltage-limiting device connected between the neutral point of the winding and earth.
4	Neutral point of the winding connected to earth via an arc-suppression coil with a suitable voltage-limiting device between the neutral point of a winding and earth.

TABLE C II

Insulation levels for the neutral ends of windings of transformers having graded insulation

(For system highest voltages of 72.5 kV and above)

Insulation to earth	Separate-source power-frequency voltage kV r.m.s.
Category 1	38
Category 2	$ENR + (ELT - ENR) \times \frac{\text{additional voltage due to regulating transformer}}{\text{rated voltage of the transformer winding with a minimum of 38 kV}}$ ENR test voltage of neutral point of regulating transformer ELT test voltage of the line end of the transformer winding
Category 3	35 to 65 % of the test voltage of the line end, determined according to the characteristics of the apparatus and the system
Category 4	58 to 65 % of the test voltage of the line end

Notes 1. — When choosing the category of neutral insulation, the possibility that the neutral earthing may be altered at a later stage or that transformers may be interchanged, should be considered.

2. — Obtain the equivalent impulse strength for these power-frequency voltages from the manufacturer.

3.6.5.3 Comparer le niveau de protection aux ondes de choc avec la tenue de l'isolation

Comparer le niveau de protection aux ondes de choc du parafoudre, c'est-à-dire dans ce cas, la tension d'amorçage au choc, avec la tenue de l'isolation du matériel. Le niveau de protection ne doit pas être supérieur à 0,833 fois la tenue aux ondes de choc en onde pleine de l'isolation au point neutre.

4. Protection des autres matériels

4.1 Protection des enroulements série des matériels tels que transformateurs survolteurs-dévolteurs, réactances, transformateurs de courant, etc.

Il est parfois indiqué d'assurer une protection contre les surtensions aux bornes des enroulements série de certains matériels.

4.1.1 Choix du parafoudre (voir au paragraphe 3.4.1 le choix de la classe de parafoudre)

Choisir un parafoudre dont la tension nominale soit au moins égale à la tension maximale à fréquence industrielle susceptible d'apparaître aux bornes de l'enroulement série dans des conditions de défaut.

4.1.2 Emplacement du parafoudre

Installer le parafoudre au voisinage immédiat des bornes du matériel.

4.2 Protection du matériel à isolation solide

Les matériels à isolation solide couverts par ce paragraphe comprennent des appareils tels que les transformateurs du type sec et les machines tournantes, dont l'isolation a une tenue aux ondes de choc en onde pleine inférieure à celle des matériels immergés dans un isolant liquide. Généralement la tenue aux ondes de choc de courte durée est considérée comme étant la même, ou presque la même que la tenue aux ondes de choc en onde pleine.

4.2.1 Protection des transformateurs secs

4.2.1.1 Appliquer la marche à suivre de l'article 3, y compris le choix du parafoudre comme il est indiqué au paragraphe 3.4.

4.2.1.2 Comparer le niveau de protection aux amorçages sur front d'onde du parafoudre avec la tenue aux ondes de choc en onde pleine du transformateur, ou à la tension aux ondes de choc de durées plus courtes, pour lesquelles des valeurs plus élevées sont indiquées par le constructeur. Le rapport de protection minimal entre la tenue aux ondes de choc et le niveau de protection recommandé au paragraphe 3.6.1 est 1,2.

Note. — Aucun essai pour la vérification de la tenue aux ondes de choc des transformateurs secs n'a été normalisé par la CEI.

4.2.2 Protection des machines tournantes (lorsqu'elle est nécessaire)

4.2.2.1 Pour les machines reliées à des lignes aériennes soit directement, soit par l'intermédiaire de courtes longueurs de câble:

- a) installer aux bornes de la machine, entre ligne et terre, à la fois des condensateurs pour étaler le front de l'onde jusqu'à environ 10 microsecondes ou plus et des parafoudres pour assurer une protection supplémentaire. Installer également des parafoudres sur la ligne aérienne avant la machine, ou au point de jonction entre la ligne et le câble;

3.6.5.3 Compare the impulse protective level with insulation withstand strength

Compare the impulse protective level of the arrester, namely the impulse sparkover voltage in this case, with the equipment insulation withstand strength. The impulse protective level should be not more than 0.833 times the full-wave impulse withstand strength of the insulation at the neutral.

4. Protection of other equipment

4.1 Protection of series windings of equipment such as booster transformers, reactors, current transformers, and so forth

Sometimes it is expedient to provide surge protection across the series windings of equipment.

4.1.1 Selection of arrester (See Sub-clause 3.4.1 for choice of arresters class.)

Select the arrester having a standard voltage rating which is equal to or greater than the maximum power-frequency voltage that will appear across the series winding under fault conditions.

4.1.2 Location of arrester

Install the arrester close to the terminals of the equipment.

4.2 Protection of dry-type insulated equipment

The dry-type insulated equipment covered by this paragraph includes such apparatus as dry-type transformers and rotating machines which have full-wave impulse withstand insulation strengths lower than those of liquid-immersed equipments. Generally the impulse withstand strengths with waves of short duration are considered to be the same, or nearly the same, as the full-wave impulse withstand strength.

4.2.1 Protection of dry-type transformers

4.2.1.1 Apply the procedure of Clause 3 including selection of the arrester as directed in Sub-clause 3.4.

4.2.1.2 Compare the front-of-wave impulse sparkover protective level of the arrester with the full-wave impulse withstand insulation strength of the transformer, or the impulse withstand strength for any shorter durations for which higher values are given by the manufacturer. The minimum protective ratio between insulation withstand strength and protective level recommended in 3.6.1 is 1.2.

Note. — No tests for the impulse insulation strength of dry-type transformers have been standardized by IEC.

4.2.2 Protection of rotating machines (when required)

4.2.2.1 For machines connected to overhead lines either directly or through a short length of cable:

- a) install, at the machine terminals between line and earth, both capacitors to slope off the wave-front to approximately 10 microseconds or more and arresters to provide additional protection. Also connect arresters on the overhead lines ahead of the machine location or at an overhead line-cable junction point;

- b) choisir la tension nominale et la classe du parafoudre suivant les indications du paragraphe 3.4;
- c) comparer la tenue aux ondes de choc en onde pleine de l'isolation ou la valeur recommandée par le constructeur au niveau de protection aux ondes de choc du parafoudre afin d'obtenir un rapport de protection approprié (voir paragraphe 3.6.1).

4.2.2.2 Pour les machines reliées à des lignes aériennes par l'intermédiaire de transformateurs. Dans certains cas, ces installations ne nécessitent pas de protection ou bien on peut se passer des condensateurs aux bornes des machines tournantes. Dans d'autres cas, par exemple avec des transformateurs étoile-triangle, une meilleure protection peut être assurée en montant un deuxième jeu de parafoudres entre les phases. Il est conseillé de consulter la littérature technique à ce sujet, ou de procéder à des recherches à l'oscillographe à répétition.

Quand des parafoudres sont installés aux bornes de la machine, suivre la marche du paragraphe 4.2.2.1 ci-dessus.

Note. — La tenue aux ondes de choc des machines n'a pas été normalisée jusqu'à présent, et aucune normalisation n'est envisagée dans un avenir immédiat. Pour les questions de coordination, s'en rapporter au constructeur de la machine. Si aucune valeur précise n'est connue, on prend généralement comme tenue aux ondes de choc de la machine tournante la valeur de crête de la tension d'essai alternative.

5. Surtensions de manœuvre susceptibles d'entraîner le fonctionnement du parafoudre

5.1 Classification d'après la cause des surtensions de manœuvre

Des surtensions constituant un problème de la coordination des isolements (voir paragraphe 3.6.2.3.3) et susceptibles de surcharger le parafoudre lorsqu'il s'amorce peuvent être produites par les opérations de coupure de différentes manières. Elles peuvent être causées principalement soit par le comportement propre de l'appareil de coupure, soit par des conditions propres au réseau et au circuit pendant et après la coupure.

5.1.1 Surtensions de manœuvre dues au comportement propre de l'appareil de coupure

- a) coupure de courants inductifs par les disjoncteurs;
l'interruption d'un courant inductif, telle que l'interruption du courant magnétisant d'un transformateur, peut provoquer des surtensions quand le courant est forcé de s'annuler par l'action intérieure du disjoncteur avant son passage naturel par zéro;
- b) réamorçages du disjoncteur durant l'interruption de courants capacitifs lors de la coupure de longues lignes, de câbles ou de batteries de condensateurs;
- c) réamorçages des sectionneurs au moment de la mise hors circuit des jeux de barres;
- d) préamorçages à la mise sous tension de circuits capacitifs au moyen de sectionneurs.

5.1.2 Surtensions de manœuvre et tensions dues aux conditions propres au réseau et au circuit

- a) mise sous tension d'une ligne ou d'un ensemble ligne-transformateur (pas de charge initiale sur la ligne);
- b) refermeture sur une ligne avec charge statique restante;
- c) mise sous tension, mise hors circuit ou suppression de la charge d'un ensemble ligne-transformateur (surtensions harmoniques);
- d) amplifications de tension lors de la fermeture ou des réamorçages. Des tensions transitoires élevées se produisent en des points éloignés de celui où s'effectue la manœuvre;
- e) mise hors circuit sur les trois phases de lignes défectueuses à une extrémité seulement, ou manque de simultanéité de l'ouverture aux deux extrémités, notamment dans le cas des lignes ayant un défaut à la terre;

- b) select the voltage rating and class of arrester as directed in Sub-clause 3.4;
- c) compare the full-wave impulse insulation strength of the insulation or the value as recommended by the manufacturer, with the impulse protective level of the arrester for a suitable protective ratio. (See Sub-clause 3.6.1.)

4.2.2.2 For machines connected to overhead lines through transformers, in some cases installations may not require protection, or the capacitors can be omitted at the machine terminals. In some cases, for instance, with star (Y)-delta (D) transformers, better protection can be obtained by a second set of arresters connected between phases. It is suggested that the literature on this subject can be consulted or an investigation can be made with recurrent-surge oscillograph.

When arresters are installed at the machine terminals, follow the procedure in Sub-clause 4.2.2.1.

Note. — The impulse insulation strength of rotating machines has not been standardized and no standardization is contemplated in the immediate future. For treatment of the co-ordination problem refer to the manufacturer of the machine. It is usual to take the peak value of the a.c. test voltage as the impulse insulation strength of the rotating machine, in the absence of more precise information.

5. Switching surges liable to cause operation of the arrester

5.1 *Classification of cause of switching surges*

Overvoltages which are a problem in insulation co-ordination (see Sub-clause 3.6.2.3.3) and may overstress the arrester when it sparks over, can be produced by switching in several ways. They may be caused primarily by a behaviour inherent in the switch or by the conditions inherent in the system and circuit during and after switching.

5.1.1 *Switching surges from inherent switch action*

- a) chopping of inductive currents by circuit-breakers;
the interruption of an inductive current such as the interruption of magnetizing current of the transformer can cause overvoltages when the current is forced to zero by the action within the switch before normal current zero;
- b) restriking by the circuit-breaker during the interruption of capacitive currents when disconnecting long lines, cables or capacitor banks;
- c) restriking by disconnect switches when disconnecting busbars;
- d) prestriking on energizing capacitive circuits by disconnect switches.

5.1.2 *Switching surges and voltages from circuit and system conditions*

- a) energization of line or unit-connected line and transformer (no initial charge on the line);
- b) reclosing on line with trapped charge;
- c) energization, de-energization or load rejection of unit-connected line and transformer (harmonic overvoltages);
- d) voltage magnification upon closing or restriking. Higher transient voltages are produced at a point remote from the point of switching;
- e) 3-phase clearing of faulted lines at one end only, or lack of simultaneous opening at both ends, particularly with line-to-earth faults;