

# RAPPORT TECHNIQUE TECHNICAL REPORT

CEI  
IEC  
**TR 62068-2**

Première édition  
First edition  
2001-08

**Systèmes d'isolation électrique –  
Contraintes électriques produites par  
des impulsions de tension appliquées  
périodiquement –**

**Partie 2:  
Etat de l'art**

**(<https://standards.iteh.ai>)**

**Electrical insulation systems (EIS) –  
Electrical stresses produced  
by repetitive impulses –**

**Part 2:  
State of the art**

<https://standards.iteh.ai/x/01/00/standards/1cc/a0155bc3-0047-4af8-af95-ec48c61bd3e1/iec-tr-62068-2-2001>



Numéro de référence  
Reference number  
CEI/IEC/TR 62068-2:2001

## Numérotation des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000. Ainsi, la CEI 34-1 devient la CEI 60034-1.

## Editions consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

## Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique. Des renseignements relatifs à cette publication, y compris sa validité, sont disponibles dans le Catalogue des publications de la CEI (voir ci-dessous) en plus des nouvelles éditions, amendements et corrigenda. Des informations sur les sujets à l'étude et l'avancement des travaux entrepris par le comité d'études qui a élaboré cette publication, ainsi que la liste des publications parues, sont également disponibles par l'intermédiaire de:

- **Site web de la CEI ([www.iec.ch](http://www.iec.ch))**
- **Catalogue des publications de la CEI**

Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI ([www.iec.ch/catlg-f.htm](http://www.iec.ch/catlg-f.htm)) vous permet de faire des recherches en utilisant de nombreux critères, comprenant des recherches textuelles, par comité d'études ou date de publication. Des informations en ligne sont également disponibles sur les nouvelles publications, les publications remplaçées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.

- **IEC Just Published**

Ce résumé des dernières publications parues ([www.iec.ch/JP.htm](http://www.iec.ch/JP.htm)) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.

- **Service clients**

Si vous avez des questions au sujet de cette publication ou avez besoin de renseignements supplémentaires, prenez contact avec le Service clients:

Email: [custserv@iec.ch](mailto:custserv@iec.ch)  
Tél: +41 22 919 02 11  
Fax: +41 22 919 03 00

## Publication numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

## Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

## Further information on IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology. Information relating to this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is also available from the following:

- **IEC Web Site ([www.iec.ch](http://www.iec.ch))**
- **Catalogue of IEC publications**

The on-line catalogue on the IEC web site ([www.iec.ch/catlg-e.htm](http://www.iec.ch/catlg-e.htm)) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. Online information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.

- **IEC Just Published**

This summary of recently issued publications ([www.iec.ch/JP.htm](http://www.iec.ch/JP.htm)) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.

- **Customer Service Centre**

If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:

Email: [custserv@iec.ch](mailto:custserv@iec.ch)  
Tel: +41 22 919 02 11  
Fax: +41 22 919 03 00

# RAPPORT TECHNIQUE TECHNICAL REPORT

**CEI**  
**IEC**

# TR 62068-2

Première édition  
First edition  
2001-08

# Systèmes d'isolation électrique – Contraintes électriques produites par des impulsions de tension appliquées périodiquement –

## Partie 2: Etat de l'art

Etat de l'art  
(<https://standards.iteh.ai>)

## ~~Electrical insulation systems (EIS) – Electrical stresses produced by repetitive impulses –~~

<https://standards.itech.ai/standards/iec-tr-62068-2-2001>

## ~~Part 2: State of the art~~

© IEC 2001 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

International Electrotechnical Commission  
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembé Geneva, Switzerland  
c.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale  
International Electrotechnical Commission  
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX  
PRICE CODE

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

## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS ..... 4

0	Introduction .....	8
0.1	Vue d'ensemble.....	8
0.2	Recherches associées aux développements de l'électronique de puissance .....	8
1	Domaine d'application .....	10
2	Génération des impulsions de surtension de choc .....	10
3	Phénomènes physiques liés au vieillissement.....	10
3.1	Décharges partielles (DP) .....	10
3.2	Effet de la polarité des tensions d'impulsion .....	10
3.3	Effet de la fréquence des tensions d'impulsion .....	12
3.4	Chargement de la surface .....	12
3.5	Autres effets importants .....	12
4	Machines tournantes .....	12
4.1	Etudes générales .....	12
4.2	Identification de la tension (des contraintes).....	12
4.3	Modélisation.....	12
4.3.1	Distribution de tension .....	12
4.3.2	Vieillissement multicontraintes .....	12
4.4	Phénomènes physiques.....	14
4.5	Autres études associées .....	24
4.5.1	Décharges partielles .....	24
4.5.2	Mesures en ligne .....	26
4.5.3	Mesures hors ligne .....	26
4.5.4	Guide de fiabilité .....	26
5	Autre systèmes électriques.....	26
5.1	Transformateurs .....	26
5.2	Appareillage à isolation gazeuse (GIS).....	28
5.3	Câbles d'alimentation .....	28

## CONTENTS

FOREWORD .....	5
0 Introduction .....	9
0.1 Overview .....	9
0.2 Research trend due to power electronics development .....	9
1 Scope .....	11
2 Generation of overvoltage surges .....	11
3 Physical ageing phenomena .....	11
3.1 Partial discharges (PD) .....	11
3.2 Effect of the polarity of pulse voltages .....	11
3.3 Effect of frequency of pulse voltages .....	13
3.4 Surface charging .....	13
3.5 Other important effects .....	13
4 Rotating machines .....	13
4.1 General studies .....	13
4.2 Voltage (stress) identification .....	13
4.3 Modelling .....	13
4.3.1 Voltage distribution .....	13
4.3.2 Multistress aging .....	13
4.4 Physical Studies .....	15
4.5 Other related studies .....	25
4.5.1 Partial discharges .....	25
4.5.2 On-line measurements .....	27
4.5.3 Off-line measurements .....	27
4.5.4 Reliability guidelines .....	27
5 Other electrical systems .....	27
5.1 Transformers .....	27
5.2 Gas Insulated Switchgear (GIS) .....	29
5.3 Power cables .....	29

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**SYSTÈMES D'ISOLATION ÉLECTRIQUE –  
CONTRAINTE ÉLECTRIQUE PRODUITES PAR DES IMPULSIONS DE  
TENSION APPLIQUÉES PÉRIODIQUEMENT –**

**Partie 2: Etat de l'art**

**AVANT-PROPOS**

- 1) La CEI (Commission Électrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, spécifications techniques, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent rapport technique peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La tâche principale des comités d'études de la CEI est l'élaboration des Normes internationales. Toutefois, un comité d'études peut proposer la publication d'un rapport technique lorsqu'il a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales, cela pouvant comprendre, par exemple, des informations sur «l'état de l'art».

La CEI 62068-2, qui est un rapport technique, a été établie par le comité d'études 98 de la CEI: Systèmes d'isolation électrique (SIE)

Le texte de ce rapport technique est issu des documents suivants:

Projet d'enquête	Rapport de vote
98/122/CDV	98/129/RVC

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

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 3.

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**ELECTRICAL INSULATION SYSTEMS (EIS) –  
ELECTRICAL STRESSES PRODUCED BY REPETITIVE IMPULSES –****Part 2: State of the art****FOREWORD**

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical specifications, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this technical report may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

<https://standards.iec.ch/IEC/standards/102/iec62068-2-2001>

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. However, a technical committee may propose the publication of a technical report when it has collected data of a different kind from that which is normally published as an International Standard, for example, "state of the art".

IEC 62068-2, which is a technical report, has been prepared by IEC technical committee 98: Electrical insulation systems (EIS).

The text of this technical report is based on the following documents:

Enquiry draft	Report on voting
98/122/CDV	98/129/RVC

Full information on the voting for the approval of this technical report can be found in the report on voting indicated in the above table.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 3.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication restera inchangée jusqu'en 2004. A cette date, la publication sera:

- confirmée,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

Ce document, purement informatif, ne doit pas être considéré comme une Norme internationale.



The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2004.  
At this date, the publication will be

- reconfirmed;
- withdrawn;
- replaced by a revised edition, or
- amended.

This document which is purely informative is not to be regarded as an International Standard.



## 0 Introduction

### 0.1 Vue d'ensemble

Une série de recommandations faisant partie de la CEI 62068 sera développée pour permettre l'évaluation des systèmes d'isolation électriques (SIE) sous contraintes électriques produites par des impulsions de tension appliquées périodiquement, et provenant de dispositifs d'électronique de puissance comme les onduleurs de tension.

L'influence de l'application de ces impulsions répétitives sur les systèmes d'isolation électrique (SIE) a été étudiée de manière approfondie et a été révisée au cours de la dernière décennie (voir par exemple la référence [1])<sup>1)</sup>. Cependant, les phénomènes de vieillissement dus aux tensions de choc ne sont encore pas bien compris et restent controversés comme par exemple pour le développement de tests d'évaluation.

### 0.2 Recherches associées aux développements de l'électronique de puissance

Récemment, des composants haute tension et hautes fréquences comme les IGBT (Transistor bipolaire à grille isolée: Insulated gate bipolar transistor) ont été développés et utilisés comme par exemple les transmissions pour moteur.

Les systèmes d'isolation électrique utilisés dans les appareils alimentés par convertisseurs comme les bobinage de moteur, sont exposés à plusieurs tensions de chocs répétées associées à des fronts de tension rectangulaires soumis à une modulation de largeur d'impulsion (MLI), et la durée de vie peut rapidement être réduite par des processus de vieillissements thermiques et/ou électriques. Le nombre d'articles sur ce sujet a rapidement augmenté dans les années 1990 et dans le monde entier. Plus particulièrement, les caractéristiques du vieillissement et les mécanismes induits ont intensivement été mesurés et étudiés sur des systèmes d'isolation comprenant des fils émaillés, des vernis et des films utilisés dans les moteurs Basse Tension, mais aussi sur des isolants de câbles destinés aux moteurs linéaires. De nombreux articles ont été préparés sur la rupture diélectrique des transformateurs et des appareillages à isolation gazeuse (GIS = Gaz Insulated Switchgear) provoquée par la résonance entre ces appareils, en haute fréquence.

<https://www.iec.ch/standards/62068-2-2001> 8c61bd3e1/iec-tr-62068-2-2001

1) Le chiffre entre crochets se réfère à la bibliographie.

## 0 Introduction

### 0.1 Overview

A series of parts of IEC 62068 will be developed for the evaluation of electrical insulation systems (EIS) under electrical stresses produced by repetitive impulses from power electronics devices such as inverters.

The influence of these repetitive impulses on electrical insulation systems (EIS) has been intensively investigated and reviewed in the last decade (see for example reference [1])<sup>1)</sup>. Nevertheless, the ageing phenomena due to the surges are not yet well understood and controversial as to evaluation testing.

### 0.2 Research trend due to power electronics development

Recently, high-voltage high-frequency power devices such as IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) have been developed and applied as motor drives.

Electrical insulation systems of inverter-fed apparatus such as motor windings are exposed to repetition of periodic surges coming from rectangular voltage under Pulse Width Modulation (PWM), and the insulation life may be shortened through thermal and/or electrical ageing. The number of papers on the subject increased rapidly in the 1990s all over the world. In particular, the ageing characteristics and mechanisms have been intensively measured and investigated on insulation systems including magnet wires, varnish and films used in low-voltage motors in addition to cable insulation for Maglev linear motors. Several papers have been prepared on the electrical breakdown of the transformer and GIS (Gas Insulated Switchgear) due to the resonance between the apparatus with high frequency.

<https://standards.iteh.ai/x010/standards/iec/a0155bc3-0047-4af8-af95-ec48c61bd3e1/iec-tr-62068-2-2001>

<sup>1)</sup> The figures in square brackets refer to the bibliography.

# SYSTÈMES D'ISOLATION ÉLECTRIQUE – CONTRAINTE ÉLECTRIQUE PRODUITES PAR DES IMPULSIONS DE TENSION APPLIQUÉES PÉRIODIQUEMENT –

## Partie 2: Etat de l'art

### 1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 62068 est un rapport technique qui traite du dernier état de l'art connu des travaux de recherches développés sur les phénomènes induits par les contraintes électriques produites par des impulsions de tension appliquées périodiquement. Ce rapport vise à obtenir d'une part une meilleure compréhension des phénomènes induits et d'autre part à établir des méthodes d'évaluation fiables.

### 2 Génération des impulsions de surtension de choc

Les phénomènes de réflexion des impulsions de choc produites par la commutation d'un onduleur placé en extrémité d'un câble peuvent provoquer le doublement, voire le triplement de la valeur initiale de la tension crête appliquée [2] [3]. Cette multiplication dépend des conditions existant dans le circuit électrique, et sa valeur crête s'atténue pendant la propagation. La distribution du potentiel dans le bobinage des moteurs n'est pas non plus linéaire comme on le verra en 4.3.1. Comme la valeur  $dV/dt$  de la tension de choc de l'onduleur augmente, le rapport du potentiel dans la première spire des bobinages du côté ligne augmente.

### 3 Phénomènes physiques liés au vieillissement

La compréhension des mécanismes de défaillance sous contraintes impulsionnelles répétées peut conduire à la proposition de méthodes d'évaluation de meilleure qualité.

Un travail très important a été réalisé et a permis de déduire que les ruptures d'isolation étaient dues à un effet synergique de l'action des décharges partielles, de l'échauffement diélectrique et de la création d'une charge d'espace. Chaque analyse est plus ou moins en relation avec les phénomènes qui suivent. Bien que la référence détaillée ne soit pas donnée dans ces paragraphes, l'analyse de la partie suivante consacrée aux machines tournantes peut être source utile d'informations.

#### 3.1 Décharges partielles (DP)

Les décharges partielles (DP) peuvent être un des mécanismes les plus défavorables aux systèmes d'isolation électriques. Les SIE des appareils basse tension comme les moteurs ont été conçus pour fonctionner sans décharge partielle avec des tensions alternatives inférieures au seuil d'apparition des décharges. Avec des impulsions de surtension, cependant, ces conditions d'absence de décharges partielles ne durent en général pas.

#### 3.2 Effet de la polarité des tensions d'impulsion

L'effet de la polarité de la tension a été étudié avec un train d'impulsions bipolaires ou unipolaires (positives ou négatives). Le temps jusqu'à la rupture pour des impulsions positives est plus long que pour des impulsions négatives. La rupture se produit encore plus rapidement en bipolaire. Ce phénomène peut s'expliquer par la différence existante dans la formation de la charge d'espace.

## ELECTRICAL INSULATION SYSTEMS (EIS) – ELECTRICAL STRESSES PRODUCED BY REPETITIVE IMPULSES –

### Part 2: State of the art

#### 1 Scope

This part of IEC 62068 is a technical report dealing with the latest available state of the art of the research on the phenomena induced by the electrical stresses produced by repetitive impulses. This report aims at a better understanding and establishment of specified evaluation methods.

#### 2 Generation of overvoltage surges

The reflections of the switching surge from an inverter at the cable terminal may double or triple the value of the original peak voltage [2] [3]. The multiplication depends upon the circuit condition and the peak value attenuates during propagation. The potential distribution along motor windings is not linear as mentioned in 4.3.1. As the  $dV/dt$  of the inverter surge increases, the potential ratio in the first turn of line-side windings increases.

#### 3 Physical ageing phenomena

The understanding of failure mechanisms under repetitive impulse conditions can lead to better evaluation methods.

Extensive work has been carried out and indicated that the failures of insulation are due to a synergistic effect of partial discharge, dielectric heating and space charge formation. Each report is more or less related to the following phenomena. Although the detailed citation is not given in these subclauses, the analysis in the next clause on rotating machines may be useful.

##### 3.1 Partial discharges (PD)

Partial Discharges (PD) can be one of the most influential phenomena of electrical insulation systems. The EIS of low-voltage apparatus such as motors have been designed for PD-free operation under a.c. voltage lower than PD inception voltage. Under over-potential impulse condition, however, the PD-free condition does not stand in general.

##### 3.2 Effect of the polarity of pulse voltages

The polarity effect was examined under a bipolar and a unipolar pulse wave (positive and negative). The failure time under positive pulse is longer than that under negative pulses. The failure time under bipolar pulses is shortest. This phenomenon may be explained by the difference in space charge formation.

### 3.3 Effet de la fréquence des tensions d'impulsion

L'effet de la fréquence sur la durée de vie a été étudié. Au dessus d'une fréquence de seuil, le niveau de dégradation de l'isolation des fils augmente. Ce résultat a été expliqué par l'échauffement diélectrique dans la couche isolante.

### 3.4 Chargement de la surface

En utilisant des mesures de décroissance des charges sur différents matériaux diélectriques, le rôle de la polarité des impulsions est démontré [4].

### 3.5 Autres effets importants

Les effets de la température, de l'humidité, et/ou de l'air ambiant (tel que l'existence d'ozone) sont particulièrement étudiés du point de vue de leur impact sur la durée de vie des échantillons soumis à contraintes impulsionales répétitives.

## 4 Machines tournantes

### 4.1 Etudes générales

Ces références [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11] décrivent principalement les conséquences d'une alimentation basse tension par onduleur pour les machines tournantes. Différentes règles sont données et sont associées à la longueur du câble, la nature du composant de commutation. Leurs auteurs préconisent la normalisation des essais. La référence [9] détaille les règles de réparation ou les spécifications destinées aux machines asynchrones.

### 4.2 Identification de la tension (des contraintes)

Les transistors IGBT peuvent avoir des temps de montée entre 50 ns et 200 ns. Par conséquent il est présenté une nouvelle étude, dédiée à l'application des contraintes électriques des systèmes d'isolation résultant de la distribution non linéaire de la tension dans le bobinage des machines tournantes quand ces systèmes sont soumis à des trains d'ondes à front raide de forme carrées  $dV/dt$ , répétitives (plutôt qu'à des essais de formes d'onde impulsionale). Les amplitudes et les temps de montée des impulsions générées par des variateurs de vitesse (ASD: Adjustable Speed Drive), induites sur les bornes des machines, sont mesurées. Ces références [12] [13] [14] [15] [16] [10] [17] [18] présentent les résultats obtenus (généralement sur les machines tournantes) de la distribution des tensions tant dans le bobinage qu'aux bornes de connexion du moteur.

Ces références donnent également des lois de comportement pour la détermination de la longueur de câble ou pour l'installation de transistor IGBT.

### 4.3 Modélisation

#### 4.3.1 Distribution de tension

Ces références [19] [20] [21] [22] [23] [24] [25] donnent ou proposent des modèles capables d'expliquer la distribution de tension et la propagation des impulsions dans le bobinage en fonction de diverses caractéristiques de la machine (type de bobinage, type de câble, type d'email, diamètre du fil).

#### 4.3.2 Vieillissement multicontraintes

Ces références [26] [27] sont les premières tentatives d'une compréhension du vieillissement des matériaux isolants utilisés dans le bobinage quand ils sont alimentés par des onduleurs. Ils sont de nature très générale. Récemment, une nouvelle approche a été formulée, résumant les nouveaux développements dans ce domaine et proposant l'identification exacte du rôle de chacun des paramètres [28].