

TECHNICAL REPORT

RAPPORT TECHNIQUE

**Electrostatics –
Part 1: Electrostatic phenomena – Principles and measurements**

**Electrostatique –
Partie 1: Phénomènes électrostatiques – Principes et mesures**





THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2012 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, 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 either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester.

If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, 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 la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

Useful links:

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

The advanced search enables you to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...).

It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available on-line and also once a month by email.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) on-line.

Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: csc@iec.ch.

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Liens utiles:

Recherche de publications CEI - www.iec.ch/searchpub

La recherche avancée vous permet de trouver des publications CEI en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...).

Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

Just Published CEI - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et aussi une fois par mois par email.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) en ligne.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: csc@iec.ch.

TECHNICAL REPORT

RAPPORT TECHNIQUE

**Electrostatics –
Part 1: Electrostatic phenomena – Principles and measurements**

**Electrostatique –
Partie 1: Phénomènes électrostatiques – Principes et mesures**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX



ICS 17.200.99; 29.020

ISBN 978-2-83220-195-4

**Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

CONTENTS

FOREWORD.....	5
INTRODUCTION.....	7
1 Scope.....	8
2 Normative references	8
3 Terms and definitions	9
4 Fundamentals of static electricity.....	11
4.1 General.....	11
4.2 Contact electrification.....	12
4.3 Charging by induction.....	13
4.4 Charge transfer by conduction.....	14
4.5 Retention of charge.....	14
4.6 Influence of environmental humidity	16
4.6.1 General	16
4.6.2 In situ measurements	16
4.7 Electrostatic discharges	16
4.7.1 General	16
4.7.2 Spark discharges.....	16
4.7.3 Corona discharges	17
4.7.4 Brush discharges.....	17
4.7.5 Propagating brush discharges	17
4.7.6 Cone discharges.....	18
4.8 Mechanical forces in an electrostatic field	18
5 Electrostatic problems and hazards	19
5.1 General.....	19
5.2 Electronic components and systems.....	19
5.2.1 General	19
5.2.2 Types of failure.....	19
5.2.3 Problems and threats at different life cycle periods.....	20
5.3 Electrostatic ignition – Hazards	21
5.3.1 General	21
5.3.2 Spark discharges from conducting objects	21
5.3.3 Corona discharges from conducting objects.....	21
5.3.4 Brush discharges from insulating surfaces.....	21
5.3.5 Propagating brush discharges from insulating surfaces	22
5.3.6 Discharges from people.....	22
5.3.7 Ignition potential of electrostatic discharges	22
5.4 Physiological sensation	24
5.5 Simulation of electrostatic discharges.....	25
5.5.1 General	25
5.5.2 Capacitive discharges for ignition energy measurements.....	26
5.5.3 Human body model.....	26
5.5.4 Machine model	26
5.5.5 Charged device model.....	26
6 General solutions to problems and hazards	27

6.1	General	27
6.2	Common approaches.....	27
7	Useful applications of electrostatic effects	28
8	General aspects of measurements	29
8.1	General	29
8.2	Electric field	29
	8.2.1 General	29
	8.2.2 Application	30
8.3	Potential.....	30
	8.3.1 General	30
	8.3.2 Surface voltage	30
	8.3.3 Space potential	31
8.4	Charge	31
8.5	Charge density	32
	8.5.1 Surface charge density	32
	8.5.2 Volume charge density	32
8.6	Charge decay	33
8.7	Resistance and resistivity	34
8.8	Chargeability	34
8.9	Current.....	35
8.10	Energy in capacitive discharges	35
8.11	Ignition energy	36
	8.11.1 General	36
	8.11.2 Equivalent energy.....	36
8.12	Charge transferred in electrostatic discharges	37
	8.12.1 General	37
	8.12.2 Discharge electrode.....	38
	8.12.3 Measuring circuit	39
	8.12.4 Alternative charge transfer measuring arrangements	39
8.13	Capacitance	39
8.14	Electric strength	40
	Bibliography.....	41
	Figure 1 – Charging by induction	14
	Figure 2 – Charge transfer by conduction when objects 1 and 2 are conductors.....	14
	Figure 3 – Equivalent electrical circuit for an electrostatically charged conductor.....	15
	Figure 4 – Examples of brush discharge waveforms measured with a fast digital storage oscilloscope	24
	Figure 5 – Circuit for simulation of electrostatic discharges.....	25
	Figure 6 – Basic arrangements for measuring charge transferred in electrostatic discharges with alternative measuring circuits	38
	Figure 7 – Oscilloscope voltage/time traces	39

Table 1 – Example of triboelectric series.....	13
Table 2 – Typical electrical capacitances	17
Table 3 – Typical perception levels and physical responses of people to discharges based on a body capacitance of 200 pF	25
Table 4 – Typical values used in ESD simulation models	27

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ELECTROSTATICS –

**Part 1: Electrostatic phenomena –
Principles and measurements**

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of 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, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). 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. 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 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 IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

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/TR 61340-1, which is a technical report, has been prepared by IEC technical committee 101: Electrostatics.

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

Enquiry draft	Report on voting
101/344/DTR	101/355/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 2.

A list of all the parts in the IEC 61340 series, published under the general title *Electrostatics*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

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

INTRODUCTION

Static electricity has been known for around 2 500 years but until recently had little impact on humankind. More recently in the last century the nature of static electricity became better understood and the principles of charge separation and accumulation could be described. Despite this improved understanding, it remains difficult to predict with certainty the polarity and magnitude of charges built up in any situation due to the many factors involved, and to, many electrostatics remains a “black art” rather than a science.

The development of modern materials, especially polymers, and their nearly ubiquitous application in fields such as floor materials, furnishings, clothing and engineering materials, has made static electricity an everyday phenomenon. In some industries, such as electronics manufacture and processes using flammable materials, unintended and invisible electrostatic discharges can lead to substantial component damage or unreliability, or fires or explosions. In everyday life, experience of electrostatic shocks to personnel has become commonplace. This has led to increasing need to understand such phenomena, and to specify materials, equipment and procedures for use in preventing and controlling electrostatic problems in the human environment.

This technical report gives an overview of the field of electrostatics and has been prepared to give the user a view of the background, principles, methods of measurement and industrial applications prepared in conformity with IEC TC101 publications.

ELECTROSTATICS –

Part 1: Electrostatic phenomena – Principles and measurements

1 Scope

This part of IEC 61340, which is a technical report, describes the fundamental principles of electrostatic phenomena including charge generation, retention and dissipation and electrostatic discharges.

Methods for measuring electrostatic phenomena and related properties of materials are described in a general way.

Hazards and problems associated with electrostatic phenomena and principles of their control are outlined.

Useful applications of electrostatic effects are summarized.

The purpose of this technical report is to serve as a reference for the development of electrostatics related standards, and to provide guidance for their end-users.

2 Normative references

The following documents, in whole or in part, are normatively referenced in this document and are indispensable for its application. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60079-10-1, *Explosive atmospheres – Part 10-1: Classification of areas – Explosive gas atmospheres*

IEC 60079-10-2, *Explosive atmospheres – Part 10-2: Classification of areas – Combustible dust atmospheres*

IEC 61000-4-2, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test*

IEC 61340-5-1, *Electrostatics – Part 5-1: Protection of electronic devices from electrostatic phenomena – General requirements*

IEC 61340-5-2, *Electrostatics – Part 5-2: Protection of electronic devices from electrostatic phenomena – User guide*

IEC 60243-1, *Electrical strength of insulating materials – Test methods – Part 1: Tests at power frequencies*

IEC 60243-2, *Electric strength of insulating materials – Test methods – Part 2: Additional requirements for tests using direct voltage*

IEC 61241-2-3, *Electrical apparatus for use in the presence of combustible dust – Part 2: Test methods – Section 3: Method for determining minimum ignition energy of dust/air mixtures*

BS EN 13821, *Potentially explosive atmospheres. Explosion prevention and protection. Determination of minimum ignition energy of dust/air mixtures*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

3.1

antistatic additive

antistatic filler, antistatic treatment

substance added to, or process applied to a liquid or solid in order to reduce its tendency to acquire a charge by contact and rubbing, or to promote more rapid charge migration and so to reduce its ability to retain significant charge when in contact with earth

3.2

antistatic

material that inhibits or limits triboelectric charging

3.3

bonding

electrical connection between two or more conducting objects that reduces the potential difference between them to an insignificant level

3.4

breakdown

failure, at least temporarily, of the insulating properties of an insulating medium under electric stress

3.5

breakdown voltage

voltage at which breakdown occurs, under prescribed conditions of test or use

3.6

charge decay

neutralization or migration of charge across or through a material leading to a reduction of charge density or surface potential at the point where the charge is deposited

3.7

charge decay time

charge relaxation time

time taken for charge to decay from a specified value to a specified lower value

Note 1 to entry: The specified lower value is commonly one tenth or $1/e$ of the starting value ($e = 2,718$).

3.8

conductivity

ability of the substance to conduct electrical current expressed as $S \times m^{-1}$

**3.9
conductor or conductive material**

object or material providing a sufficiently high conductivity so that potential differences over any parts of it are not sufficiently large as to be of practical significance

Note 1 to entry: In general this is a material having a resistance below about $10^5 \Omega$ but different standards may define different resistance ranges for this term.

**3.10
dissipative material**

material which allows charge to migrate over its surface and/or through its volume in a time that is short compared to the timescale of the actions creating the charge or that will cause an electrostatic problem

Note 1 to entry: In general a material having a resistance approximately $10^5 \Omega$ and below approximately $10^{11} \Omega$ is considered to be dissipative. Different standards may disagree on the exact values of the limits.

**3.11
earth, earthing**

ground

electrical connection (bonding) of a conductor to the main body of the earth to ensure that it is at earth potential (see also ground/grounding)

**3.12
electrostatic discharge
ESD**

transfer of charge by direct contact or by breakdown from a material or object at a different electrical potential to its immediate surroundings

**3.13
explosion groups**

flammable gaseous atmospheres subdivided into explosion groups I, IIA, IIB and IIC to define their inflammability

Note 1 to entry: The most sensitive explosion group is Group IIC.

Note 2 to entry: See [9] to [11]¹ for definitions of classification method.

**3.14
flammable substance**

substance in the form of gas, liquid, solid or mixture of these, capable of propagating combustion when subjected to a sufficiently strong ignition source

**3.15
hazard threshold voltage**

minimum electrical potential of capacitive stored charge that may give rise to an electrostatic hazard

**3.16
hazardous area**

area in which flammable substance is, or may be expected to be, present in quantities such as to require special precautions against ignition

Note 1 to entry: Hazardous area zones are defined in IEC 60079-10-1 and IEC 60079-10-2.

¹ References in square brackets refer to the bibliography.

3.17**insulator**

insulative material

material with very low mobility of charge so that any charge on the surface will remain there for long time

Note 1 to entry: Connecting an insulator to earth does not help charge migration.

3.18**minimum ignition energy**

MIE

smallest amount of energy released in a capacitive electrical spark that can ignite a mixture of a specified flammable material with air or oxygen, according to a defined procedure

3.19**relaxation of charge**

migration or neutralization of charge over and/or through a solid, liquid or gaseous material causing a reduction in surface charge density and energy

Note 1 to entry: If the potential of a surface is defined then this is also reduced.

3.20**surface charge density**

σ_s

net quantity of charge per unit area of surface of a solid or liquid

3.21**surface resistivity**

Ω

resistance between opposing sides of a square on the surface of a material, that is for electric current flowing across a surface, the ratio of DC voltage drop to the surface current

3.22**triboelectric charging**

electrical charging process in which charge is generated by the contact and separation of two surfaces which may be solid, liquid or particle-carrying gases

3.23**volume charge density**

σ_v

net quantity of charge per unit volume of a solid, liquid or gas

3.24**volume resistivity**

$\Omega \times m$

resistance between opposing squares of 1 m³ of the material, i.e. the ratio of the d.c. voltage drop to the amount of current passing through the material

4 Fundamentals of static electricity**4.1 General**

Generally, electrostatic charge on a material, product or object is the result of:

- contact and rubbing;
- charge transfer;
- induction in an electric field;

- effect of polarization;
- photoelectric effect;
- pyroelectric effect;
- piezoelectric effect;
- ionization and ions adsorption;
- electrochemical processes.

However, the primary source of electrostatic charge is triboelectric charging. If two previously uncharged substances come into contact, charge transfer will, in general, occur at their common boundary. If a gas containing solid particles or liquid droplets in suspension becomes charged by contact and separation, then the gas can be seen as carrying an electrostatic charge. On separation, each surface will carry an additional charge of equal magnitude but of opposite polarity. Conducting or dissipative objects can become charged by induction if they reside in an electric field produced by other charged objects or conductors at high potential in their vicinity. Any object can become charged if charged particles or molecules accumulate on it.

It is very important to have some appreciation of these phenomena in order to enable the proper implementation of test procedures and unambiguous interpretation of the resultant data. It is also important with regard to choice of electrodes, protection of current measuring devices from the initial capacitive surge and the time at which the value is recorded. The latter should, of course, be appropriate to meet the practical circumstance for which the data are required. Further comments are included in this technical report with the descriptions of the individual test methods, where considered necessary.

4.2 Contact electrification

Contact electrification can occur at solid/solid, liquid/liquid or solid/liquid interfaces. Clean gases cannot charge materials in this way. If a gas contains solid particles or liquid droplets in suspension, however, these may be charged by contact so that such a gas can carry an electrostatic charge by virtue of these particles.

In the case of solids of different materials, initially uncharged and normally at earth potential, charge is transferred from one material to the other when they make contact. When they separate, a net positive charge remains on the one surface and a net negative charge on the other surface. The quantity of charge is increased by the size of the contact areas and the size is affected by the contact pressure. Additional rubbing also increases the effective contact area.

The relative amounts and polarity of charge transferred between materials can be presented as a list, referred to as the triboelectric series. A material is expected to charge positively against materials lower in the series, and negatively against materials higher in the series. It should be noted that the position of a material in the triboelectric series is an approximation, dependent on test conditions, and that two samples of the same material rubbed against each other can result in quite strong charging.

Examples of triboelectric series are shown in Table 1.

Table 1 – Example of triboelectric series

Item	Charge
Rabbit fur Glass Human hair Polyamide (nylon) Wool Fur Silk Aluminum Paper Cotton Steel Wood	Positive
Rubber Acetate rayon Polyethylene (PE) and polypropylene (PP) PET PVC Polyurethane PTFE	Negative

The two materials are oppositely charged and consequently there is an electric field between them. If the materials are then separated, measures shall be taken to overcome the attraction between the opposing charges and the potential difference between them increases linearly with distance. This higher potential difference tends to drive charge back to any point of residual contact. In the case of two conductors, the recombination of charges is virtually complete and no significant amount of charge remains on either material after separation. If one material, or both, is a non-conductor, the recombination cannot take place completely and the separating materials retain part of their charge. There may only be a small amount of charge involved but, because the distance between the charges when the surfaces are in contact is extremely small, the potential generated on separation can easily reach many kilovolts. Realistic surfaces are usually rough and so the charging is enhanced if the contact and separation involves rubbing and/or pressure, since the area of real contact is increased by these actions. Note that the real area of contact can be quite different in size from the appearing area of contact. They can differ by a magnitude or more.

Contact electrification in liquids is essentially the same process but it can depend on the presence of ions or sub-microscopic charged particles (the latter are usually less important). Ions (or particles) of one polarity may be absorbed at the interface and they then attract ions of opposite polarity which form a diffuse layer of charge in the liquid, close to the surface. If the liquid is then moved relative to the interface, it carries away some of this diffuse layer, thereby bringing about separation of the opposing charges. As in the case of solids, a high voltage is generated because of the work done to bring about separation, provided that the liquid is sufficiently non conducting to prevent recombination. Such processes can occur at both solid/liquid and liquid/liquid interfaces.

4.3 Charging by induction

There is an electric field around any charged object. A conductor or dissipative material introduced into this field changes the distribution of electric field in its vicinity and at the same time there is a redistribution of charges in the material under the influence of the field (see

Figure 1a). If it is isolated from earth, the conductor takes up a potential, dependent upon its position in the field. The material is capable of producing an electrostatic discharge by virtue of this potential.

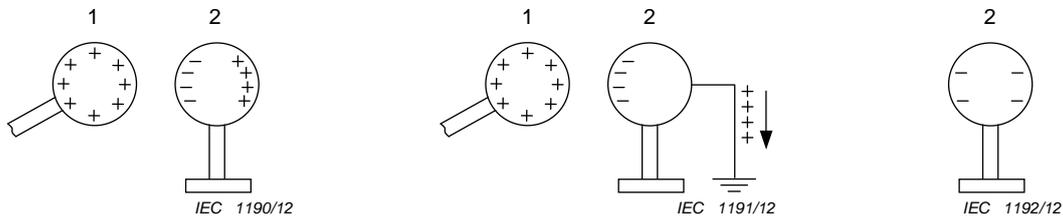


Figure 1a) – Move the charged object (1) close to an uncharged object (2)

Figure 1b) – Connect the uncharged object (2) to ground momentarily. The uncharged object is charged, but assumes ground potential

Figure 1c) – Remove the earth connection and then the first object; the conductor remains charged (negatively in this example)

Figure 1 – Charging by induction

If, while it is in the field, the material is momentarily earthed, its potential is reduced to zero and an imbalance of charge remains on it (Figure 1b). When the electrical field is removed from the object the net charge remains (Figure 1c). If the material is isolated from earth and the electric field is removed, the material then has a charge available to provide an electrostatic discharge. The conducting object after this process is said to be charged by induction. A discharge from such an object can be hazardous, for example in the case of an isolated person moving in the area of electrostatically charged materials.

4.4 Charge transfer by conduction

Whenever a charged object makes contact with another object (Figure 2), the total charge is shared between them to the extent that their conductance and capacitance allow. This is a potent source of electrostatic charging and examples include charged sprays, mists or dusts impinging or settling on solid objects. A similar transfer of charge can also take place when a stream of gaseous ions is incident upon an object.

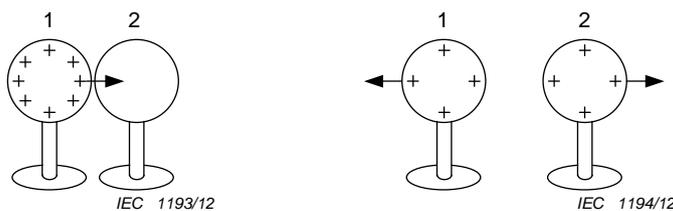


Figure 2a) – A charged object has contact with an uncharged object. Positive charge transfer to the uncharged object

Figure 2b) – Charged objects will be separated

Figure 2 – Charge transfer by conduction when objects 1 and 2 are conductors

4.5 Retention of charge

Even after separation in the charging process, electrostatic charges will quickly re-combine either directly or via the earth unless they are prevented from doing so. If a charge is on a non-conductor, it is retained by virtue of the resistance of the material itself. To retain charge on a conductor it has to be isolated from other conductors and from earth.

Pure gases, like air, under normal conditions are non-conductors and the suspended particles or droplets in dust clouds, mists or sprays can often retain their charges for very long periods, irrespective of the conductivity of the particles themselves.

The charge leaks away at a rate determined by the resistances of the non-conductors in the system and the capacitances of the conductors. This process is known as relaxation. The resistance, resistivity, conductivity or charge decay rate values which are needed to produce an electrostatic problem depend greatly upon the system under consideration.

In many industrial processes there is often a continuous generation of static charge that accumulates on an insulator or an isolated conductor. Examples are when a steady stream of charged liquid or powder flows into an isolated metal container, or a person walks across an insulating floor covering. The potential on the isolated conductor is then the result of a balance between the rate of input of charge and the rate of dissipation. The equivalent electrical circuit is shown in Figure 3 and the potential of the conductor is given by the equation:

$$V = V_0 \times e^{-\frac{t}{RC}} + I \times R \times (1 - e^{-\frac{t}{R \times C}}) \quad (1)$$

where

- V is the potential of the conductor (V);
- V_0 is the initial potential;
- R is the resistance to ground (Ω);
- T is the time from the commencement of charging (s);
- C is its capacitance (F).

The maximum potential is reached when $t \gg RC$, and is given by:

$$V_{\max} = I \times R \quad (2)$$

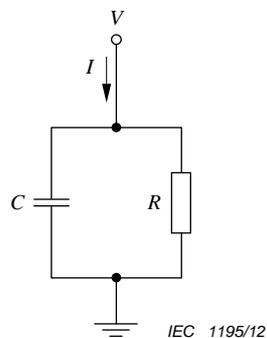


Figure 3 – Equivalent electrical circuit for an electrostatically charged conductor

The capacitance of an isolated object and its “resistance to ground” or the rate of charge dissipation can be measured to establish if significant charges can accumulate. This cannot be done for dusts and mists while suspended in air.

There is an inherent assumption here that the resistance, or the charge relaxation rate, of an insulating material is single valued. This is not always the case. The value of resistance for a given potential difference can vary with time and, similarly, the rate of charge dissipation can be a function of the electric stress (or amount of charge). These effects can also be greatly influenced by the temperature and the ambient humidity.

4.6 Influence of environmental humidity

4.6.1 General

Materials absorb atmospheric water to some degree and in the case of insulators this can increase the rate of charge dissipation greatly. Water absorbed on the surface of materials is the principal cause of a surface conductivity that is different from that in the bulk of the material. The effect, well observed but still poorly understood, is that the conductivity increases with the amount of water absorbed, i.e. in practical terms, the conductivity increases with increasing relative humidity. The effect is observed even under relatively dry (RH < 20 %) conditions where the water can only be present in molecular form and no free liquid water layer exists.

4.6.2 In situ measurements

When making measurements under practical conditions, it is often not possible to control humidity. As the results are likely to be influenced by environmental humidity, it is important to record the environmental conditions at the time of measurement.

4.7 Electrostatic discharges

4.7.1 General

An electrostatic discharge occurs when the electric field exceeds the breakdown strength of the atmospheric gas, which is usually air. As a guide, the breakdown strength for flat or large radius surfaces 10 mm or more apart is about 3 MV/m (30 kV/cm) under normal ambient conditions.

Electrostatic discharges vary greatly in type and depend in a detailed way on the system in which the discharge is initiated. The several types of discharges can be classified as described in 4.7.2 to 4.7.6, although the differentiation between the various types is not completely definite.

4.7.2 Spark discharges

A spark is an electrical discharge between two conductors at different potentials. It is characterized by a well-defined luminous discharge channel carrying a high density current. Ionization of gas in the channel is complete over its whole length. The discharge is very rapid and can give rise to an audible “crack”. The discharge observed between a person’s finger and a large metal object is a typical example.

The potential difference between the conductors necessary to produce a field which exceeds the electric strength of the ambient atmosphere depends upon both the shape and the distance between the conductors.

The current passing in a spark is limited only by the impedance in the external circuit and so nearly all the charge on the electrodes is drawn into the discharge. The spark in most practical cases, therefore, dissipates almost all the available energy which is given by:

$$W = \frac{1}{2} \times Q \times V = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad (3)$$

where

- W is the energy dissipated (J),
- Q is the quantity of charge on the conductor (C),
- V is its potential (V);
- C is the capacitance to earth (F).

This is the maximum amount of available energy. Any resistance in the discharging circuit reduces the energy in the spark and increases its duration. Typical values for the capacitances of conductors are given in Table 2.

Table 2 – Typical electrical capacitances

Object	Capacitance $\times 10^{-12}$ F
Very small metal items (screw, nail)	1 to 10
Small metal items (scoop, hose nozzle)	10 to 20
Small containers (bucket, 50 l drum)	10 to 100
Medium containers (250 l to 500 l)	50 to 300
Human body	100 to 300
Major plant items (reaction vessels) closely surrounded by earthed structure	100 to 1 000
Cars	800 to 1 200

4.7.3 Corona discharges

This type of discharge is associated with conductors with sharp points or edges. They can occur when such a conductor is earthed and moved towards a highly charged object or, alternatively, if the conductor is raised to a high potential. The discharges arise due to the fact that the electric field located at the sharp surface is very high and above the breakdown stress (3 MV/m). Since the field away from the conductor decreases rapidly with distance, the region of ionization does not extend far from it. It may be directed towards the charged object or, in the case of a high potential conductor, it may simply be directed into space.

Corona discharges are difficult to see, but under subdued lighting a glow can be seen adjacent to the point. Outside this ionized region ions can drift away, their polarity being dependent on the field direction.

The field from a charged surface producing corona discharges on adjacent, earthed, sharp points attracts ions of opposite polarity from the discharge and can, therefore, reduce the charge on the surface. This process will only continue, of course, while the field at the point is above the corona discharge threshold and so complete neutralization is not possible.

Corona discharge can also transfer charge to a surface or object. This effect may be used intentionally or may accidentally cause a hazard, for example by charging an isolated metal part to high potential.

4.7.4 Brush discharges

These discharges can occur when grounded conductors approach a charged insulating material (for example, between a person's finger and a plastic surface or between a metal filling tube and the surface of liquid inside a tank).

The discharges are short duration events which, under suitable circumstances, can be seen and heard. Unlike spark discharges, they tend to involve only a small fraction of the charge associated with the system and the discharge does not necessarily bring the two objects to the same potential.

4.7.5 Propagating brush discharges

The difference between brush discharge and a propagating brush discharge is that the first is mainly an air gap discharge and the second is essentially a surface discharge. The reason for the second being a surface discharge is that the electrostatic field mainly is bound to a thin insulating layer and not outgoing as in the first case. This requires a breakdown voltage of the

thin layer that greatly exceeds the breakdown voltage of a corresponding air gap. Propagating brush discharges can be avoided by ensuring that the breakdown voltage across all high resistivity walls and coatings is less than 4 kV. The maximum permissible breakdown voltage increases with increasing dielectric thickness and for specific application the permissible breakdown voltage may be greater than 4 kV. The discharge can be triggered either by a conductive object approaching the surface or by a breakdown of the dielectric. Should the field in the dielectric, from the charge on its surface reach the breakdown value of the dielectric, a spontaneous discharge occurs resulting in a puncture of the plastic sheet/coating. Starting from this puncture (or the discharge to the approaching object), a very high electric field is created parallel to the surface of the dielectric, which initiates a series of strong surface discharges, thereby releasing most of the surface charge.

A dielectric sheet with charges of opposite polarity on its surfaces is the equivalent of a parallel plate capacitor with the dielectric sheet between the plates. The energy released in propagating brush discharges can, therefore, easily be estimated from the stored energy. The equivalent capacitance C_e , for a dielectric sheet of area A , thickness d , permittivity $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ and the relative permittivity ϵ_r , retaining a surface charge density σ , is:

$$C_e = \epsilon_r \times \epsilon_0 \times \frac{A}{d} \quad (4)$$

for a charge density σ , the complete charge q .

Taking as an example:

$d = 75 \text{ }\mu\text{m}$, $A = 0,5 \text{ m}^2$, $\epsilon_r = 2$ and a surface charge of density, $\sigma = 10^{-3} \text{ C/m}^2$, the stored energy is:

$$W = \frac{1}{2} \times C_e \times V^2$$

$$W = \frac{1}{2} \times \frac{q^2}{C_e}$$

$$W = \left[A \times \frac{d}{2} \times \frac{1}{\epsilon_r \times \epsilon_0} \right] \times \sigma^2 = 1\text{J}$$

4.7.6 Cone discharges

This type of discharge has been experienced when, for instance, high resistivity granules are fed into a silo. When feeding charged particles, such as plastic granules, into a silo, there is an accumulation of charge at the heap. The field from this charge exerts repulsive forces on the similarly charged particles, which are falling onto the heap. As the gravitational forces on the particles act against the repulsive forces, there is an increase of the charge density of the bulk material at the heap. If charged particles continue to fall onto the heap after the field strength in that region has reached the breakdown value for air, discharges will occur in a direction towards the conducting walls of the silo, which is grounded.

4.8 Mechanical forces in an electrostatic field

The electric field produced by an electrostatic charge can exert a mechanical force on objects which it envelops. Films of material charged to a few micro coulombs per square meter can adhere to nearby metals while dust particles can be attracted by fields associated with charge densities an order of magnitude smaller than this.

For example, the force acting on a charged particle near a flat, grounded plate can be calculated from Coulomb's law:

$$F = \frac{q^2}{16 \times \pi \times \epsilon_r \times \epsilon_0 \times d^2} \quad (5)$$

where

q is the charge of the particle;

d is the distance to the plate.

5 Electrostatic problems and hazards

5.1 General

Electrostatic discharges vary greatly in type and their effect as causes of electrostatic problems can be very different. Discharges between metal structures in the form of sparks, and propagating brush discharge are amongst the most energetic and potentially destructive. Discharges from charged insulators can also be harmful and can ignite flammable gas mixture or causes damage to electronic components. Breakdown of the insulating layers of a semiconductor device can occur for voltages lower than 50 V and other forms of damage such as local fusion of semiconductor material requires only a few micro-joules of energy. In general, charge retained on a liquid or a solid creates a problem if it is suddenly discharged to another body or to ground.

In medical clean rooms that are used for surgery and during production of pharmaceuticals, one might have special requirements concerning contamination control. This can also implicate that static electricity has to be controlled to avoid charging of particles.

5.2 Electronic components and systems

5.2.1 General

Electrostatic discharge (ESD) is a serious threat to electronic components and systems. Electronic components have a wide range of susceptibility to ESD. Examples of the most susceptible types include semiconductors, magneto-resistive (MR) heads and thin film resistors. An electrostatic potential, as low as 10 V, can cause the failure of certain components.

Due to this high susceptibility, it should be assumed that all types of electrostatic discharges can harm sensitive electronic components.

5.2.2 Types of failure

ESD damage can result in catastrophic failure and latent defects.

Catastrophic damage can result in failure or degradation of a component, causing the component or system to cease functioning or fall outside its specification.

A component with a latent failure may have changes in its characteristics that do not necessarily take it outside its specification. However, it can become weakened by the ESD event. A component with latent damage may be more susceptible to a succeeding ESD or any other stress. It is therefore an increased possibility that such a component will fail prematurely.

Soft errors occur when a programmed component is exposed to an ESD, or from the electrical noise generated from the ESD event changing the stored data. A false signal might appear in

the system, due to conducted or radiated electromagnetic interference sourced by an electrostatic discharge.

The damage level of a component is either voltage- or power-related, depending on the type of damage mechanism. Different types of components and semiconductor families are susceptible to different kinds of damage mechanisms.

One of the most common damage mechanisms is related to breakdown or puncture of the oxide insulation, the dielectric, or the semiconductor junction (burn-out or short circuit). Another common damage mechanism is related to the melting or sublimation of metallization due to high currents resulting from the ESD.

Examples of components particularly susceptible to dielectric breakdown include MOSFET (discrete, gate-oxide breakdown), MOS IC, ICs with metallization crossovers and capacitors (particularly MOS). Typical failure mode is an electrical short circuit or increased leakage current (degraded I-V characteristic).

Examples of components particularly susceptible to metallization damage include HF-transistors and ICs. A typical failure mode is open circuit.

As all of these damage mechanisms are dependent on the geometrical size of the dielectric layer, other insulation layer, metallization width and thickness, etc., it is assumed that the trend of ESD sensitivity of semiconductors increases with time. However, for some types of components, improved ESD-protection circuits are fabricated at the device pins that reduce the device ESD sensitivity.

5.2.3 Problems and threats at different life cycle periods

All electronic systems in use are vulnerable to electrostatic discharges. A direct hit by a strong discharge to any part of a system can create currents and energies high enough to damage components if the discharge currents are not drained directly to ground.

Even a discharge in the vicinity of a system can damage the system. The discharge creates an electromagnetic field that might induce currents in the system. These currents can be damaging or they can cause “soft-errors”, i.e. the information is degraded by invalid pulses. The programming of certain components can also be irreversibly changed.

A discharge might occur against a cable or remote equipment far from the system and the disturbance (high voltage pulse) can be conducted into the system.

During the manufacture of electronic devices, handling of sensitive electronic components and assemblies is very delicate. In such an environment there are many threats to electronics: charged operators, clothes, ungrounded machine parts, plastic bags and bins, plastic components, etc. The most damaging discharge is a spark discharge. Such a discharge can occur from a charged operator touching a printed circuit board.

A charge on a component itself might also be damaging. A plastic encapsulated semiconductor is easily charged by rubbing its surface with, for instance a finger or a plastic bag. This charge on the surface of the plastic housing induces a voltage on the conductors of the semiconductor and on its terminals. By touching a terminal with a metallic tool or a finger a fast discharge occurs. As the capacitance of the terminal is small and the capacitance of the tool or finger (operator) is much larger, the discharge is very fast and causes a high current. Even if the discharge has very low energy content, the high current can be damaging to the very small circuit elements it may pass.

During the manufacture of components there are additional problems arising from electrostatic charge. Semiconductors have to be extremely clean during the manufacture and the surface has to be protected. If the semiconductor is charged, it attracts dust from the air. The same

type of problem exists in other parts of electronics, for instance contamination of disks and disk drives and of electro-optics.

The level at which a component is damaged by an electrostatic discharge depends on the design of the component and the characteristics of the discharge. Discharges of many kinds might occur, but three types, human body model (HBM), machine model (MM) and charged device model (CDM), have been defined as being representative for most types, even if they do not cover all possible variables that influence a discharge. The models are used to define a withstand voltage, which is the maximum voltage, as applied in the respective model, that a component can withstand without sustaining damage.

5.3 Electrostatic ignition – Hazards

5.3.1 General

Electrostatic discharges may ignite flammable gases, dust and vapours or mists. It is the intense heat of a discharge channel that is responsible for the ignition.

5.3.2 Spark discharges from conducting objects

Approximate calculation of spark discharge energy can be made, for example, for an ungrounded metal drum filled with powder from a grinding unit. In such a case the charging current, I , might be 10^{-7} A. The resistance to ground of the drum, R , could be 10^{11} Ω and its capacitance about 50 pF. The maximum voltage on the drum, reached in about 15 s, is then:

$$V_{\max} = I \times R = 10 \text{ kV}$$

The maximum energy, W , released in a spark discharge would be:

$$W = \frac{1}{2} \times C \times V_{\max}^2 = 2,5 \text{ mJ}$$

The rise time, amplitude and duration of the current passing during the spark are all important factors in determining the level of hazard. A very fast, high magnitude, current pulse conveys energy adiabatically and may most easily ignite a gas-air mixture. Conversely, a longer duration discharge has been found to sometimes increase the probability of ignition of a flammable dust cloud. Inclusion of high impedance in the discharge current path to sufficiently reduce the discharge current and increase the discharge duration can reduce the potential hazard to most flammable mixtures.

5.3.3 Corona discharges from conducting objects

The energy density in the discharge is much less than in a spark and for this reason corona discharges are not normally incentive. However, in certain circumstances, for example if there is an increase in the potential of the pointed conductor, corona can develop into a spark between it and another object.

5.3.4 Brush discharges from insulating surfaces

If the energy is quite concentrated, brush discharges can ignite most flammable gases and vapours. This is dependent on the polarity of the discharge and the electrode configuration.

There is, as yet, no evidence to show that in most practical cases even the most sensitive dusts can be ignited by brush discharges.

5.3.5 Propagating brush discharges from insulating surfaces

The high surface charge density required for the onset of propagating brush discharges may typically be generated at those locations where powder particles hit high resistivity walls or coatings such as in pneumatic transport of powder through pipes made of low charge dissipation (high resistivity) materials or through metal pipes with a lining of such material. Propagating brush discharges have also been observed and proven when conductive liquids were pulsating through insulating hoses whose surface was not wettable. Another circumstance could be where considerable rubbing occurs between a packaged product and the inner surface of the package. High surface charge densities may also result from the deposition of ions on high resistivity (low dissipation) walls or coatings. Large quantities of ions may be generated within the plant, for example, during the bulking of charged high resistivity powder. Such discharges do not occur with layers of powder.

Since most of the charge is released in a single discharge the stored energy may be compared with the minimum ignition energy of a given powder to judge the ignition probability of propagating brush discharges. Discharges of such energy passing directly into electronic systems or devices could have a catastrophic effect. It should be noted that the discharge of energy of this magnitude to ground via a person would produce considerable physiological reaction and is dangerous.

5.3.6 Discharges from people

Charges on people's bodies commonly cause a hazard. A person who is insulated from ground can easily acquire and retain an electrostatic charge. The insulation from ground may be due to the fact that the floor covering or the soles of their footwear is made from an insulating material. There are many mechanisms that can cause a person to become charged and the following are a few examples: walking across a floor; rising from a seat; removing clothing; handling plastics; pouring from, or collecting charged material in a container; or standing close to charged objects, e.g. a moving belt or highly insulated packaging.

If an electrostatically charged person touches a conducting object (e.g. door handle, handrail, etc.) a spark will occur at the point of contact. Such sparks may not be seen or heard and may not even be felt by the person.

A potential of 3 kV on a typical body capacitance of 200 pF gives a stored energy of 0,9 mJ. Sparks of this energy from people are capable of igniting gases (hydrogen/air, 0,02 mJ), vapours (hydrocarbon/air, 0,2 mJ) and even some of the more sensitive dusts (< 1 mJ). It is certainly the case that such discharges can damage unprotected electronic devices.

5.3.7 Ignition potential of electrostatic discharges

5.3.7.1 General

When electrostatic discharge is expected in hazardous areas it shall be taken into consideration whether the ignition potential is capable of igniting the surrounding atmosphere.

5.3.7.2 Spark discharges

The ignition danger caused by a spark discharge may be assessed by comparison of the energy released in a spark with the minimum ignition energy (MIE) of the surrounding atmosphere (see 5.3.2).

5.3.7.3 Corona discharges

The energy density in this discharge is normally not incentive. (see 5.3.3).

5.3.7.4 Brush discharges

There is as yet no evidence to show that even the most sensitive dust (except primary explosives) can be ignited by brush discharges. However, there is a theoretical possibility because brush discharges can have equivalent energies up to 4mJ (see 5.3.4).

However, flammable gases and vapours may be ignited by brush discharges.

An estimation of the probability of brush discharges causing the ignition of a gas or vapour can be made by considering the amount of charge transferred in a single brush discharge.

The minimum charge transfer for brush discharges to cause ignition of gases and vapours in different explosion groups is estimated as

- 60 nC for explosion groups I or IIA,
- 30 nC for explosion group IIB,
- 10 nC for explosion group IIC.

More information on explosion groups can be found in IEC 60079-10-1 and IEC 60079-10-2.

Brush discharges occurring in the nanoseconds region shall be registered with a suitable measuring device. Figure 4 provides two examples. Examples of such devices are rapid storage oscilloscopes (bandwidth \geq 300 MHz, sample rate \geq 1 GS/s) with a high frequency shunt resistor.

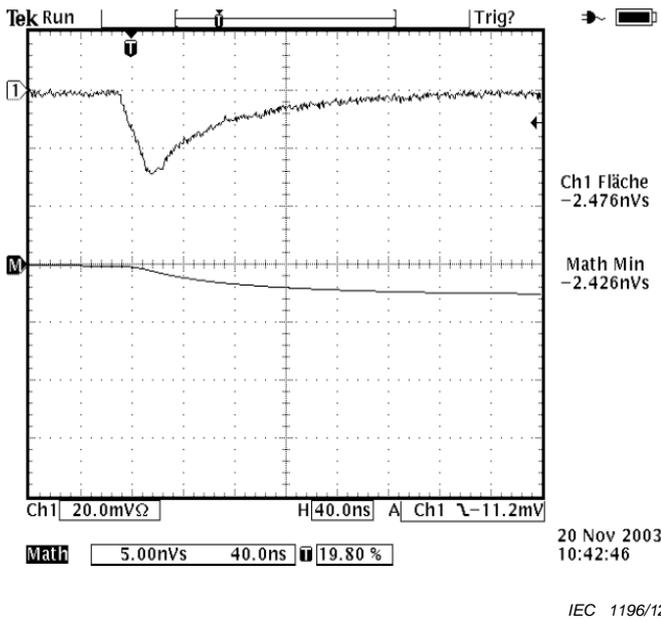


Figure 4a) – Weak discharge < 20 nC

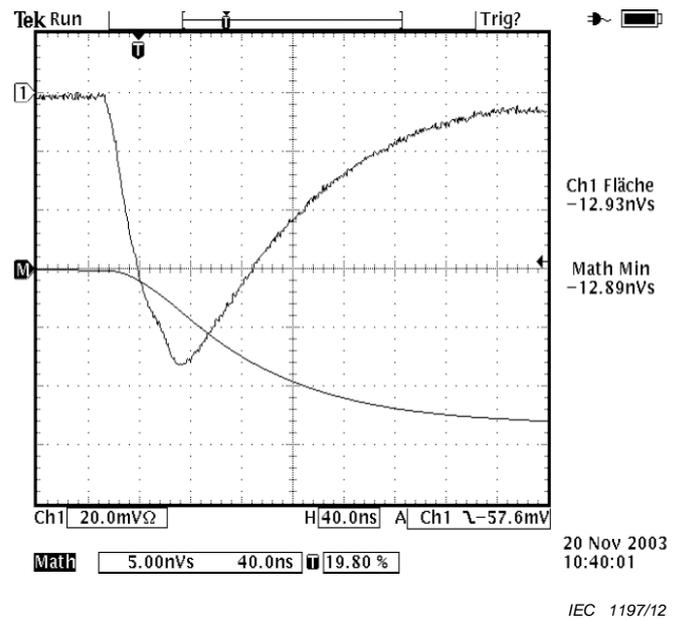


Figure 4b) – Strong discharge > 60 nC

Figure 4 – Examples of brush discharge waveforms measured with a fast digital storage oscilloscope

The relationship between charge transfer in a brush discharge and the probability of ignition takes no account of the spatial or temporal distribution of energy in the discharge. These values should only be regarded as an approximation and should not be used as an absolute determination of safety for all materials in all applications.

5.3.7.5 Propagating brush discharges

There is evidence that propagating brush discharges are capable of igniting flammable gases and vapours as well as most dusts (see 5.3.5).

5.3.7.6 Cone discharges

A proven fact is that cone discharge may ignite flammable gases and vapours. It cannot be excluded that some dusts can be ignited as well.

5.4 Physiological sensation

A well-known phenomenon, particularly on days with low air humidity, is the electrical shock felt when touching a conducting object after having been charged by, for instance, walking on a rug or rising from a car seat.

The levels of perception of electrostatic charge by people and the physical responses are shown in Table 3.

Especially when handling highly chargeable objects, an isolated person can be charged to high levels. Examples of such situations include:

- making a bed: the sheets are charged and the person receives an induced potential, which is neutralized in a spark discharge by touching a grounded object;
- packing or unpacking when highly chargeable packing materials are used.

Table 3 – Typical perception levels and physical responses of people to discharges based on a body capacitance of 200 pF

Discharge energy mJ	Reaction	Body potential V
0,1	Perceptible	1 000
0,9	Definite sensation	3 000
6,4	Unpleasant shock	8 000

A person can feel the same sensation when touching a charged object.

Examples of this include:

- taking off a sweater: the sweater is charged to a high level and discharges (as brush discharges) to the person;
- a truck with insulated, plastic wheels charges to high levels when driven and can cause a very unpleasant shock.

5.5 Simulation of electrostatic discharges

5.5.1 General

Electrostatic discharges are generally simulated using a simple circuit in which the electrostatic charge is initially stored as a voltage on a capacitor. When a simulated discharge is required, the stored electrostatic energy is discharged through a circuit to a load, which may be a spark discharge or an electronic device under test. The discharge is normally defined in terms of the output current waveform, I , although the stored electrostatic energy is often also an important parameter.

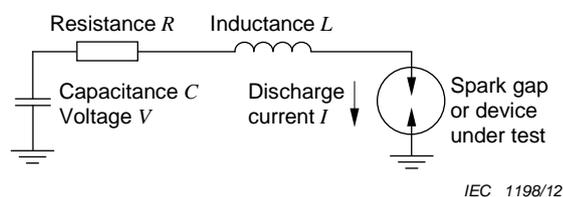


Figure 5 – Circuit for simulation of electrostatic discharges

This simple circuit model can generate a wide variety of waveforms for different purposes, depending on the values of the capacitance, C , the resistance, R and the inductance, L . All circuits have all these components although in practice some may be present as unintentional but unavoidable "stray" components. In many circuits, the small stray components can have a significant effect on the final output waveform simulation.

The output current is given by:

$$I = \frac{V_0}{2 \times L \times \omega} \times \left[e^{-(\sigma+\omega) \times t} - e^{-(\sigma-\omega) \times t} \right] \quad (6)$$

where

$$\sigma = \frac{R}{2 \times L} \quad (7)$$

and

$$\omega = \left[\frac{R^2}{4 \times L^2} - \frac{1}{L \times C} \right]^{0,5} \quad (8)$$

If ω is a real number, then the circuit gives a unidirectional waveform, typically having a fast rising edge and longer exponential decay.

If $\omega = 0$, then the circuit is critically damped and a short, unidirectional waveform occurs. If ω is a complex number, then the output waveform is a damped "ringing" sinusoid.

5.5.2 Capacitive discharges for ignition energy measurements

Capacitive discharge circuits are used for the measurement of ignition energy of flammable atmospheres. In a typical circuit, the capacitance is controlled in order to determine the stored energy. The circuit resistance R and inductance L are usually maintained at low "stray" values.

In many cases, it is the stored energy rather than the output waveform which is the parameter of interest. Typically the output waveform is a damped sinusoid.

In some cases an inductance, L , or resistance, R , may be included in the circuit. This is the case for some apparatus for measurement of ignition sensitivity of dust clouds, where an inductance of 1 mH is often specified. Typical values are given in Table 4.

5.5.3 Human body model

An important electrostatic discharge model which simulates a discharge of a charged person to the device or system under test is called the human body model (HBM). This model is the most commonly used both for testing the ESD sensitivity of electronic components and systems during manufacture and operation. This model also finds applications in assessing other situations where electrostatic discharges from the human body may occur, for example in assessment of the ignition sensitivity of pyrotechnic dusts.

In this case the capacitance C is chosen to be representative of the typical range of the human body. A resistance R is introduced into the circuit, but the inductance L is limited to the "stray" value. The output waveform is of unidirectional form with a fast rise time and long slow decay time. Typical values are given in Table 3.

5.5.4 Machine model

A class of model used in determining the ESD sensitivity of electronic components simulates a discharge of a large metal object, such as a part of a machine. This model is called the machine model (MM).

In this case, the capacitance C , the inductance L and the output waveform are usually defined. The waveform is typically a ringing sinusoid of defined frequency, rise time and amplitude. Typical values are given in Table 3.

5.5.5 Charged device model

The charged device model (CDM) simulates the situation where a small charged device or object approaches a grounded surface and an ESD event takes place as a result. It is used for measuring ESD sensitivity of electronic devices. Typically, the capacitance of the device is small and the circuit inductance L and resistance R are defined by "stray" values. The model is typically defined by its waveform, which is characteristically a very short and fast unidirectional discharge. Typical values are given in Table 4.

Table 4 – Typical values used in ESD simulation models

Model	Application	R Ω	C pF	L nH
Ignition energy measurements	Dust cloud ignition	Stray	5 – 1 000	Stray or 1mH
	Vapour ignition	Stray	5 – 1 000	Stray
Human body model (HBM)	Electronic device test	1 000 – 3 000	100 – 300	Stray
Machine model (MM)	Electronic device test	8,5 (typical)	200	0,5 (typical)
Charged device model (CDM)	Electronic device test	< 10 (typical)	3 – 30 (typical)	< 10 (typical)

6 General solutions to problems and hazards

6.1 General

While it is not the objective of this technical report to discuss specific electrostatic problems, a brief review of solutions to problems is useful as an introduction to the description of methods of measuring the relevant properties of materials. It is generally the case that electrostatic problems are specific to the actual product, process or materials and circumstances. A measurement of the electrostatic parameters is a necessary precursor to effective solutions.

The handling of electrostatic sensitive components is described in IEC 61340-5-1 and IEC 61340-5-2 and the avoidance of hazards due to electrostatic electricity is described in [4]. Common approaches are summarized in 6.2.

6.2 Common approaches

In many cases, it is necessary to define an area in which special precautions are necessary. This may be an ESD protected area in electronics manufacture or a flammable atmosphere zone in a process industry. It is necessary for all personnel working in these areas to understand the need for electrostatic control, where the boundaries of the area are located and what precautions should be taken into account within the area.

The first principle is to avoid the use of insulating materials and to ensure that all conductive materials or items of metal are grounded. If charging is inevitable, as is usually the case, the degree of charging can sometimes be limited by minimizing the number of contact and separation events. This means avoidance of rubbing for solids and a reduction in linear velocity for liquids should be performed. Ionization by corona is a very useful means of reducing unwanted surface charge on insulating objects. Devices based on this principle and comprising an array of grounded, sharp electrodes are used for charge reduction in the electronics industry.

As the amount of charge is highly dependent on the air humidity (surface humidity) a general solution to get lower charge levels is to keep the air humidity as high as possible with regard to other risks. For instance, the humidity in electronic manufacturing plants is often regulated to 40 % RH to 60 % RH. For most cases, the use of high relative humidity is not a primary safety measure to control static electricity, but only a secondary one.

The enhancement of the rate of charge loss from an insulating material to ground can be achieved by the addition of an antistatic additive.

A common practice for solid insulators is to form a conductive matrix within the material by the addition of carbon or metallic particles, flake or fibers. It should be appreciated, however, that these systems are effective only while electrical continuity is maintained throughout the matrix and that, consequently, they are often sensitive to mechanical distortion and temperature changes. Also, in the present context, they can present a measurement problem. Charge, in general, cannot migrate from the insulating continuum to the conductive matrix and

so the indicated charge-dissipative or conductive characteristics are very different between charge applied to, or contact with, the former and the latter. The procedure employed should be considered carefully in implementing any test.

The most common circumstances where electrostatic problems arise are where the material is either an electrical insulator or is not in good electrical contact with ground. Pneumatically conveyed dust is a typical example of the latter since even metallic particles retain charge when suspended in air. In this case, ionization of the ambient atmosphere can provide charges which reduce, if not wholly neutralize, the problematic charge on the material.

The accumulation of metallic dust on active ionizers may lead to hazardous sparks. It is therefore recommended to use passive or radioactive ionizers when metallic dusts are present. It is important for safety and operational efficiency that passive and active ionizers be regularly cleaned and checked for faults in accordance with manufacturer's instructions.

One of the most common problems is an ungrounded conductor, often a small metal object or part of an assembly, which can accumulate charge and give rise to an incentive or otherwise damaging discharge. The preferred solution is to ground the object and prevent charge accumulation.

A potentially charged ungrounded metal or conductive object should never be grounded in the presence of a flammable atmosphere. To do so would be to risk a discharge that could ignite the atmosphere.

It is very important that people working in areas of potential electrostatic hazard, where flammable atmospheres may be present, and certainly those who handle sensitive electronic systems, should be prevented from becoming electrostatically charged. This can be achieved by grounding personnel through a conductive wrist strap or by having a conducting floor and ensuring that people wear low-resistance conducting footwear, whichever is practical for the particular industrial environment.

The floor shall be reasonably clean and a regular functional control shall exist, otherwise the grounding by shoe/floor will not work.

For protection of sensitive electronics, particularly during transportation, it is recommended to use ESD protective packaging to shield the electronics from electrostatic field and direct electrostatic discharge originating outside the packaging. The packaging material in contact with the device should also not be insulating and should not cause significant electrostatic charging of the packaging or device.

7 Useful applications of electrostatic effects

The ubiquitous photocopier and inkjet printer are two machines which contribute enormously to information technology. The electrographic process is entirely based on electrostatic effects and the inkjet printer uses the precise deflection of accurately sized and charged ink drops. In the former process, the optical image is transformed into a charge pattern on a corona charged photoconductor which is subsequently developed by the adhesion of counter-charged developer particles. The final stage is the transfer of the developed image on to the copy paper, again, by means of an electrostatic field.

Corona charging of dust particles, the electrical properties of the captured effluent dust layers and the generation of stable high electric fields all contribute to the efficiency of electrostatic precipitators.

Electrostatic painting, crop spraying, flocking and ore beneficiation and plastics separation are all either viable or burgeoning industrial processes. It is certainly the case that effective implementation of any means to control and utilize electrostatic effects is crucially dependent on quantitative data for the electrostatic parameters and relevant materials properties.

Additional electrostatic applications include electrostatic printing assistance, electrostatic moisturing and electrostatic oiling.

8 General aspects of measurements

8.1 General

Measurements are used to provide understanding of electrostatic phenomena, to analyse and derive solutions to problems and to design and develop systems and devices based on electrostatic processes.

This clause describes general methods of measurement which will allow unambiguous data of sufficient accuracy to be produced. Correct interpretation of the data is most important and this can only be obtained by understanding the basic phenomena and having an awareness of the influence on them of the local environment.

Some electrostatic measurements relate directly to basic physical parameters, for example electric field, charge, surface and volume charge density, resistivity, capacitance, current and energy. Other measurements are more practical and so require test methods in which practical situations are simulated with agreed geometric arrangements and dimensions. Examples include chargeability, charge decay, earth bonding resistance and shielding capability.

Measurements of electrostatic charge and field often do not need to be particularly accurate. A value to within an order of magnitude is sufficient in many instances. What is important however is reliability – the confidence that the observations made are real and are correct to an accuracy which is appropriate. There are instances where high resolution and stability may be needed, for example in obtaining estimates of the rate of decay of charge on an insulating material from short time observations when the surface charge and potential may be high but the rate of change very small.

There are instances where high sensitivity is needed, for example for measuring the low potentials that may present risks to sensitive semiconductor devices and for measuring charge density on individual sides of thin films. There are also some instances where high accuracy may be needed, for example where difference measurements need to be made between two or more measurements of electric field, for example for on-line measurement of charge density or charge decay rate.

The methods presented are, in general, concerned primarily with the correctness of method rather than with the achievement of high accuracy. An introduction to each of the methods is presented here to clarify some of the difficulties and enable confident implementation and unambiguous interpretation of the results.

8.2 Electric field

8.2.1 General

Measurements of the electric field are made using two types of field meters: induction probes and field mills.

Induction probe instruments involve a sensing surface connected to a high input impedance amplifier with a capacitor to earth. Such instruments are simple and relatively low cost but their sensitivity and usefulness is limited. They have a finite input time constant and this means they can only be used for relatively short-term measurements (tens of seconds) after zeroing in a zero electric field environment. Their readings are seriously upset by operation in the presence of ionized air.

A field mill is so called because an earthed rotating shutter is used to modulate the electric field observed at the sensing surface. The alternating signal generated depends only on the area of the sensing surface and the value of the input capacitor so long as the rate of modulation of the observed electric field is suitably faster than the input time constant. Phase sensitive detection generates an output signal showing the strength and polarity of the observed electric field.

An alternative arrangement uses a vibrating chopper to modulate the electric field at the sensing surface. In such instruments, a voltage is usually fed back to the input so the instrument works in a null mode. This is particularly useful for voltage follower probe applications.

8.2.2 Application

A measurement of the electric field can provide information on the magnitude and polarity of surface potential, surface or volume density of charge or local space potential.

The induction probe responds continuously to observed fields. The measured field produces a response which is relative to previously observed fields and so it is essential that these instruments be switched on or zeroed in a region free of electric fields and measurements made within a relatively short time after re-zeroing. The field mill is not affected by the electric field present when it is switched on and, since the chopper presents a continuous earth reference, the zero remains stable over extended periods of operation.

It is important that the instrument is properly bonded to earth and that the stability of the zero reading over times comparable to expected time needed for measurement is checked. The presence of other earthed surfaces within the field of view should also be checked.

Surfaces around the sensing region shall be kept clean. This is particularly important with high sensitivity instruments and in work involving insulating particles. Insulating particles readily become charged and any such particles deposited around the sensing region will offset the instrument zero. Clean air purging helps prevent particle deposition but it is necessary to check the field meter zero reading from time to time.

The field meter zero setting can be checked by covering the aperture with an earthed metal plate.

The induction probe or field mill distorts the electric field by its presence. In addition, the instrument's response is an integral of the field or potential over a poorly defined sensitive region. These effects may be significant and should be taken into consideration.

8.3 Potential

8.3.1 General

Potentials arise on objects, on charged surfaces or within a volume containing a space charge. The first can be measured using an electrostatic voltmeter but they can all be determined either by an earthed field meter or from the potential needed to provide a null electric field signal at the field sensor. Such measurements should require no removal of charge and should be made without significant change of electric field at the surface tested as this may alter the distribution of charge present.

8.3.2 Surface voltage

Measurement with an electrostatic voltage follower probe is preferable with the probe mounted close to the surface so that the response is not affected by any other nearby electrostatic charges. The main limitations arise from the difficulty of covering large potential ranges and risks of electrical breakdown if response speed cannot follow sudden changes of

surface potential. The advantages are the good accuracy of potential measurement, independence of probe spacing and the low effective capacitance loading by the probe.

An earth-bonded field meter can be used as a voltmeter and gives easy measurement of surface potential - even for very high voltages. The separation distance shall be known and should be large enough to avoid increasing the capacitance which would depress the potential to be measured. The distance should also be large enough to avoid discharges between the charged surface and the earthed meter. The distance should not be so large, however, that readings are affected by other nearby charges or earthed surfaces.

Precautions:

- The electric field between the surface or body and the field meter will usually be non-uniform and the surface potential is obtained by multiplying the observed electric field E (V/m) by the separation distance (m) and by a correction factor which depends on the physical arrangement. For a field meter near a large plane conducting surface, the electric field is uniform and there is no ambiguity and a correction factor can be obtained for a field meter by itself or with a guard plate. A guard plate only achieves a moderate flattening of the correction curve. It is generally easier to use a field meter without a guard plate for handheld measurements.
- If the surface is not a large plane, it is necessary to establish the relationship between the electric field, the separation distance and the potential. This may be done either empirically or by computer modelling.
- When studying static risks in complex work areas, it is advisable to move the field meter around to ensure all significant sources of charge are identified. Individual surface potentials can then be measured, possibly with shielding against other nearby sources. This approach avoids attributing potential values to surfaces where the reading actually arises from a more significant nearby charge source.
- In measurements involving insulating surfaces, it needs to be recognized that such surfaces may be transparent to electric fields. The effective location of charge sources can be established by varying the position of the observing field meter.

8.3.3 Space potential

The local space potential can be measured by the electric field at an earthed fieldmeter. The earthed field meter perturbs the potential distribution by an amount which depends upon the effective field meter diameter. The electric field, E ($V\ m^{-1}$), relates to the local space potential V (volts) for a field meter diameter d (m) as:

$$E = f \times \frac{V}{d} \quad (9)$$

where f is a constant approximately equal to 1. This relationship remains true so long as the field meter is several diameters away from nearby earthed surfaces and structures. This may be tested using a battery powered field meter and raising it to the potential at which the electric field reading is zero, that is, by using it as a voltage follower.

Care should be taken that introducing an earthed field meter into a highly charged environment does not initiate spark or corona discharges at the meter surface.

8.4 Charge

The net electrostatic charge on a product or quantity of material may be measured by dropping it into an isolated conducting chamber known, as a Faraday pail, and measuring the charge induced on the outside of the pail by means of an electrometer amplifier. Alternatively,

the increase in voltage of the pail in relation to its capacitance can be measured using an electrostatic field meter or voltage follower probe, or the current to earth can be integrated.

Great care is needed with sensitive electrometer circuits to ensure high input resistance, to eliminate noise from any connecting cable and to minimize input bias currents. For measurements based on an increase in pail voltage, the capacitance of the pail needs to be much larger than that of the charged item. This approach is simple and suitable for measurements down to 1 pC. When collecting large quantities of charge in industrial studies, safety may be critical and the integration of current may be a simple way to keep the pail reliably close to earth.

Practical precautions needed for reliable measurement include:

- a pail deep enough to ensure that all introduced charge couples to the pail and essentially none outside;
- good shielding of the pail against the influence of any charges in the local environment;
- avoidance of influence of any local charges on the charging process being studied. This, for example, requires bonding the equipment to earth when the operator is placing items into the pail, ensuring that the operator is bonded to earth and that his clothing cannot contribute any electric fields at the charging process;
- avoidance of leakage and trapped charge effects on any insulation mounting the pail and in connections and cabling to any external charge measurements circuits;
- ensuring that zero and charge readings are stable for longer times compared to the times involved in making measurements.

Safety should also be ensured by seeing that the charged pail can be safely earthed without causing incentive sparks.

8.5 Charge density

8.5.1 Surface charge density

A charged sheet of insulating material which is well away from any other earthed surfaces produces the same electric field normal to each surface which is related to the algebraic sum of the charge densities on the two surfaces. The charge densities on individual sides of the sheet can be measured by resting the sheet against an earthed surface. Charge on the surface against the earthed surface will produce no external field and so the charge on the outside surface, which will be less closely coupled and will produce a electric field at a nearby field meter, can be determined. The thickness and relative permittivity of the material and the precise distance of the sensor from the surface should be known.

Measurements to 5 % accuracy require the field meter sensing aperture to be spaced at least 1,5 times the sensing aperture diameter from the sheet surface. The surrounding plane guard plate should be at least 9 times the separation spacing. For 1 % accuracy measurements, the surrounding surface needs to be at least 15 times the sensing aperture diameter.

Observation of small scale charge patterns requires the use of sensing apertures and separation distances of dimensions similar to the pattern size.

Measurements on moving webs require the response speed of fieldmeter to be adequately high relative to the speed of the web, coupled with an appropriate spatial resolution in order to detect any variation in the charge pattern on the surface.

8.5.2 Volume charge density

For a spherical chamber and a uniform charge distribution, the boundary electric field and the maximum space potential relate to the mean charge density linearly and quadratically, respectively. For a uniform charge distribution, therefore, the density of electrostatic charge in

a volume may be obtained from the electric field at the boundary or from the maximum space potential within a simple chamber sampling the local atmosphere.

For chambers of complex shape, computer modelling can be used to give values of electric fields at boundaries and the distribution of potential through the volume.

The chamber could be either the overall vessel containing charge or a small sampling vessel ventilated to sample the local atmosphere. Care is needed in the design of a sampling chamber in order to balance good atmosphere transfer against effective shielding of the electric field, created at the outer surface of the chamber by the charge in the larger vessel. The shielding efficiency of sampling chamber boundary can be tested in the absence of space charge by measuring internal readings when the sampling chamber is raised to a high potential. The penetration of external fields can be quite significant if the sampling chamber is to be lowered into the central regions of large scale distributions of electrostatic charge, where the local space potential may be several tens of kilovolts.

8.6 Charge decay

The dissipation of charge from materials is a factor in the control of electrostatic effects. The measurement of the rate of self-dissipation of charge is, therefore, an important parameter. The dissipation performance is indicated by the charge decay time.

Traditionally, the ability of materials to conduct and, hence, dissipate charge has been assessed by measurement of surface or volume resistivity. This can be satisfactory for homogeneous materials. Unfortunately, many practical materials are not identifiable as being homogeneous and many have a resistivity dependent upon position, be that directional or voltage-driven. Since static charges arise on surfaces by contact or rubbing actions, the best way to access the charge retention properties of materials is to simulate this practical situation by depositing a patch of charge on the material and observing how quickly it dissipates.

Charging of a material by rubbing is a very simple and practical way to charge a solid material surface. This method often has the benefit that it may simulate real life conditions. However, charging using this method can be very inconsistent. Powders, granules and flakes of material may be easily charged, simulating real life conditions, by tumbling or simulated flow.

Deposition of charge using high-voltage corona discharge is often a simple and versatile way to charge materials or surfaces. This method is applicable to solid surfaces, powders or granules and liquids.

Conducting and dissipative materials or objects, having resistivity of less than about $10^{11} \Omega$ may be charged by induction or by direct connection to a high voltage source.

The usual method of observing the dissipation of the charge is by using a field meter to record the decrease of the associated surface field.

Materials and surfaces used to provide a discharge path for objects placed thereon can also be assessed by observing the voltage decay of a charged metal plate placed upon the material or surface.

The charge decay rate on many insulating materials is heavily dependent on the charge density – the higher the charge density, the faster the decay. A very fast initial rate of charge decay can slow radically as the charge density decreases. The best way to interpret the rate of decay, therefore, is in relation to the application of the material.

If the concern is the amount of charge retained by a powder during storage, for example, then the long-term characteristic is important. In a dynamic charging situation, such as pneumatic

transfer of material, the important factor is the short-term charge migration rate with cleaning the insulators in contact with the product.

The area and density of charge and the proximity of earthed surfaces will all affect the electric fields driving charge migration. Ideally, therefore, charge decay rates need to be measured under two extreme conditions to assess the influence of nearby earthed surfaces. An edge contact for the sample with an open backing promotes preferential migration over the surface while transport through the sample will be preferred for a sample supported on an earthed plate. With installed materials, of course, it is necessary to observe the charge decay using the installation earth.

Care should be taken to minimize the handling of materials and causing any changes to the surface properties. Powders should be placed in a suitable container.

8.7 Resistance and resistivity

Electrical resistance is the physical parameter with the greatest range extending over some 30 orders of magnitude from metals to almost perfect insulators. The resistance and resistivity of both solids and liquids have been measured for a considerable time and a large number of methods have been described in the standards literature. It is evident that no single method will be applicable over the whole range but, in the context of electrostatics, simply placing the sample between a pair of electrodes and measuring the current for a given voltage will probably suffice in most cases. The resistance across the surface of a material can be different from that through the same material owing to the effect of absorbed contaminants, in particular, water. A different form of electrode system is clearly required but the principle remains the same.

A continuously decreasing current (or increasing resistivity) is observed for highly insulating materials under constant electric field. Also, for these materials, the current can increase non-linearly with increasing voltage. These factors make the concept of resistivity invalid and interpretation of experimental observations difficult. It is general practice that for these highly insulating materials the resistance recorded after a specified time is the accepted value.

Measurement of the resistance, under practical circumstances such as from the surface of an installed structure to the building earth, or through protective footwear, is sometimes required. In these cases, the principle to be used is that the electrode system should, as near as possible, be representative of the actual application,

It is important that good contact is made between the electrodes and the sample. Soft, electrically conductive materials or metal foils backed by a soft material are often used. Special cells are evidently required for liquids and powders. In those situations where the resistance of the product is similar to that of the insulating components of the measuring system, guard electrodes to divert stray currents should be used. Great care is required when filling with powders to use a method which provides consistent packing density.

8.8 Chargeability

It is often necessary to measure chargeability to assess the currents that may arise in process operations or handling of individual products. It is the case that the greater the work done on the product, the larger the charge. For instance, grinding produces more charge than sieving of powder, and pumping a liquid through a filter produces more charge than laminar flow. Other common situations include: rubbing of a material, transport of a web through a roller system, pneumatic conveying of powder, flow of liquids through pipes and people walking on insulating flooring.

The charge resulting on one component of the system may be measured directly by use of a Faraday pail, or indirectly by observation of the electric fields or potentials created by this charge. Because of the equality in the magnitude of charge on the test surface and on the rubbing material, there is the option of measuring charge on either.

Fresh materials shall be used to avoid changes caused by contamination.

Charge separation may be accompanied by charge dissipation. Discharges can occur between the separating bodies. The balance of charge measured is the result of the balance of charging and discharge processes. The charge measurement should therefore be made as soon as practicable after charge generation. For example, flowing products under test should fall directly into a Faraday pail measurement system.

Ambient electric fields can influence the charge separation process and so these measurements should be made in a field free environment.

8.9 Current

There are several areas in which the measurement of current is relevant in electrostatics. Very small currents, usually less than a few nano amperes, arise from conduction through insulators. Larger currents of the order of microamperes are produced by flowing, charged products while large currents of amperes can be generated in electrostatic discharges. Commercially available electrometers provide a convenient means for the measurement of the first two although the determination of the increase of potential of a known capacitor presents an alternative method for all three current levels. With spark discharge currents it is necessary to ensure that all the charge flow passes through the measurement shunt and for the shunt to have a low resistance so that the voltage generated by current flow is small compared to the source voltage. The reactive impedance of the shunt should be negligible in comparison to its resistance so that the voltage across the shunt is an accurate measure of instantaneous current flow. The transient recording system shall have a response rise time adequately shorter than the minimum rise time of the fastest discharge event to be measured. For spark discharges from conducting bodies this should be 1 ns or less.

Care needs to be taken with the maximum voltage excursion of the measuring system and means of shorting to earth without sparking should be provided in areas where flammable gases may be present.

A convenient way to keep the inductance low is to form a 1 Ω (e.g.) input resistor from ten 10 Ω resistors in parallel. Surface mount resistors are useful to achieve a shunt with low reactive impedance for frequencies up to 1 GHz. A series resistance of 50 Ω should connect to the input of the 50 Ω cable connected to the detector which should have a 50 Ω input impedance to earth. The 50 Ω resistors are necessary to match the characteristic impedance of the cable at its terminations to prevent signal reflections distorting observed waveforms. It should be noted that the 50 Ω input impedance halves the observed voltage. Great care is needed with earthing and shielding to avoid spurious observations of fast transient discharge events. It is useful to check whether negligible signals arise if the discharge event takes place directly to the earthed surface rather than to the probe.

8.10 Energy in capacitive discharges

The determination of electrostatic energy released in a discharge is important for the assessment of the damage vulnerability of sensitive devices and the incentive of mixtures of flammable materials in air. There is no method that is generally accepted at present for the direct measurement of this energy. The most general way to determine the stored electrostatic energy is by measurement of the voltage, V , and capacitance, C , of the charged object, the energy being given by $0,5 CV^2$. The discharge of a known capacitor charged to a preset potential, therefore, forms the basis of current methods to assess discharge effects. The method for testing powered electronic equipment is described in IEC 61000-4-2 while the determination of minimum ignition energy of dust/air mixtures is given in BS EN 13821.

8.11 Ignition energy

8.11.1 General

The energy required to ignite flammable gases or dust clouds is smaller if the discharging circuit includes resistive and inductive components which extend the duration of the discharge. The test generally accepted to be most representative does not use additional inductors. The minimum ignition energy (MIE) for a particular vapour/air or dust/air mixture is found by repeated testing with progressive reduction of spark energy until ignition is not obtained. The powder is dispersed into the air in the vicinity of the spark gap by a short puff of compressed air and the spark discharge applied a few tens of milliseconds later. A large number of observations is required for each set of conditions. The method of determination of minimum ignition energy of dust/air mixtures is given in IEC 61241-2-3.

A convenient method for assessing the incendivity of sparks from charged surfaces is to draw a spark to an earthed, spherical electrode which is enclosed within an insulating chamber fed with a controlled flammable gas mixture. The device is called an ignition probe. Ignition of the flammable mixture bathing the electrode gives a direct incendivity indication. Ignitions seem to occur more readily if the surfaces are at a negative potential relative to the probe. The occurrence of ignition will indicate that conditions are within the boundaries for ignition risk. Ignition is, however, a statistical process and so many tests are required without ignitions to be sure that ignition risks are small.

The voltage shall be measured both before and after the discharge, because not all the initial energy may be released.

The effect of electrostatic sparks can change greatly with rise time and duration. The rise time of air sparks between metal conductors is observed to be faster for lower voltages and even faster with a closing rather than stationary spark gap. The IEC test specifies the use of both a spark discharge from a charged electrode approaching a sensitive circuit and direct contact of the electrode, ensuring the correct current waveform by means of a fast relay. The instantaneous discharge current will be higher for the direct contact and this is, therefore, a more severe test of the device.

Reliable measurement of ignition energies for flammable vapour/air or dispersed dust/air mixtures requires the components to be well mixed and the concentrations properly defined at the ignition electrodes. The gap between the spark electrodes shall be greater than a certain minimum to reduce the cooling effect of the electrodes on the development of the flame kernel. Care shall be taken with the discharge circuit and its components to ensure that the discharge is really capacitive. Optimization of flow rates and timing of the ignition discharge in relation to the dispersion of the dust cloud requires considerable experience.

Good ventilation of the general region is needed when using the ignition probe to avoid build-up of a large volume of flammable atmosphere and risk of a large scale explosion if ignition occurs.

8.11.2 Equivalent energy

The ignitability of a flammable substance to an electrostatic discharge is characterized by minimum ignition energy. The power density (temporal factor) and spatial spread (spatial factor) of electrostatic discharge are also important factors in determining the ignition probability of an electrostatic discharge. However, except for spark discharges, it is not easy to obtain the total energy of electrostatic discharge. Much less easy is it to determine how much of that energy contributes to ignition. For that reason, spark discharge is used to measure ignition energy because the discharge provides high energy density both temporally and spatially and then facilitates determination of discharge energy. In an electrostatic discharge other than the spark discharge, the equivalent energy for that electrostatic discharge is defined as $X J$ when the discharge ignites a flammable atmosphere with the minimum ignition energy $X J$. Since equivalent energy is experimentally determined in comparison with ignition energy, it is convenient in analysing the risk of ignition. Note that the

discharge energy other than spark discharge referred to hereafter corresponds to this equivalent energy. Recently, in view of how effective a specific electrostatic discharge is at igniting a flammable atmosphere, this equivalent energy may also be referred as effective energy (see [7] and [8]).

8.12 Charge transferred in electrostatic discharges

8.12.1 General

WARNING charge transfer measurements should never be made in the presence of flammable atmospheres.

The quantity of charge transferred in an electrostatic discharge can be measured for all types of discharge. One application of charge transfer measurement is the prediction of ignition probability. There is some evidence that the probability of a discharge igniting a flammable atmosphere can be related to the quantity of charge transferred in the discharge [7]. It should be noted that any relationship between charge transfer and ignition probability may be limited to the specific materials from which discharges are generated and the specific measuring system used. The reason for this is that discharges differ in the spatial and temporal distribution of energy. For example, a brush discharge may be less likely to cause ignition than a spark discharge in which the same quantity of charge is transferred because the energy associated with the transfer of charge is distributed through a larger volume of gas. Although limit values have been established for the minimum charge transfer required to ignite gases of different sensitivity, the limit values should be regarded as a general guide only. Particular care shall be exercised when considering the safety of materials for which charge transfer measurement results are close to the specified limit values.

The basic arrangement for measuring charge transferred in electrostatic discharges is shown in Figure 6.

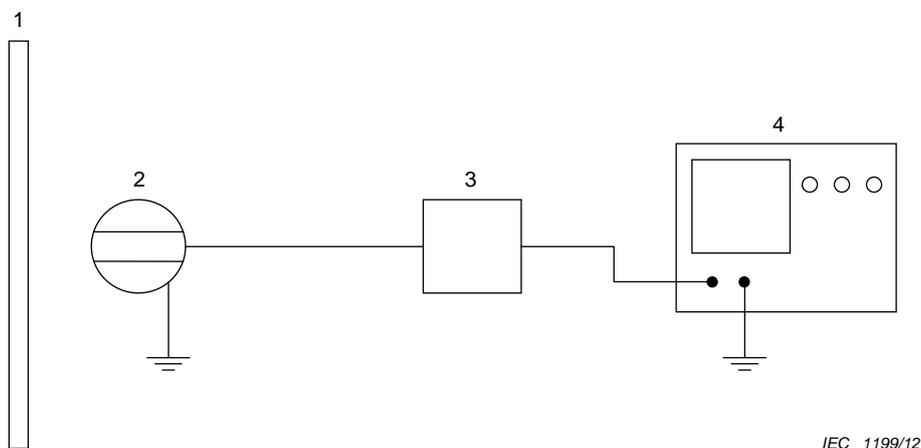


Figure 6a) – Basic arrangement

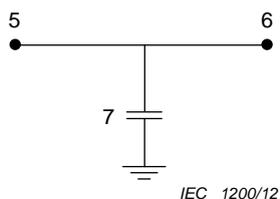


Figure 6b) – Measurement circuits with capacitor

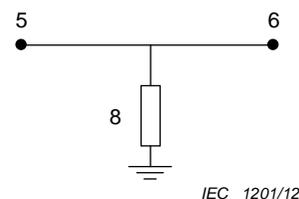


Figure 6c) – Measurement circuits with resistor

Key

- 1 charged object or surface
- 2 spherical, bi-component discharge electrode
- 3 measuring circuit
- 4 digital storage oscilloscope (e.g. 1 GHz bandwidth)
- 5 connection to electrode
- 6 connection to oscilloscope
- 7 capacitor (e.g. 20 nF)
- 8 resistor (e.g. 0,25 Ω)

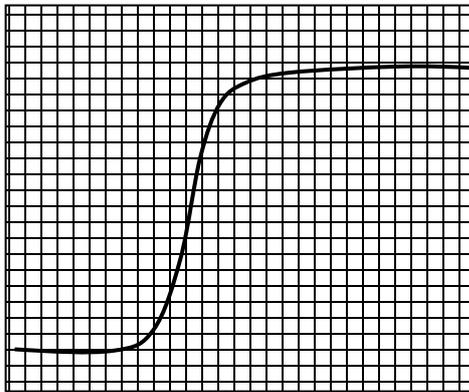
Figure 6 – Basic arrangements for measuring charge transferred in electrostatic discharges with alternative measuring circuits

8.12.2 Discharge electrode

The size and geometry of the electrode should be suitable for the application for which the measurements are being made. For example, the optimum diameter to produce discharges that are incendiary to typical hydrocarbon gases from highly charged surfaces is about 30 mm. For surfaces with lower charge density, a smaller diameter electrode, 2 mm for example, may be more suitable, particularly if the ignition of very sensitive gases such as hydrogen is of concern. Electrodes of diameter significantly less than 2 mm should be avoided as they are likely to induce corona discharge. Electrodes of more than 10 mm diameter should ideally be bi-component, with the central core connected to the measuring system and the outer sheath connected to earth. The use of bi-component electrodes is necessary to avoid the effect of charge induced on the electrode before a discharge occurs.

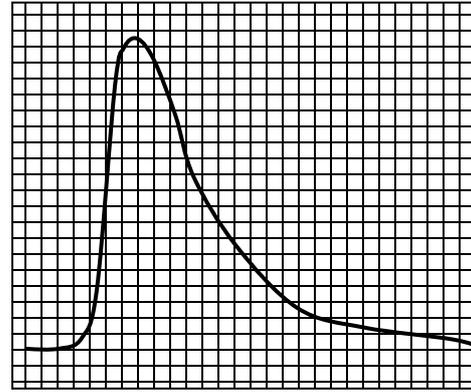
8.12.3 Measuring circuit

The measuring circuit can be based on one of two components: a capacitor or a resistor, typical values being 20 nF and 0,25 Ω respectively. An oscilloscope essentially measures potential difference with respect to time. Each of the alternative components will produce a different voltage/time trace on the oscilloscope as shown in Figure 7.



IEC 1202/12

Figure 7a) – Capacitor measuring circuit



IEC 1203/12

Figure 7b) – Resistor measuring circuit

NOTE These are idealized representations of oscilloscope traces and, in practice, the voltage/time trace may display ringing and other artefacts.

Figure 7 – Oscilloscope voltage/time traces

A capacitor in the measuring circuit produces a step function trace on the oscilloscope. The charge transfer in coulombs can be calculated by multiplying the amplitude of trace in volts by the value of the capacitance in farads.

A resistor in the measuring circuit produces a pulse. The measuring system of the oscilloscope is used to integrate the voltage with respect to time to produce a value in volts per second (V/s) that can then be divided by the value of the resistor in ohms, to give the charge transfer in coulombs.

8.12.4 Alternative charge transfer measuring arrangements

Commercial instruments, referred to as handheld coulomb meters, are available that provide a self-contained system for measuring charge transfer. The instruments are generally easy to use and provide a direct read-out of the charge transfer value. Handheld coulomb meters are useful for identifying potential sources of incendiary discharges, but in using them consideration should be taken of the following:

- if the discharge electrode is fixed, it may not be the optimum size for the application;
- if the discharge electrode is a solid sphere, measurements may be susceptible to induced charges;
- if no graphical display is provided, there may be no way of determining if the measurement is of a single discharge or the accumulated charge from multiple discharges.

8.13 Capacitance

Capacitance can be measured using alternating voltage bridge instruments or by measuring voltage changes when charge is shared between a known and an unknown capacitance. For charge sharing between two capacitors C_1 and C_2 with initial voltages V_1 and V_2 and a final common voltage V_3 , the unknown capacitance C_2 is given by:

$$C_2 = C_1 \cdot \frac{V_1 - V_2}{V_3 - V_2}. \quad (10)$$

Care is needed in measuring the values of capacitors used to provide energy for spark discharges because dielectric relaxation may affect the rate at which charge is available, so the effective capacitance may be less than that measured by low frequency methods. In this situation, measurement by charge sharing via a spark discharge and using a capacitor of known high quality at around the normal operating voltage may be the most appropriate method.

Low values of capacitance shall be obtained by measuring the difference of readings with the active lead just not contacting the test item, and then just in contact, with no other change to connection arrangements, to allow for the capacitance of connecting leads.

8.14 Electric strength

The measurement of the electric strength of thin films or layers of insulation is an important factor in assessing the possibility of sustaining propagating brush discharges on the material. The important parameter is the breakdown voltage and the critical value is about 4 kV.

The breakdown strength of insulators is dominated by defects within the material. The result is, therefore, greatly influenced by the area under test. The number of defects increases and, hence, breakdown strength reduces with increasing area. Conversely, a smaller area gives a greater breakdown voltage and greater apparent hazard. As a guide, the breakdown strength of polyethylene is about 20 MVm^{-1} , so 4 kV will be sustained by a layer some $200 \text{ }\mu\text{m}$ thick. The capacitance of a plate capacitor having such layer-type dielectric is about 90 nF m^{-2} and the stored energy ($0,5 \text{ CV}^2$) at 4 kV is 720 mJ m^{-2} . Some 7 mJ of energy is, therefore, in principle available from an area of 100 cm^2 of the material. A test electrode area of a few square centimetres will provide a realistic estimate of the hazard.

A simple circuit based on charging a capacitor has been developed to provide the test ramp voltage. Care shall be taken to avoid electric shock since the circuit employs high voltage in association with large capacitances and relatively low protective resistances. Test methods are given in IEC 60243-1 and IEC 60243-2.

Bibliography

- [1] LUTTGENS, G. and WILSON, N., "*Electrostatic Hazards*", Butterworth, Heinemann 1997
- [2] AMERASEKARA, A. and DUVVERY, C., "*ESD in Silicon Integrated Circuits*", John Wiley & Sons Ltd, 1995
- [3] KELLY, M., "*A Comparison of electrostatic discharge models and failure signatures for CMOS integrated circuit devices*", EOS/ESD Symposium 1995
- [4] CLC/TR 50404/2003, *Electrostatics – Code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity*
- [5] CROSS, J.A., "*Electrostatics – Principles, Problems and Applications*", Adam Hilger, Bristol, 1987
- [6] CHANG, Jen-Shih, et al., "*Handbook of Electrostatic Processes*", Marcel Dekker, New York - Basel - Hong Kong 1995
- [7] GIBSON N. and LLOYD F. C., "*Incendivity of discharges from electrostatically charged plastics*", Brit. J. Appl. Phys., Vol. 16, pp. 1619 - 1631, 1965
- [8] BRITTON, L.G., *Avoiding static ignition hazards in chemical operations*. American Institute of Chemical Engineers, New York, 1999
- [9] IEC 60068-1, *Environmental testing – Part 1: General and guidance*
- [10] IEC 60079-1-1:2002, *Electrical apparatus for explosive gas atmospheres – Part 1-1: Flame proof enclosures "d" – Method of test ascertainment of maximum experimental safe gap*
- [11] IEC 60079-12:2002, *Electrical apparatus for explosive gas atmospheres – Part 12: Classification of mixtures of gases or vapours with air according to their maximum safe gaps and minimum igniting currents*
- [12] IEC 60079-17, *Explosive atmospheres – Part 17: Electrical installations inspection and maintenance)*
- [13] IEC 60079-20:2002, *Electrical apparatus for explosive gas atmospheres – Part 20: Data for flammable gases and vapours, relating to the use of electrical apparatus*
- [14] IEC 60721-2-1, *Classification of environmental conditions – Part 2-1: Environmental conditions appearing in nature – Temperature and humidity*
- [15] IEC 61340-2-1, *Electrostatics – Part 2-1: Measurement methods – Ability of materials and products to dissipate static electric charge*
- [16] IEC 61340-2-3, *Electrostatics – Part 2-3: Methods of test for determining the resistance and resistivity of solid planar materials used to avoid electrostatic charge accumulation*
- [17] IEC 61340-3-1, *Electrostatics – Part 3-1: Methods for simulation of electrostatic effects – Human body model (HBM) electrostatic discharge test waveforms*
- [18] IEC 61340-3-2, *Electrostatics – Part 3-2: Methods for simulation of electrostatic effects – Machine model (MM) electrostatic discharge test waveforms*

- [19] IEC 61340-4-1, *Electrostatics – Part 4-1: Standard test methods for specific applications – Electrical resistance of floor coverings and installed floors*
 - [20] IEC 61340-4-4, *Electrostatics – Part 4-4: Standard test methods for specific applications – Electrostatic classification of flexible intermediate bulk containers (FIBC)*
 - [21] IEC 61892-7, *Mobile and fixed offshore units – Electrical installations – Part 7: Hazardous areas*
 - [22] ANSI/ESD STM5.3.1-1999, *Charged Device Model (CDM) – Component Level U*. von Pidoll et al., *Determining the incendivity of electrostatic discharges without explosive gas mixtures*. IEEE Transactions on Industry Applications, 40 (2004), 1467-1475
 - [23] LANEGGER, T. et al, PTB, Braunschweig, 2010
 - [24] GLOR, M. et al, *Measurement of Charge Transfer during Filling and Emptying FIBC; Process Safety and Environmental Protection* 87 (1), pp. 64-69
 - [25] TAYLOR, D.M., SECKER, P.E., *"Industrial Electrostatics: Fundamentals and Measurements"*,1994
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	47
INTRODUCTION.....	49
1 Domaine d'application	50
2 Références normatives.....	50
3 Termes et définitions	51
4 Principes fondamentaux relatifs à l'électricité statique	54
4.1 Généralités.....	54
4.2 Décharge électrique par contact.....	54
4.3 Charge par induction	56
4.4 Transfert de charge par conduction	56
4.5 Rétention de charge	57
4.6 Influence de l'humidité ambiante	58
4.6.1 Généralités.....	58
4.6.2 Mesures sur site	58
4.7 Décharges électrostatiques	58
4.7.1 Généralités.....	58
4.7.2 Décharges par étincelles	58
4.7.3 Décharges par effet couronne.....	59
4.7.4 Décharges par effet de brosse.....	60
4.7.5 Décharges par effet de brosse par propagation	60
4.7.6 Décharges par effet de cône.....	61
4.8 Forces mécaniques dans un champ électrostatique	61
5 Problèmes et dangers d'ordre électrostatique	61
5.1 Généralités.....	61
5.2 Composants et systèmes électroniques	62
5.2.1 Généralités.....	62
5.2.2 Types de défaillance.....	62
5.2.3 Problèmes et risques à différentes périodes du cycle de vie	63
5.3 Inflammation électrostatique – Dangers.....	63
5.3.1 Généralités.....	63
5.3.2 Décharges par étincelles provenant des objets conducteurs	64
5.3.3 Décharges par effet couronne provenant des objets conducteurs	64
5.3.4 Décharges par effet de brosse provenant de surfaces isolantes	64
5.3.5 Décharges par effet de brosse par propagation provenant de surfaces isolantes.....	64
5.3.6 Décharges provenant des individus	65
5.3.7 Potentiel d'inflammation des décharges électrostatiques	65
5.4 Sensation physiologique.....	67
5.5 Simulation de décharges électrostatiques.....	68
5.5.1 Généralités.....	68
5.5.2 Décharges capacitives pour mesures de l'énergie d'inflammation.....	69
5.5.3 Modèle du corps humain.....	69
5.5.4 Modèle de la machine.....	69
5.5.5 Modèle du composant chargé	69
6 Solutions générales aux problèmes et dangers.....	70

6.1	Généralités.....	70
6.2	Méthodes courantes	70
7	Applications utiles relatives aux effets électrostatiques.....	72
8	Aspects généraux relatifs aux mesures.....	72
8.1	Généralités.....	72
8.2	Champ électrique	73
	8.2.1 Généralités.....	73
	8.2.2 Application	73
8.3	Potentiel.....	74
	8.3.1 Généralités.....	74
	8.3.2 Potentiel de surface.....	74
	8.3.3 Potentiel spatial.....	75
8.4	Charge	75
8.5	Densité de charge	76
	8.5.1 Densité de charge surfacique	76
	8.5.2 Densité de charge volumique.....	76
8.6	Décroissance de la charge	77
8.7	Résistance et résistivité	78
8.8	Chargeabilité (capacité de charge)	79
8.9	Courant	79
8.10	Energie des décharges capacitatives	80
8.11	Énergie d'inflammation	80
	8.11.1 Généralités.....	80
	8.11.2 Energie équivalente.....	81
8.12	Charge transférée dans des décharges électrostatiques.....	81
	8.12.1 Généralités.....	81
	8.12.2 Électrode de décharge.....	82
	8.12.3 Circuit de mesure	83
	8.12.4 Autres dispositions de mesure du transfert de charge.....	83
8.13	Capacité.....	84
8.14	Rigidité diélectrique.....	84
	Bibliographie.....	85
	Figure 1 – Charge par induction.....	56
	Figure 2 – Transfert de charge par conduction lorsque les objets 1 et 2 sont conducteurs	56
	Figure 3 – Circuit électrique équivalent d'un conducteur à charge électrostatique	57
	Figure 4 – Exemples de formes d'onde de décharge par effet de brosse mesurées avec un oscilloscope numérique à mémoire rapide.....	67
	Figure 5 – Circuit de simulation des décharges électrostatiques	68
	Figure 6 – Disposition de base de mesure de la charge transférée dans des décharges électrostatiques avec variantes de circuits de mesure.....	82
	Figure 7 – Tracés d'oscilloscope tension/temps	83

Tableau 1 – Exemple de série triboélectrique.....	55
Tableau 2 – Capacités électriques types.....	59
Tableau 3 – Niveaux de perception types et réponses physiques des individus aux décharges basées sur une capacité du corps de 200 pF.....	68
Tableau 4 – Valeurs types utilisées dans les modèles de simulation ESD	70

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

ÉLECTROSTATIQUE –

**Partie 1: Phénomènes électrostatiques –
Principes et mesures**

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) 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, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). 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 de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de la CEI. La CEI n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de brevet. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La tâche principale des comités d'études de la CEI est d'élaborer les Normes internationales. Cependant, lorsqu'un comité d'études a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales (ceci pouvant comprendre des informations sur l'état de la technique par exemple), il peut décider de publier un Rapport technique.

La CEI/TR 61340-1, qui est un rapport technique, a été établie par le comité d'études 101 de la CEI: Electrostatique.

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

Projet d'enquête	Rapport de vote
101/344/DTR	101/355/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 2.

Une liste de toutes les parties de la série CEI 61340, présentées sous le titre général *Électrostatique*, peut être consultée sur le site web de la CEI.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de la CEI sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

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

INTRODUCTION

Bien que l'électricité statique soit connue depuis environ 2 500 ans, elle n'a eu jusqu'à présent qu'une très faible incidence sur l'Homme. Plus récemment, au cours du siècle passé, les connaissances sur la nature de l'électricité statique se sont améliorées permettant ainsi de mieux décrire les principes de séparation et d'accumulation de charge. En dépit de cette meilleure compréhension, il est toujours difficile de prévoir avec certitude la polarité et l'amplitude des accumulations de charge quelle que soit la situation et ce en raison des nombreux facteurs impliqués. De ce fait, pour un grand nombre de personnes les phénomènes électrostatiques relèvent davantage du domaine des « sciences occultes » que de la science.

Depuis le développement de matériaux modernes, notamment les polymères, et leurs applications pratiques pratiquement omniprésents, telles que les matériaux de revêtement de sol, d'ameublement, d'habillement et autres matériaux industriels, l'électricité statique est devenue un phénomène quotidien. Dans certaines industries, telles que la fabrication et les traitements de dispositifs électroniques utilisant des matériaux inflammables, les décharges électrostatiques intempestives et invisibles peuvent donner lieu à des dommages conséquents de composants ou altérer leur fiabilité, voire provoquer des incendies ou des explosions. Dans la vie courante, les accidents de chocs électrostatiques au personnel sont devenus habituels. Ceci a justifié la nécessité de mieux comprendre ces phénomènes et de spécifier les matériaux, appareils et procédures à appliquer dans le cadre de la prévention et du contrôle des problèmes électrostatiques dans l'environnement humain.

Le présent rapport technique donne un aperçu du domaine des phénomènes électrostatiques et en fournit aux utilisateurs le contexte, les principes, les méthodes de mesure et les applications industrielles élaborés conformément aux publications du TC101 de la CEI.

ÉLECTROSTATIQUE –

Partie 1: Phénomènes électrostatiques – Principes et mesures

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 61340, qui est un rapport technique, décrit les principes fondamentaux relatifs aux phénomènes électrostatiques, comprenant la génération, le maintien et la dissipation de la charge, et les décharges électrostatiques.

Les méthodes de mesure des phénomènes électrostatiques et des propriétés associées des matériaux sont décrites de manière générale.

Les dangers et les problèmes liés aux phénomènes électrostatiques ainsi que les principes de leur contrôle sont présentés dans les grandes lignes.

Des applications utiles des effets électrostatiques sont résumées.

Le présent rapport technique est destinée à servir de référence pour l'élaboration de normes relatives aux phénomènes électrostatiques et de guide pour l'utilisateur final.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CEI 60079-10-1, *Atmosphères explosives – Partie 10-1: Classement des emplacements – Atmosphères explosives gazeuses*

CEI 60079-10-2, *Atmosphères explosives – Partie 10-2: Classement des emplacements – Atmosphères explosives poussiéreuses*

CEI 61000-4-2, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-2: Techniques d'essai et de mesure – Essai d'immunité aux décharges électrostatiques*

CEI 61340-5-1, *Electrostatique – Partie 5-1: Protection des dispositifs électroniques contre les phénomènes électrostatiques – Exigences générales*

CEI 61340-5-2, *Electrostatique – Partie 5-2: Protection des dispositifs électroniques contre les phénomènes électrostatiques – Guide d'utilisation*

CEI 60243-1, *Rigidité diélectrique des matériaux isolants – Méthodes d'essai – Partie 1: Essais aux fréquences industrielles*

CEI 60243-2, *Rigidité diélectrique des matériaux isolants – Méthodes d'essai – Partie 2: Exigences complémentaires pour les essais à tension continue*

CEI 61241-2-3, *Matériels électriques destinés à être utilisés en présence de poussières combustibles – Partie 2: Méthodes d'essai – Section 3: Méthode de détermination de l'énergie minimale d'inflammation des mélanges air/poussières*

BS EN 13821, *Potentially explosive atmospheres. Explosion prevention and protection. Determination of minimum ignition energy of dust/air mixtures*
(disponible en anglais uniquement)

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

3.1

additif antistatique

agent de remplissage antistatique, traitement antistatique

substance ajoutée à, ou procédé appliqué à un liquide ou à un solide, permettant de réduire sa tendance à se charger par contact et frottement, ou de favoriser une migration plus rapide de la charge et réduire de ce fait sa capacité à retenir une part importante de charge au contact avec la terre

3.2

matériau antistatique

matériau qui permet de bloquer ou limiter les charges triboélectriques

3.3

liaison

connexion électrique d'au moins deux objets conducteurs qui permet de réduire leur différence de potentiel à un niveau négligeable

3.4

claquage

défaillance, au moins temporaire, des propriétés isolantes d'un support isolant sous contrainte électrique

3.5

tension de claquage

tension à laquelle un claquage se produit, dans des conditions d'essai exigées ou en service

3.6

décroissance de la charge

neutralisation ou migration de charge à travers un matériau conduisant à une réduction de la densité de charge ou du potentiel de surface au niveau de la zone où a été déposée la charge

3.7

temps de décroissance de la charge

temps de relaxation de la charge

temps nécessaire pour réduire la charge d'une valeur spécifiée à une valeur spécifiée inférieure

Note 1 à l'article: La valeur spécifiée inférieure est communément égale à une dizaine ou 1/e de la valeur initiale (e = 2,718).

3.8 conductivité

capacité de la substance à conduire le courant électrique ($S \times m^{-1}$)

3.9 conducteur ou matériau conducteur

objet ou matériau fournissant une conductivité suffisamment élevée de sorte que les différences de potentiel sur n'importe laquelle de ses parties ne soient pas suffisamment importantes pour présenter une valeur significative dans la pratique

Note 1 à l'article: Il s'agit en général d'un matériau d'une résistance inférieure à environ $10^5 \Omega$ bien que d'autres normes puissent définir différentes gammes de résistance à cet effet.

3.10 matériau dissipatif

matériau qui permet à la charge de migrer sur sa surface et/ou à travers son volume en un temps qui est court comparé à l'échelle de temps des actions créant la charge ou suscitant un problème électrostatique

Note 1 à l'article: En général, un matériau d'une résistance supérieure à environ $10^5 \Omega$ et inférieure à environ $10^{11} \Omega$ est considéré comme dissipatif. D'autres normes peuvent spécifier des valeurs divergentes des valeurs exactes applicables aux limites.

3.11 terre, mise à la terre

masse

connexion électrique (liaison) d'un conducteur au corps principal de la terre permettant de s'assurer qu'il est au potentiel de terre (voir également masse, mise à la masse)

3.12 décharge électrostatique

ESD (*en anglais*: electrostatic discharge)

transfert de charge par contact direct ou par claquage du matériau ou objet à un potentiel électrique différent à son environnement immédiat

3.13 groupes d'explosion

atmosphères gazeuses inflammables qui sont subdivisées dans les groupes d'explosion I, IIA, IIB et IIC pour définir leur inflammabilité

Note 1 à l'article: Le groupe d'explosion le plus sensible est le Groupe IIC.

Note 2 à l'article: Voir les références de [9] à [11]¹ pour la définition de la méthode de classification.

3.14 substance inflammable

substance sous forme de gaz, de liquide ou de solide, ou un mélange de ces éléments, capable de propager la combustion lorsqu'elle est soumise à une source d'inflammation suffisamment importante

3.15 tension de seuil de danger

potentiel électrique minimal d'une charge stockée capacitive susceptible d'engendrer un danger électrostatique

¹ Les références entre crochets se réfèrent à la bibliographie.

3.16**emplacement dangereux**

emplacement dans lequel une substance inflammable est présente, ou dans lequel on prévoit qu'elle pourrait être présente, en quantité suffisante pour nécessiter des précautions spéciales contre l'inflammation

Note 1 à l'article: Les zones ou emplacement dangereux sont définis dans la CEI 60079-10-1 et la CEI 60079-10-2.

3.17**élément isolant**

matériau isolant

matériau présentant une très faible mobilité de charge de sorte que toute charge présente sur la surface y est retenue pendant longtemps

Note 1 à l'article: Le raccordement d'un matériau isolant à la terre ne favorise pas la migration de charge.

3.18**énergie d'inflammation minimale**

MIE (*en anglais*: minimum ignition energy)

plus petite quantité d'énergie libérée dans une étincelle électrique capacitive susceptible d'enflammer un mélange d'un matériau inflammable spécifié avec l'air ou l'oxygène, selon une procédure définie

3.19**relaxation de la charge**

migration ou neutralisation de la charge à travers un matériau solide, liquide ou gazeux conduisant à une réduction de la densité de charge surfacique et de l'énergie

Note 1 à l'article: Lorsque le potentiel d'une surface est défini, il est également réduit.

3.20**densité de charge surfacique**

σ_s

quantité nette de charge par unité de surface d'un solide ou d'un liquide

3.21**résistivité superficielle**

Ω

résistance entre les côtés opposés d'un carré sur la surface d'un matériau, soit pour le courant électrique circulant sur une surface, le rapport de la chute de tension c.c. au courant de surface

3.22**processus de charge triboélectrique**

procédé de charge électrique au cours duquel la charge est générée par le contact et la séparation de deux surfaces qui peuvent être à l'état solide, liquide ou gazeux porteur de particules

3.23**densité de charge volumique**

σ_v

quantité nette de charge par unité de volume d'un solide, liquide ou gaz

3.24**résistivité volumique**

$\Omega \times m$

résistance entre les carrés opposés de 1 m³ de matériau, c'est-à-dire, le rapport de la chute de tension c.c. à la quantité de courant traversant le matériau

4 Principes fondamentaux relatifs à l'électricité statique

4.1 Généralités

En règle générale, la charge électrostatique sur un matériau, un produit ou un objet est générée par les éléments suivants:

- contact et frottement;
- transfert de charge;
- induction dans un champ électrique;
- effet de polarisation;
- effet photoélectrique;
- effet pyroélectrique;
- effet piézoélectrique;
- ionisation et adsorption ionique;
- procédés électrochimiques.

Cependant, la charge électrostatique est principalement due aux charges triboélectriques. Si deux substances initialement non chargées viennent en contact, un transfert de charge a généralement lieu à leur limite commune. Si un gaz contenant des particules solides ou des gouttelettes liquides en suspension est chargé par contact et séparation, le gaz peut être considéré comme porteur d'une charge électrostatique. Lors de la séparation, chaque surface transporte une charge supplémentaire de même amplitude mais de polarité opposée. Les objets conducteurs ou dissipatifs peuvent devenir chargés par induction s'ils résident dans un champ électrique produit par d'autres objets ou conducteurs chargés à fort potentiel situés à proximité. Tout objet peut devenir chargé s'il peut cumuler des particules ou des molécules chargées.

Il est par conséquent très important de réaliser une évaluation de ces phénomènes permettant de mettre correctement en œuvre les procédures d'essai et d'interpréter sans aucune ambiguïté les données qui en résultent. Ceci est également important pour ce qui concerne le choix des électrodes, la protection des dispositifs de mesure du courant contre l'impulsion capacitive initiale, et le moment auquel la valeur est enregistrée. Il convient que le dernier cas soit bien entendu approprié à la circonstance pratique pour laquelle les données sont requises. Le présent rapport technique comprend des commentaires supplémentaires accompagnés des descriptions des méthodes d'essai individuel le cas échéant.

4.2 Décharge électrique par contact

La décharge électrique par contact peut se produire au niveau des interfaces solide/solide, liquide/liquide ou solide/liquide. Les gaz propres ne peuvent pas charger les matériaux de cette façon. Cependant, si un gaz contient des particules solides ou des gouttelettes liquides en suspension, elles peuvent être chargées par contact rendant ainsi le gaz porteur d'une charge électrostatique du fait de la présence de ces particules.

Dans le cas de solides constitués de différents matériaux, initialement non chargés et généralement au potentiel de terre, la charge est transférée d'un matériau à l'autre lorsqu'ils sont en contact. Lorsqu'ils se séparent, une charge nette positive subsiste sur une surface et une charge nette négative reste sur l'autre surface. L'importance de la charge augmente en fonction de la taille des zones de contact et la taille est affectée par la pression de contact. Un frottement supplémentaire augmente également la zone de contact effective.

Les proportions relatives et la polarité de la charge transférée entre les matériaux peuvent être présentées sous la forme d'une liste, appelée série triboélectrique. Un matériau est censé se charger positivement lorsqu'il est en contact avec des matériaux plus bas dans la série triboélectrique, et négativement lorsqu'il est en contact avec des matériaux plus hauts. Il convient de noter que la position d'un matériau dans la série triboélectrique n'est

qu'approximative, elle dépend des conditions d'essai et du fait que deux échantillons du même matériau frottés l'un contre l'autre peut donner lieu à des charges très élevées.

Le Tableau 1 donne des exemples de série triboélectrique.

Tableau 1 – Exemple de série triboélectrique

Elément	Charge
Poil de lapin Verre Cheveux Polyamide (nylon) Laine Fourrure de poil Soie Aluminium Papier Coton Acier Bois	Positive
Caoutchouc Acétate Polyéthylène (PE) et polypropylène (PP) PET (polyéthylène téréphtalate) PVC (polychlorure de vinyle) Polyuréthane PTFE (polytétrafluoroéthylène)	Négative

Les deux matériaux portant une charge électrique de polarité opposée, il se crée par conséquent un champ électrique entre eux. Si les matériaux sont ensuite séparés, des mesures doivent être prises pour pallier l'attraction qui s'exerce entre les charges contraires compte tenu de la différence de potentiel entre les matériaux qui augmente de manière linéaire en fonction de la distance. Cette différence de potentiel plus élevée tend à ramener la charge vers tout point de contact résiduel. Lorsque deux conducteurs sont impliqués, la recombinaison des charges est virtuellement terminée et aucune quantité significative de charge ne subsiste sur l'un ou l'autre des matériaux après séparation. Si l'un des matériaux, voire les deux, est non-conducteur, la recombinaison n'est pas complète et les matériaux séparés conservent une partie de leur charge. Il peut n'y avoir qu'une faible quantité de charge mais, du fait que la distance qui sépare les charges lorsque les surfaces sont en contact est extrêmement petite, le potentiel généré au moment de la séparation peut facilement atteindre plusieurs kilovolts. Dans la pratique, les surfaces sont généralement irrégulières ou rugueuses ce qui favorise l'augmentation de la charge si le contact et la séparation impliquent le frottement et/ou la pression, dans la mesure où ces actions augmentent la surface de contact réelle. Il est à noter que la taille de la surface réelle de contact peut se révéler très différente de la surface de contact apparente. Cette différence peut être estimée à un ordre de grandeur ou plus.

La décharge électrique par contact dans les liquides relève principalement du même processus, elle peut cependant dépendre de la présence de particules à charge ionique ou infra-microscopique (les dernières sont généralement moins importantes). Les ions (ou particules) à une polarité peuvent être absorbés à l'interface pour ensuite attirer les ions de polarité opposée formant une couche diffuse de charge dans le liquide, proche de la surface. Si le liquide est ensuite déplacé par rapport à l'interface, il éloigne une partie de cette couche

diffuse, contribuant de ce fait à la séparation des charges contraires. A l'instar des solides, une tension élevée est générée du fait de l'opération de séparation, à condition que le liquide soit suffisamment non-conducteur pour empêcher la recombinaison. Les processus de ce type peuvent se produire aux interfaces solide/liquide et liquide/liquide.

4.3 Charge par induction

Tout objet chargé est entouré d'un champ électrique. L'introduction d'un conducteur ou matériau dissipatif dans ce champ modifie la distribution du champ électrique dans son voisinage et provoque en même temps une redistribution des charges dans le matériau sous l'influence du champ (voir Figure 1a). Lorsqu'il est isolé de la terre, le conducteur absorbe un potentiel en fonction de sa position dans le champ. Le matériau peut produire une décharge électrostatique du fait de ce potentiel.

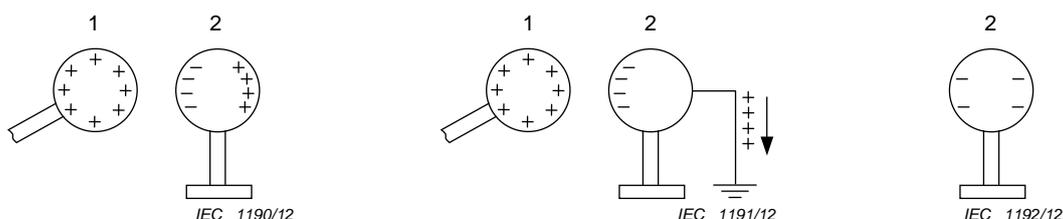


Figure 1a) – Approche d'un objet chargé (1) près d'un objet non chargé (2)

Figure 1b) – Connexion à la terre de l'objet non chargé (2). L'objet non chargé est chargé, mais supposé au potentiel de la terre

Figure 1c) – Retirer la connexion à la terre et puis le premier objet; le conducteur reste chargé (négativement pour cet exemple)

Figure 1 – Charge par induction

Lorsqu'il se trouve dans le champ, si le matériau est temporairement mis à la terre, son potentiel est ramené à zéro et il présente toujours un déséquilibre de charge (Figure 1b). Lorsque l'objet n'est plus soumis au champ électrique, la charge nette subsiste (Figure 1c). Si le matériau est isolé de la terre et n'est plus soumis au champ électrique, le matériau dispose alors d'une charge permettant une décharge électrostatique. Il est de ce fait établi que suite à ce processus, l'objet conducteur est chargé par induction. Une décharge provenant d'un objet de ce type peut cependant être dangereuse, par exemple dans le cas d'une personne isolée se déplaçant dans une zone comportant des matériaux à charge électrostatique.

4.4 Transfert de charge par conduction

Lorsqu'un objet chargé entre en contact avec un autre objet (Figure 2), ils partagent la charge totale dans la mesure de leur possibilité en termes de conductance et de capacité. Ceci constitue une source importante de charge électrostatique dont on peut citer pour exemple les pulvérisations, brouillards ou poussières chargés atteignant ou se déposant sur des objets solides. Un transfert de charge similaire peut également se produire lors de l'incidence d'un flux d'ions gazeux sur un objet.

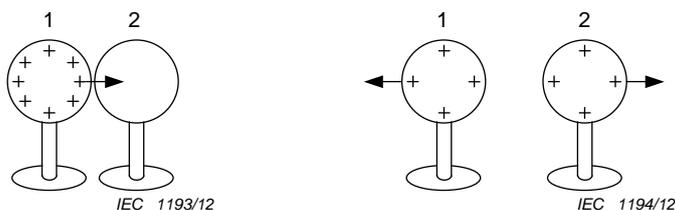


Figure 2a) – Un objet chargé est en contact avec un objet non chargé. Transfert de la charge positive vers l'objet non chargé

Figure 2b) – Les objets chargés seront séparés

Figure 2 – Transfert de la charge par conduction lorsque les objets 1 et 2 sont conducteurs

4.5 Rétention de charge

Même après la séparation au cours du procédé de charge, les charges électrostatiques se recombinaient rapidement soit directement soit par la terre sauf lorsque cette opération est empêchée. Si une charge s'exerce sur un élément non-conducteur, elle est maintenue du fait de la résistance du matériau proprement dit. Pour maintenir la charge sur un conducteur, il doit être isolé des autres conducteurs et de la terre.

Dans des conditions normales, les gaz purs tels que l'air sont non-conducteurs et les particules ou gouttelettes en suspension dans les nuages de poussières, brouillards ou pulvérisations peuvent souvent conserver leurs charges pendant de très longues durées, indépendamment de la conductivité des particules elles-mêmes.

La charge se dissipe à un taux déterminé par les résistances des éléments non-conducteurs dans le système et les capacités des conducteurs. Ce processus est appelé relaxation. Les valeurs relatives à la résistance, résistivité, conductivité et taux de décroissance de la charge capables de créer des problèmes électrostatiques dépendent principalement du système considéré.

De nombreux procédés industriels favorisent souvent la génération continue de charge statique qui s'accumule sur un isolant ou un conducteur isolé. On peut citer à titre d'exemples l'écoulement d'un flux constant de produits liquides ou pulvérulents dans un conteneur métallique isolé, ou une personne marchant sur un revêtement de sol isolant. Le potentiel sur le conducteur isolé est alors le résultat d'un équilibre entre le taux d'entrée de la charge et le taux de dissipation. Le circuit électrique équivalent est illustré à la Figure 3 et le potentiel du conducteur est donné par l'équation suivante:

$$V = V_0 \times e^{-\frac{t}{RC}} + I \times R \times (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (1)$$

où

V est le potentiel du conducteur (V);

V_0 est le potentiel initial;

R est la résistance d'isolement par rapport à la terre (Ω);

T est le temps à partir du début de la charge (s);

C est sa capacité (F).

Le potentiel maximal est atteint lorsque $t \gg RC$, et est donné par la formule suivante:

$$V_{\max} = I \times R \quad (2)$$

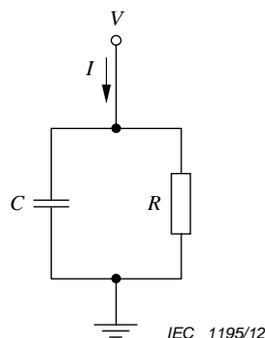


Figure 3 – Circuit électrique équivalent d'un conducteur à charge électrostatique

La capacité d'un objet isolé et sa "résistance d'isolement par rapport à la terre" ou le taux de dissipation de la charge peuvent être mesurés afin d'établir s'il peut y avoir accumulation de charges significatives. Cette mesure ne peut pas s'appliquer aux poussières et brouillards en suspension dans l'air.

Dans ce cas, l'hypothèse inhérente repose sur une valeur unique applicable à la résistance ou au taux de relaxation de la charge d'un matériau isolant. Ceci n'est cependant pas toujours le cas. La valeur de la résistance pour une différence de potentiel donnée peut varier en fonction du temps et dans le même ordre d'idées, le taux de dissipation de la charge peut dépendre de la contrainte électrique (ou quantité de la charge). Ces effets peuvent également être grandement influencés par la température et l'humidité ambiante.

4.6 Influence de l'humidité ambiante

4.6.1 Généralités

Les matériaux absorbent l'eau atmosphérique dans une certaine mesure et s'agissant des isolants, ce phénomène peut grandement augmenter le taux de dissipation de la charge. L'eau absorbée à la surface des matériaux est la principale cause du fait que la conductivité de surface est différente de celle dans la masse du matériau. L'effet, bien connu mais encore mal compris, est que la conductivité augmente en fonction de la quantité d'eau absorbée, c'est-à-dire que dans la pratique, la conductivité augmente avec l'augmentation de l'humidité relative. L'effet est observé même dans des conditions de sécheresse relative (HR < 20 %) dans lesquelles l'eau n'est présente que sous forme moléculaire et en l'absence de couche d'eau libre en phase liquide.

4.6.2 Mesures sur site

Lorsque les mesures sont réalisées dans des conditions pratiques, il est souvent impossible de contrôler l'humidité. Dans la mesure où les résultats sont susceptibles d'être influencés par l'humidité ambiante, il est important de consigner les conditions d'environnement au moment des mesures.

4.7 Décharges électrostatiques

4.7.1 Généralités

Une décharge électrostatique se produit lorsque le champ électrique dépasse la valeur de tenue au claquage du gaz atmosphérique, généralement l'air. A titre d'indication, la tenue au claquage applicable aux surfaces planes ou à fort rayon de courbure de 10 mm ou plus est d'environ 3 MV/m (30 kV/cm) dans des conditions ambiantes normales.

Les décharges électrostatiques varient dans une très grande mesure en termes de type et dépendent de manière plus particulière du système dans lequel la décharge est initiée. Les différents types de décharges peuvent être classés comme décrit de 4.7.2 à 4.7.6, bien que cette classification ne soit pas totalement définie.

4.7.2 Décharges par étincelles

Une étincelle est une décharge électrique entre deux conducteurs présentant différents potentiels. Elle est caractérisée par un canal de décharge lumineuse bien défini qui transporte un courant de densité élevée. L'ionisation du gaz dans le canal est réalisée sur toute sa longueur. La décharge est très rapide et peut donner lieu à un «claquement» sonore. La décharge observée entre le doigt d'une personne et un objet métallique de grande dimension en constitue un exemple type.

La différence de potentiel entre les conducteurs nécessaire pour produire un champ qui dépasse la rigidité diélectrique de l'atmosphère ambiante dépend de la forme et de la distance entre conducteurs.

Le courant qui passe dans une étincelle n'est limité que par l'impédance du circuit externe et de ce fait pratiquement la totalité de la charge sur les électrodes est dissipée dans la décharge. Par conséquent, dans la plupart des cas pratiques, l'étincelle dissipe pratiquement toute l'énergie disponible qui est donnée par l'équation suivante:

$$W = \frac{1}{2} \times Q \times V = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad (3)$$

où

W est l'énergie dissipée (J);

Q est la quantité de charge sur le conducteur (C);

V est son potentiel (V);

C est la capacité par rapport à la terre (F).

Il s'agit de la quantité maximale d'énergie disponible. Toute résistance présente dans le circuit de décharge réduit l'énergie dans l'étincelle et augmente sa durée. Les valeurs types des capacités des conducteurs sont données dans le Tableau 2.

Tableau 2 – Capacités électriques types

Objet	Capacité $\times 10^{-12}$ F
Très petits éléments métalliques (vis, clou)	1 à 10
Petits éléments métalliques (pelle, lance d'arrosage)	10 à 20
Petits conteneurs (seau, fût de 50 l)	10 à 100
Conteneurs moyens (250 l à 500 l)	50 à 300
Corps humain	100 à 300
Importants éléments d'usine (cuves de réaction) étroitement entourés d'une structure mise à la terre	100 à 1 000
Voitures	800 à 1 200

4.7.3 Décharges par effet couronne

Ce type de décharge est associé aux conducteurs à angles ou bords aigus. Il peut se produire lorsque ce type de conducteur est mis à la terre et déplacé vers un objet fortement chargé, ou lorsque le conducteur est porté à un potentiel élevé. La décharge se produit du fait que le champ électrique présent à la surface biseauté est très élevé et supérieur à la contrainte de claquage (3 MV/m). Dans la mesure où le champ distant du conducteur diminue rapidement en fonction de la distance, la zone d'ionisation ne s'en éloigne pas. Il peut être dirigé vers l'objet chargé, ou dans le cas d'un conducteur à potentiel élevé, il peut tout simplement être dirigé dans l'espace.

Les décharges par effet couronne sont difficiles à observer, mais sous un éclairage tamisé, il est possible de discerner une luminescence adjacente au point considéré. A l'extérieur de cette zone ionisée, les ions peuvent dériver, leur polarité dépendant de la direction du champ.

Le champ émis par une surface chargée produisant des décharges par effet couronne sur les bords aigus adjacents et mis à la terre, attire les ions de polarité opposée de la décharge et peut, par conséquent, réduire la charge sur la surface. Bien entendu, ce processus ne se poursuit que si le champ au niveau du point considéré est supérieur au seuil de décharge par effet couronne, rendant de ce fait impossible toute neutralisation complète.

La décharge par effet couronne peut également transférer la charge à une surface ou à un objet. Cet effet peut être utilisé de manière intentionnelle ou peut engendrer un danger de

manière accidentelle, en chargeant par exemple une pièce métallique isolée à un potentiel élevé.

4.7.4 Décharges par effet de brosse

Ces décharges peuvent se produire lorsque des conducteurs mis à la terre s'approchent d'un matériau isolant chargé (par exemple, entre le doigt d'une personne et une surface en plastique, ou entre un tube de remplissage en métal et la surface du liquide dans un réservoir).

Les décharges sont des événements de courte durée qui peuvent être observés et entendus dans des circonstances appropriées. Contrairement aux décharges par étincelles, elles ont tendance à n'impliquer qu'une petite partie de la charge associée au système. De même la décharge ne porte pas nécessairement les deux objets au même potentiel.

4.7.5 Décharges par effet de brosse par propagation

La différence entre la décharge par effet de brosse et une décharge par effet de brosse par propagation réside dans le fait que la première est principalement une décharge à distance (dans l'air) et la seconde est essentiellement une décharge surfacique. La raison pour laquelle le second type est une décharge surfacique est que le champ électrostatique est principalement délimité par une fine couche isolante non à l'extérieur comme dans le premier cas. A cet effet, la fine couche doit avoir une tension de claquage largement supérieure à la tension de claquage de l'espace d'air correspondant. Il est possible d'éviter les décharges par effet de brosse par propagation en s'assurant que la tension de claquage dans toutes les parois et tous les revêtements à forte résistivité est inférieure à 4 kV. La tension de claquage maximale admissible augmente en fonction de l'augmentation de l'épaisseur du diélectrique, et pour une application particulière, la tension de claquage admissible peut être supérieure à 4 kV. La décharge peut être déclenchée par un objet conducteur s'approchant de la surface ou par un claquage du diélectrique. Si le champ dans le diélectrique, issu de la charge sur sa surface, atteint la valeur de claquage du diélectrique, une décharge spontanée se produit et provoque une perforation dans la feuille/le revêtement en plastique. A partir de cette perforation (ou de la décharge vers l'objet approchant), un très fort champ électrique se crée parallèlement à la surface du diélectrique, ce qui initie une série de fortes décharges surfaciques, libérant de ce fait la plus grande part de la charge surfacique.

Une lame diélectrique dont les surfaces présentent des charges de polarité opposée est équivalente à un condensateur à plaque parallèle avec la lame diélectrique placée entre les plaques. L'énergie libérée par les décharges par effet de brosse par propagation peut par conséquent être facilement estimée à partir de l'énergie stockée. La capacité équivalente C_e , pour une lame diélectrique de surface A , d'épaisseur d , de permittivité $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ et de permittivité relative ϵ_r , maintenant une densité de charge surfacique σ , est obtenue par:

$$C_e = \epsilon_r \times \epsilon_0 \times \frac{A}{d} \quad (4)$$

pour une densité de charge σ , la charge totale q .

A titre d'exemple:

$d = 75 \text{ } \mu\text{m}$, $A = 0,5 \text{ m}^2$, $\epsilon_r = 2$ et une charge surfacique de densité, $\sigma = 10^{-3} \text{ C/m}^2$, l'énergie stockée est:

$$W = \frac{1}{2} \times C_e \times V^2$$

$$W = \frac{1}{2} \times \frac{q^2}{C_e}$$

$$W = \left[A \times \frac{d}{2} \times \frac{1}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0} \right] \times \sigma^2 = 1J$$

4.7.6 Décharges par effet de cône

Ce type de décharge a été observé dans le cadre, par exemple, de l'alimentation d'un silo en granulés à forte résistivité. L'alimentation d'un silo en particules chargées, telles que des granulés en plastique, provoque une accumulation de charge au niveau du tas. Le champ généré par cette charge exerce des forces de répulsion sur les particules chargées analogues qui tombent sur le tas. Dans la mesure où les forces gravitationnelles exercées sur les particules agissent contre les forces de répulsion, la densité de charge du matériau en vrac augmente au niveau du tas. Si les particules chargées continuent à tomber sur le tas après que l'intensité du champ dans la zone concernée a atteint la valeur de claquage de l'air, les décharges se dirigent vers les parois conductrices du silo qui est mis à la terre.

4.8 Forces mécaniques dans un champ électrostatique

Le champ électrique produit par une charge électrostatique peut exercer une force mécanique sur les objets qu'il enveloppe. Les films de matériau chargés à quelques micros coulombs par mètre carré peuvent adhérer aux métaux à proximité tandis que les particules de poussières peuvent être attirées par les champs associés aux densités de charge inférieures d'un ordre de grandeur.

Par exemple, la force agissant sur une particule chargée à proximité d'une plaque plane et mise à la terre peut être calculée à partir de la loi de Coulomb:

$$F = \frac{q^2}{16 \times \pi \times \epsilon_r \times \epsilon_0 \times d^2} \quad (5)$$

où

q est la charge de la particule;

d est la distance à la plaque.

5 Problèmes et dangers d'ordre électrostatique

5.1 Généralités

Les décharges électrostatiques varient dans une très grande mesure en termes de nature et leurs effets donnant lieu à des problèmes électrostatiques peuvent être très différents. Les décharges entre structures métalliques sous forme d'étincelles et la décharge par effet de brosse par propagation constituent les décharges les plus énergétiques et potentiellement destructrices. Les décharges provenant d'isolants chargés peuvent également être préjudiciables et provoquer l'inflammation de mélange gazeux inflammable ou endommager des composants électroniques. Le claquage des couches isolantes d'un dispositif à semi-conducteurs peut se produire à des tensions inférieures à 50 V et d'autres types de dommages, tels que la fusion locale du matériau semi-conducteur, ne nécessitent qu'une énergie de quelques micro-joules. En général, une charge maintenue sur un élément liquide ou solide soulève un problème en cas de décharge soudaine vers un autre corps ou à la terre.

Dans les salles blanches médicales utilisées en chirurgie et au cours de la fabrication de produits pharmaceutiques, des exigences particulières peuvent devoir être appliquées pour la

prévention de la contamination. Ceci peut également impliquer le fait que l'électricité statique doit être contrôlée pour éviter toute charge des particules.

5.2 Composants et systèmes électroniques

5.2.1 Généralités

La décharge électrostatique (ESD) représente une grave menace pour les composants et systèmes électroniques. De très nombreux composants électroniques sont sensibles aux ESD. Les types les plus sensibles sont par exemple: les semi-conducteurs, les têtes magnéto-résistantes (MR), les résistances à couche mince. Un potentiel électrostatique d'au minimum 10 V peut entraîner la défaillance de certains composants.

Compte tenu de cette haute sensibilité, il convient de considérer que tous les types de décharges électrostatiques peuvent être préjudiciables aux composants électroniques sensibles.

5.2.2 Types de défaillance

Les dommages liés aux ESD peuvent engendrer une défaillance catastrophique et des défauts latents.

Les dommages catastrophiques peuvent donner lieu à une défaillance ou dégradation d'un composant ou d'un système jusqu'à le rendre inopérant ou non conforme à ses spécifications.

Une défaillance latente ou non détectée d'un composant peut en modifier ses caractéristiques sans pour autant le rendre non conforme à ses spécifications. Cependant, il peut être fragilisé par l'événement ESD. Un composant présentant une dégradation latente peut devenir plus sensible à une ESD suivante ou toute autre contrainte. Il existe par conséquent un plus grand risque qu'un tel composant soit prématurément défaillant.

Des erreurs intermittentes se produisent lorsqu'un composant programmé est exposé à une ESD, ou du fait du bruit électrique généré par l'événement ESD qui modifie les données stockées. Un signal erroné peut apparaître dans le système du fait d'une perturbation électromagnétique conduite ou rayonnée résultant d'une décharge électrostatique.

Le niveau de dommage d'un composant est lié à la tension ou à la puissance selon le type de mécanisme de dommage. Différents types de familles de composants et semi-conducteurs sont sensibles à différents types de mécanismes de dommage.

L'un des mécanismes de dommage le plus courant est lié au claquage ou à la perforation de la barrière isolante de l'oxyde, du diélectrique ou de la jonction de semi-conducteur (fusion ou court-circuit). Un autre mécanisme de dommage courant est lié à la fusion ou sublimation de la métallisation du fait des courants élevés provoqués par l'ESD.

Les composants particulièrement sensibles au claquage diélectrique sont par exemple: MOSFET (transistor à effet de champ à grille métal-oxyde), circuit intégré MOS, circuits intégrés à transitions par métallisation, condensateurs (notamment MOS). Le mode de défaillance type est un court-circuit électrique ou une augmentation du courant de fuite (caractéristique courant-tension dégradée).

Les composants particulièrement sensibles à l'endommagement de leur métallisation sont par exemple: les transistors HF et les circuits intégrés. Un mode de défaillance type est le circuit ouvert.

Dans la mesure où tous ces mécanismes de dommage dépendent des dimensions géométriques de la couche diélectrique, autre couche d'isolation, de la largeur et de l'épaisseur de métallisation, etc., il est supposé que plus le temps passe et plus la sensibilité aux ESD des semi-conducteurs augmente. Cependant, pour certains types de composants, il

existe des circuits de protection contre les ESD placés au niveau des broches d'entrée des dispositifs permettant de réduire la sensibilité des dispositifs aux ESD.

5.2.3 Problèmes et risques à différentes périodes du cycle de vie

Tous les systèmes électroniques en service sont vulnérables aux décharges électrostatiques. Un choc direct dû à une forte décharge porté à une partie d'un système peut créer des courants et des énergies suffisamment élevés pour endommager les composants si les courants de décharge ne sont pas directement mis à la terre.

Même une décharge à proximité d'un système peut l'endommager. La décharge crée un champ électromagnétique susceptible d'induire des courants dans le système. Ces courants peuvent engendrer des dommages ou être à l'origine d'"erreurs intermittentes", c'est-à-dire que les informations sont altérées par des impulsions non valides. La programmation de certains composants peut également être modifiée de manière irréversible.

Une décharge peut affecter un câble ou un appareil distant éloigné du système et la perturbation (décharge électrique élevée) peut être conduite dans le système.

La manipulation des composants et ensembles électroniques sensibles est une opération très délicate au cours de la fabrication des dispositifs électroniques. Ces situations comportent de nombreux risques pour les dispositifs électroniques: opérateurs chargés, vêtements, partie d'équipement non à la terre, conteneurs en plastique, composants en plastique, etc. La décharge causant les plus grands risques de dommage est la décharge par étincelles. Ce type de décharge peut être provoqué par un opérateur chargé touchant une carte de circuits imprimés.

Une charge sur un composant proprement dit peut également engendrer un dommage. Un semi-conducteur encapsulé en plastique peut facilement être chargé par le simple frottement de sa surface au moyen par exemple d'un doigt ou d'un sac en plastique. Cette charge sur la surface du boîtier en plastique induit une tension sur les conducteurs du semi-conducteur et sur ses bornes. Le fait de toucher une borne avec un outil métallique ou un doigt déclenche une décharge rapide. Dans la mesure où la capacité de la borne est faible alors que celle de l'outil ou du doigt (opérateur) est beaucoup plus importante, la décharge est très rapide et génère un courant élevé. Même si la décharge comporte une très faible énergie, le courant élevé peut endommager les très petits éléments de circuit qu'il peut traverser.

La fabrication des composants pose d'autres problèmes liés à la charge électrostatique. Les semi-conducteurs doivent être parfaitement propres pendant la fabrication et la surface doit être protégée. Si le semi-conducteur est chargé, il attire les particules de l'air. Le même type de problème se pose pour d'autres parties des dispositifs électroniques, par exemple la contamination des disques et lecteurs de disque et des composants optoélectroniques.

Le niveau de dommage d'un composant du fait d'une décharge électrostatique dépend de la conception du composant et des caractéristiques de la décharge. De nombreux types de décharges peuvent se produire, mais trois types, modèle du corps humain (HBM), modèle de la machine (MM) et modèle du composant chargé (CDM), ont été définis comme représentatifs de la plupart des types, même s'ils ne couvrent pas toutes les variables possibles ayant une incidence sur une décharge. Les modèles sont utilisés pour définir une tension de tenue (la tension maximale) appliquée au modèle correspondant à laquelle un composant peut résister sans subir de dommage.

5.3 Inflammation électrostatique – Dangers

5.3.1 Généralités

Les décharges électrostatiques peuvent enflammer les gaz, poussières, vapeurs ou brouillards inflammables. L'inflammation est provoquée par la forte chaleur dégagée par un canal de décharge.

5.3.2 Décharges par étincelles provenant des objets conducteurs

Il est possible de réaliser un calcul approximatif de l'énergie de décharge par étincelles, par exemple, pour un fût métallique enterré rempli de produit pulvérulent provenant d'une unité de meulage. Dans ce cas, le courant de charge, I , peut être de 10^{-7} A. La résistance d'isolement par rapport à la terre du fût, R , pourrait être de 10^{11} Ω et sa capacité d'environ 50 pF. La tension maximale sur le fût, atteinte en environ 15 s, est alors:

$$V_{\max} = I \times R = 10 \text{ kV}$$

L'énergie maximale, W , libérée dans une décharge par étincelles serait:

$$W = \frac{1}{2} \times C \times V_{\max}^2 = 2,5 \text{ mJ}$$

Le temps de montée, l'amplitude et la durée du courant qui passe pendant l'étincelle sont tous des facteurs importants pour déterminer le niveau de danger. Une impulsion de courant très rapide et de grande amplitude véhicule l'énergie de manière adiabatique et peut très facilement enflammer un mélange gaz-air. Réciproquement, une décharge d'une plus longue durée s'est révélée capable dans certains cas d'augmenter la probabilité d'inflammation d'un nuage de poussières inflammables. Il est possible de réduire le danger potentiel relatif à la plupart des mélanges inflammables en incluant une impédance élevée dans le trajet du courant de décharge afin de pouvoir réduire le plus efficacement possible le courant de décharge et augmenter la durée de la décharge.

5.3.3 Décharges par effet couronne provenant des objets conducteurs

La densité énergétique dans la décharge est bien inférieure à celle atteinte dans une décharge par étincelles, c'est la raison pour laquelle les décharges par effet couronne généralement amène peu de risques. Dans certaines circonstances cependant, par exemple en cas d'augmentation du potentiel du conducteur considéré, l'effet couronne peut se développer dans une étincelle entre le conducteur et un autre objet.

5.3.4 Décharges par effet de brosse provenant de surfaces isolantes

Si l'énergie est suffisamment concentrée, les décharges par effet de brosse peuvent enflammer la plupart des gaz et vapeurs inflammables. Ceci dépend de la polarité de la décharge et de la configuration des électrodes.

Il n'existe à l'heure actuelle aucune preuve démontrant que dans la plupart des cas pratiques les décharges par effet de brosse peuvent enflammer même les poussières les plus sensibles.

5.3.5 Décharges par effet de brosse par propagation provenant de surfaces isolantes

La haute densité de charge surfacique nécessaire à l'amorçage des décharges par effet de brosse par propagation peut généralement être générée aux emplacements où des particules pulvérulentes viennent heurter les parois ou revêtements à haute résistivité, comme par exemple dans le cadre du transport pneumatique de produit pulvérulent par des canalisations en matériaux à faible dissipation de charge (haute résistivité) ou par des canalisations métalliques à revêtement intérieur constitué de ce type de matériau. Les décharges par effet de brosse par propagation ont également été observées et éprouvées lorsque des éléments liquides conducteurs sont transportés par pulsation par des tuyaux isolants dont la surface n'est pas mouillable. Un autre cas peut s'appliquer lorsqu'un frottement significatif se produit entre un produit emballé et la surface intérieure de l'emballage. De hautes densités de charge surfacique peuvent également donner lieu au dépôt d'ions sur les parois ou revêtements à haute résistivité (faible dissipation). De grandes quantités d'ions peuvent être générées au sein de l'installation, par exemple lors du regroupement en vrac d'éléments pulvérulents

chargés à haute résistivité. Ce type de décharge ne s'applique pas aux couches de produit pulvérulent.

Dans la mesure où la plus grande part de la charge est libérée en une seule décharge, l'énergie stockée peut être comparée à l'énergie d'inflammation minimale d'un produit pulvérulent donné afin de déterminer la probabilité du danger d'inflammation lié aux décharges par effet de brosse par propagation. Les décharges libérant une telle énergie et passant directement dans les systèmes ou dispositifs électroniques peuvent avoir un effet catastrophique. Il convient de noter que la décharge d'énergie de cette ampleur à la terre via un individu produirait une réaction physiologique importante et serait dangereuse.

5.3.6 Décharges provenant des individus

Les charges exercées sur le corps humain engendrent couramment un danger. Une personne isolée de la terre peut facilement faire l'objet d'une charge électrostatique et la conserver. L'isolation par rapport à la terre peut être due au fait que le revêtement de sol ou les semelles des chaussures sont en matériau isolant. De nombreux mécanismes peuvent engendrer la charge d'une personne, dont on peut citer les quelques exemples suivants: se déplacer sur un plancher, se lever d'un siège, retirer des vêtements, manipuler du plastique, verser ou recueillir un matériau chargé dans ou d'un conteneur ou se tenir debout à proximité d'objets chargés, par exemple un tapis roulant ou un emballage hautement isolant.

Si une personne chargée d'électricité statique touche un objet conducteur (par exemple, poignée de porte, rampe, etc.), une étincelle se produit au point de contact. Ces étincelles peuvent n'être ni visibles ni audibles, voire n'être même pas ressenties par la personne.

Un potentiel de 3 kV sur une capacité type du corps de 200 pF donne une énergie stockée de 0,9 mJ. Les étincelles de cette énergie produites par les individus sont capables d'enflammer les gaz (hydrogène/air, 0,02 mJ), les vapeurs (hydrocarbure/air, 0,2 mJ) et même certaines des poussières les plus sensibles (< 1 mJ). Dans tous les cas, il est établi que ces décharges peuvent endommager des dispositifs électroniques non protégés.

5.3.7 Potentiel d'inflammation des décharges électrostatiques

5.3.7.1 Généralités

Lorsque des décharges électrostatiques sont prévues dans des emplacements dangereux, il doit être tenu compte du fait que le potentiel d'inflammation peut être capable d'enflammer le milieu ambiant.

5.3.7.2 Décharges par étincelles

Le danger d'inflammation engendré par une décharge par étincelles peut être évalué en comparant l'énergie libérée dans une étincelle et l'énergie d'inflammation minimale (MIE) du milieu ambiant (voir 5.3.2).

5.3.7.3 Décharges par effet couronne

La densité énergétique dans cette décharge généralement entraîne peu de dégât (voir 5.3.3).

5.3.7.4 Décharges par effet de brosse

Il n'existe à l'heure actuelle aucune preuve démontrant que les décharges par effet de brosse peuvent enflammer même les poussières les plus sensibles (sauf les explosifs primaires). Il existe cependant une possibilité théorique dans la mesure où les décharges par effet de brosse peuvent avoir des énergies équivalentes jusqu'à 4mJ (voir 5.3.4).

Cependant, les gaz et vapeurs inflammables peuvent être enflammés par les décharges par effet de brosse.

La probabilité de décharges par effet de brosse provoquant l'inflammation d'un gaz ou d'une vapeur peut être estimée en tenant compte de la quantité de la charge transférée dans une seule décharge par effet de brosse.

Le transfert de charge minimal pour les décharges par effet de brosse provoquant l'inflammation des gaz et des vapeurs appartenant à différents groupes d'explosion est estimé comme suit:

- 60 nC pour les groupes d'explosion I ou IIA;
- 30 nC pour le groupe d'explosion IIB;
- 10 nC pour le groupe d'explosion IIC.

Pour de plus amples informations sur les groupes d'explosion, se reporter à la CEI 60079-10-1 et à la CEI 60079-10-2.

Les décharges par effet de brosse se produisant dans le domaine des nanosecondes doivent être enregistrées avec un dispositif de mesure approprié. La Figure 4 donne deux exemples. Des exemples des types de dispositifs sont les oscilloscopes à mémoire rapide (largeur de bande ≥ 300 MHz, fréquence d'échantillonnage ≥ 1 GS/s) équipés d'une résistance de shuntage à haute fréquence.

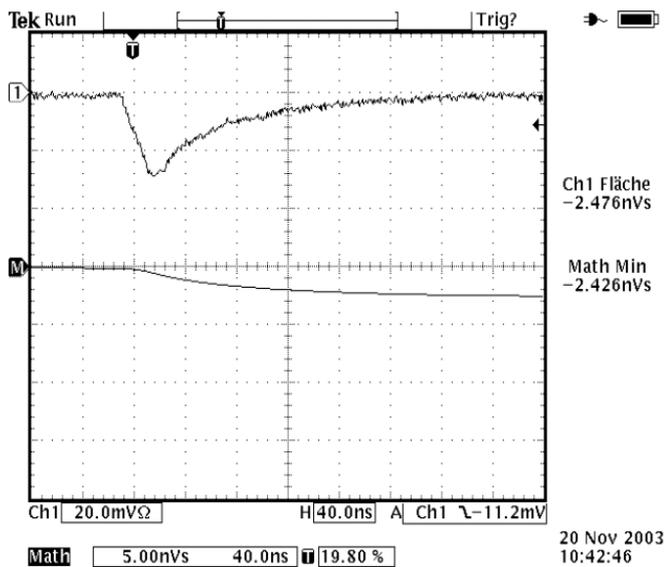


Figure 4a – Faible décharge < 20 nC

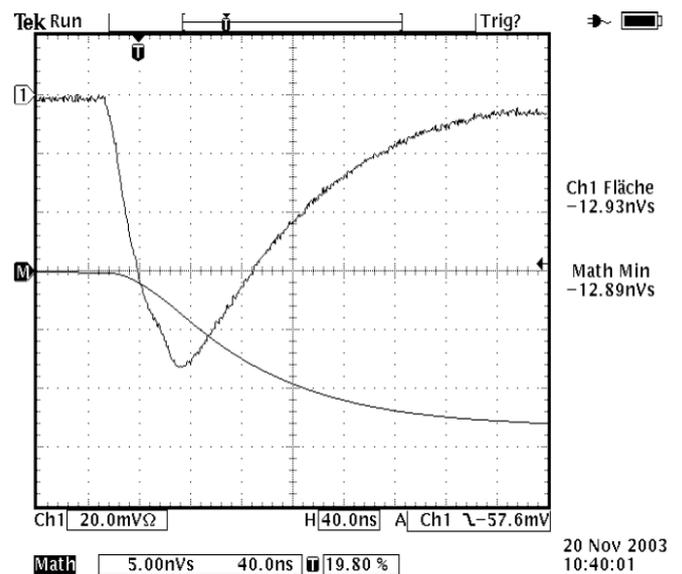


Figure 4b – Forte décharge > 60 nC

Figure 4 – Exemples de formes d'onde de décharge par effet de brosse mesurées avec un oscilloscope numérique à mémoire rapide

La relation entre le transfert de charge dans une décharge par effet de brosse et la probabilité d'inflammation ne tient pas compte de la distribution spatiale ou temporelle de l'énergie dans la décharge. Il convient de ne considérer ces valeurs que comme une approximation et de ne pas les utiliser comme une détermination absolue de la sécurité pour tous les matériaux dans toutes les applications.

5.3.7.5 Décharges par effet de brosse par propagation

Il est établi que les décharges par effet de brosse par propagation sont capables d'enflammer les gaz et les vapeurs inflammables ainsi que la plupart des poussières (voir 5.3.5).

5.3.7.6 Décharges par effet de cône

Un fait établi démontre que la décharge par effet de cône peut enflammer les gaz et les vapeurs inflammables. Il n'est également pas exclu qu'elle puisse enflammer certaines poussières.

5.4 Sensation physiologique

Un phénomène bien connu, notamment les jours à faible taux d'humidité de l'air, est le choc électrique ressenti au contact d'un objet conducteur après avoir été chargé par exemple en marchant sur un tapis ou en se levant d'un siège d'automobile.

Les niveaux de perception de la charge électrostatique par les individus ainsi que les réponses ou réactions physiques sont indiqués dans le Tableau 3.

Une personne isolée peut notamment être chargée à des niveaux élevés lorsqu'elle manipule des objets hautement chargeables. Exemples de situations de cette nature:

- faire un lit: les draps sont chargés et la personne reçoit un potentiel induit qui est neutralisé dans une décharge par étincelles par contact avec un objet mis à la terre;
- emballer ou déballer lorsqu'on utilise des matériaux d'emballage hautement chargeables.

Tableau 3 – Niveaux de perception types et réponses physiques des individus aux décharges basées sur une capacité du corps de 200 pF

Énergie de décharge mJ	Réaction	Potentiel du corps V
0,1	Perceptible	1000
0,9	Sensation déterminée	3000
6,4	Choc désagréable	8000

Une personne peut avoir la même sensation au contact avec un objet chargé.

Exemples de ces situations:

- retirer un chandail: le chandail est chargé à un niveau élevé et se décharge (par décharges par effet de brosse) sur la personne;
- un chariot à roulettes isolées en plastique charge à des niveaux élevés lorsqu'il est conduit et peut provoquer un choc très désagréable.

5.5 Simulation de décharges électrostatiques

5.5.1 Généralités

La simulation des décharges électrostatiques est généralement réalisée avec un circuit simple dans lequel la charge électrostatique est initialement stockée comme une tension sur un condensateur. Lorsqu'une décharge simulée est nécessaire, l'énergie électrostatique stockée est déchargée par un circuit à une charge, qui peut être une décharge par étincelles ou un dispositif électronique en essai. La décharge est généralement définie en termes de forme d'onde du courant de sortie, I , bien que souvent l'énergie électrostatique stockée constitue également un paramètre important.

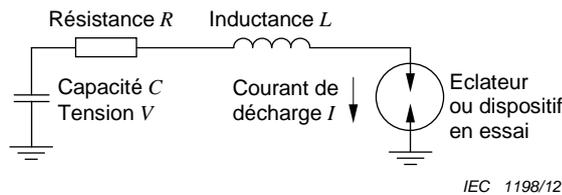


Figure 5 – Circuit de simulation des décharges électrostatiques

Ce modèle de circuit simple peut générer une grande variété de formes d'onde à utiliser pour différents besoins en fonction des valeurs de la capacité, C , de la résistance, R et de l'inductance, L . Tous les circuits disposent de tous ces composants bien que dans la pratique certains d'entre eux puissent être présents en tant que composants «parasites» accidentels mais néanmoins inévitables. Dans bon nombre de circuits, les petits composants parasites peuvent avoir un effet significatif sur la simulation de la forme d'onde de sortie finale.

Le courant de sortie est donné par:

$$I = \frac{V_0}{2 \times L \times \omega} \times \left[e^{-(\sigma+\omega) \times t} - e^{-(\sigma-\omega) \times t} \right] \tag{6}$$

où

$$\sigma = \frac{R}{2 \times L} \tag{7}$$

et

$$\omega = \left[\frac{R^2}{4 \times L^2} - \frac{1}{L \times C} \right]^{0,5} \quad (8)$$

Si ω est un nombre réel, le circuit donne une forme d'onde unidirectionnelle, ayant généralement un front montant rapide et une décroissance exponentielle plus longue.

Si $\omega = 0$, le circuit est à amortissement critique et une courte forme d'onde unidirectionnelle se produit. Si ω est un nombre complexe, la forme d'onde de sortie est une sinusoïde «à sur-oscillation» amortie.

5.5.2 Décharges capacitives pour mesures de l'énergie d'inflammation

Les circuits de décharge capacitive sont utilisés pour mesurer l'énergie d'inflammation des atmosphères inflammables. Dans un circuit type, la capacité est contrôlée afin de déterminer l'énergie stockée. La résistance du circuit R et l'inductance L sont généralement maintenues à de faibles valeurs «parasites».

Dans de nombreux cas, le paramètre d'intérêt est davantage l'énergie stockée que la forme d'onde de sortie. En général, la forme d'onde de sortie est une sinusoïde amortie.

Dans certains cas, il est admis d'inclure une inductance L ou une résistance R dans le circuit. Ceci s'applique à certains appareils de mesure de la sensibilité à l'inflammation des nuages de poussières pour lesquels une inductance de 1 mH est souvent spécifiée. Les valeurs types sont données dans le Tableau 4.

5.5.3 Modèle du corps humain

Le principal modèle de décharge électrostatique qui simule une décharge d'une personne chargée vers un dispositif ou système en essai est appelé modèle du corps humain (HBM). Il s'agit du modèle le plus couramment utilisé pour soumettre à essai la sensibilité aux ESD des composants et systèmes électroniques au cours de la fabrication et du fonctionnement. Ce modèle s'applique également à l'évaluation d'autres situations impliquant des décharges électrostatiques du corps humain, par exemple l'évaluation de la sensibilité à l'inflammation des poussières pyrotechniques.

Dans ce cas, la capacité C est représentative du domaine type du corps humain. Une résistance R est introduite dans le circuit, mais l'inductance L est limitée à la valeur "parasite". La forme d'onde de sortie est de type unidirectionnel avec un temps de montée rapide et un temps de décroissance lent et long. Les valeurs types sont données dans le Tableau 3.

5.5.4 Modèle de la machine

Une classe de modèle utilisé pour déterminer la sensibilité aux ESD des composants électroniques consiste à simuler une décharge d'un objet métallique de grande taille, tel qu'un élément d'équipement. Ce modèle est appelé modèle de la machine (MM).

Dans ce cas, la capacité C , l'inductance L et la forme d'onde de sortie sont généralement définies. La forme d'onde est généralement une sinusoïde à sur-oscillation à fréquence, temps de montée et amplitude définis. Les valeurs types sont données dans le Tableau 3.

5.5.5 Modèle du composant chargé

Le modèle du composant chargé (CDM) simule la situation dans laquelle un dispositif ou objet chargé de petite taille s'approche d'une surface mise à la terre et provoque de ce fait un

événement ESD. Il s'applique aux mesures de la sensibilité aux ESD des dispositifs électroniques. En règle générale, la capacité du dispositif est faible et l'inductance L et la résistance R du circuit sont définies par des valeurs "parasites". Le modèle est généralement défini par sa forme d'onde, qui se caractérise par une décharge unidirectionnelle très courte et rapide. Les valeurs types sont données dans le Tableau 4.

Tableau 4 – Valeurs types utilisées dans les modèles de simulation ESD

Modèle	Application	R Ω	C μF	L nH
Mesures de l'énergie d'inflammation	Inflammation d'un nuage de poussières	Parasite	5 – 1 000	Parasite ou 1 mH
	Inflammation de vapeurs	Parasite	5 – 1 000	Parasite
Modèle du corps humain (HBM)	Essai du dispositif électronique	1 000 – 3 000	100 – 300	Parasite
Modèle de la machine (MM)	Essai du dispositif électronique	8,5 (type)	200	0,5 (type)
Modèle du composant chargé (CDM)	Essai du dispositif électronique	< 10 (type)	3 – 30 (type)	< 10 (type)

6 Solutions générales aux problèmes et dangers

6.1 Généralités

Bien que le présent rapport technique n'ait pas pour objet de traiter des problèmes électrostatiques particuliers, il est utile d'examiner de manière succincte les solutions apportées aux problèmes en introduction à la description des méthodes de mesure des propriétés correspondantes des matériaux. Les problèmes électrostatiques sont généralement spécifiques aux produits, procédés ou matériaux courants et aux situations réelles. Afin de déterminer des solutions efficaces, il est nécessaire de mesurer au préalable les paramètres relatifs aux phénomènes électrostatiques.

La manipulation des composants sensibles aux phénomènes électrostatiques est décrite dans la CEI 61340-5-1 et la CEI 61340-5-2, la méthode de protection contre les dangers dus à l'électricité électrostatique est décrite dans la référence [4]. Les méthodes courantes sont résumées en 6.2.

6.2 Méthodes courantes

Dans bon nombre de cas, il est nécessaire de définir une zone dans laquelle des précautions particulières sont nécessaires. Il peut s'agir d'une zone ESD protégée pour le domaine de l'industrie électronique ou une zone d'atmosphère inflammable pour l'industrie de transformation. Il est nécessaire que tout le personnel travaillant dans ces zones comprenne la nécessité du contrôle des phénomènes électrostatiques, connaisse les limites de la zone et soit sensibilisé aux précautions qu'il convient de prendre en compte dans la zone considérée.

Le premier principe consiste à éviter d'utiliser des matériaux isolants et à s'assurer que tous les matériaux ou éléments conducteurs en métal sont mis à la terre. Si le phénomène de charge est inévitable, comme cela est souvent le cas, le niveau de charge peut parfois être limité en réduisant au minimum le nombre d'événements de contact et de séparation. Il convient à cet effet d'éviter tout frottement des éléments solides et de réduire la vitesse linéaire des éléments liquides. L'ionisation par effet couronne constitue un moyen très utile de réduire la charge surfacique indésirable sur les objets isolants. Les dispositifs basés sur ce principe et comprenant une série d'électrodes pointues mises à la terre sont utilisés pour réduire la charge dans le secteur de l'électronique.

Dans la mesure où la quantité de la charge est fortement dépendante de l'humidité de l'air (humidité de surface), une solution générale permettant de réduire les niveaux de charge consiste à maintenir l'humidité de l'air à un niveau aussi élevé que possible pour ce qui

concerne les autres risques. Par exemple, dans les installations de fabrication de dispositifs électroniques, l'humidité est souvent régulée à un taux de 40 % HR à 60 % HR. Dans la plupart des cas, l'utilisation d'un taux d'humidité relative élevé ne représente pas une mesure de sécurité principale pour contrôler l'électricité statique mais seulement une mesure secondaire.

Le taux de perte de charge d'un matériau isolant par rapport à la terre peut être amélioré en ajoutant un agent antistatique.

Une pratique courante applicable aux matériaux isolants solides consiste à former une matrice conductrice au sein du matériau en ajoutant des particules, des paillettes ou des fibres de carbone ou métalliques. Il convient cependant de s'assurer que ces systèmes ne sont efficaces que lorsque la continuité électrique est maintenue dans toute la matrice et que par conséquent, ils sont souvent sensibles aux déformations mécaniques et aux variations de température. Dans ce contexte, ils peuvent également poser un problème en matière de mesure. En général, la charge ne peut pas migrer de la matrice isolante à la matrice conductrice, et de ce fait les caractéristiques dissipatives ou conductrices de la charge indiquées sont très différentes entre la charge appliquée à, ou le contact avec, le premier et le dernier élément. Il convient donc de porter une attention toute particulière à la procédure utilisée pour mettre en œuvre les essais.

Les cas les plus courants impliquant des problèmes électrostatiques se produisent lorsque le matériau est un isolant électrique ou un élément qui n'est pas correctement mis en contact électrique avec la terre. Un exemple typique de cette situation est représenté par le transport pneumatique de poussières car même des particules métalliques maintiennent la charge lorsqu'elles sont en suspension dans l'air. Dans ce cas, l'ionisation de l'atmosphère ambiante peut fournir des charges qui permettent de réduire, à défaut de neutraliser complètement, la charge posant problème sur le matériau.

L'accumulation de particules métalliques sur des dispositifs d'ionisation actifs peut engendrer des étincelles dangereuses. Il est par conséquent recommandé d'utiliser des dispositifs d'ionisation passifs ou radioactifs en présence de poussières métalliques. Pour des raisons de sécurité et d'efficacité opérationnelle, il est important que les dispositifs d'ionisation passifs et actifs soient nettoyés et vérifiés quant à des éventuels défauts conformément aux instructions du fabricant.

L'un des problèmes les plus courants est posé par un conducteur non mis à la terre, souvent un petit objet en métal ou partie d'un ensemble, qui peut accumuler la charge et déclencher une décharge à risque ou susceptible d'engendrer un dommage. La solution privilégiée consiste à mettre à la terre l'objet et éviter toute accumulation de charge.

Il convient de ne jamais mettre à la terre un objet métallique ou conducteur chargé non mis à la terre en présence d'une atmosphère inflammable, au risque de provoquer une décharge susceptible d'enflammer l'atmosphère.

Il convient principalement d'éviter toute accumulation de charge électrostatique par les personnes travaillant dans des zones présentant un danger électrostatique potentiel où des atmosphères inflammables peuvent être présentes, et dans tous les cas aux personnes qui manipulent des systèmes électroniques sensibles. A cet effet, le personnel peut être mis à la terre au moyen d'un bracelet conducteur ou en utilisant un revêtement de sol conducteur et en s'assurant que le personnel porte des chaussures conductrices à faible résistance, selon la solution la plus pratique pour l'environnement industriel considéré.

Le sol doit être propre dans toute la mesure du possible en assurant régulièrement un contrôle fonctionnel, au risque que la mise à la terre du système chaussures-revêtement de sol ne soit pas satisfaisante.

Pour ce qui concerne la protection des dispositifs électroniques sensibles, notamment pendant le transport, il est recommandé d'utiliser un emballage de protection contre les ESD

afin de protéger les dispositifs électroniques contre le champ électrostatique et une décharge électrostatique directe provenant de l'extérieur de l'emballage. Il convient également que le matériau de l'emballage en contact avec le dispositif ne soit pas isolant et ne provoque pas une charge électrostatique significative de l'emballage ou du dispositif.

7 Applications utiles relatives aux effets électrostatiques

Les indispensables photocopieurs et imprimantes à jet d'encre sont deux machines qui occupent une part considérable dans la technologie de l'information. Le procédé électrographique est totalement basé sur les effets électrostatiques et l'imprimante à jet d'encre utilise la projection précise de gouttelettes d'encre de taille et de charge définies avec précision. Dans le premier procédé, l'image optique est transformée en une image électronique sur un photoconducteur chargé par effet couronne pour être ensuite traitée par l'adhérence des particules de révélateur contre-chargées. L'étape finale est le transfert de l'image traitée sur le papier, cette fois ci au moyen d'un champ électrostatique.

La charge par effet couronne des particules de poussière, les propriétés électriques des couches de poussière d'effluent retenues et la génération de champs électriques élevés et stables contribuent dans leur ensemble à l'efficacité des dispositifs de précipitation électrostatique.

La peinture par procédé électrostatique, la pulvérisation des cultures, le flocage, l'enrichissement des minerais et la séparation des matières plastiques représentent tous des procédés industriels viables ou florissants. Il est sans aucun doute établi que la mise en œuvre de tout moyen permettant de contrôler et d'utiliser les effets électrostatiques dépend essentiellement des données quantitatives relatives aux paramètres électrostatiques et des propriétés applicables des matériaux. D'autres applications électrostatiques comprennent l'assistance d'impression électrostatique, l'humidification électrostatique et la lubrification électrostatique.

8 Aspects généraux relatifs aux mesures

8.1 Généralités

Les mesures permettent d'avoir une meilleure compréhension des phénomènes électrostatiques, d'analyser les problèmes et de déduire les solutions à y apporter ainsi que de concevoir et développer des systèmes et des dispositifs basés sur des procédés électrostatiques.

Le présent article décrit les méthodes générales de mesure permettant de produire des données univoques d'une exactitude suffisante. Il s'agit principalement de bien interpréter les données ce qui ne peut être réalisé que sur la base d'une bonne compréhension des phénomènes fondamentaux et une sensibilisation appropriée à l'influence que peut exercer sur eux l'environnement local.

Certaines mesures électrostatiques sont directement liées à des paramètres physiques de base, par exemple: champ électrique, charge, densité de charge surfacique et volumique, résistivité, capacité, courant, énergie. D'autres mesures sont d'ordre plus pratique et nécessitent de ce fait d'appliquer des méthodes d'essai qui impliquent la simulation de situations pratiques en utilisant des dispositions géométriques et des dimensions convenues. Des exemples comprennent la capacité de charge, la décroissance de la charge, la résistance de liaison à la terre et la capacité de blindage.

Les mesures de la charge et du champ électrostatique ne nécessitent souvent pas d'être particulièrement précises. Dans de nombreux cas, une valeur comprise dans un ordre de grandeur décimal est suffisante. Cependant, le point important réside dans la fiabilité – la confiance dans le fait que les observations faites sont réelles et correctes dans une mesure de précision appropriée. Dans certains cas, il peut être nécessaire de disposer d'une haute résolution et de stabilité, par exemple pour estimer le taux de décroissance de la charge sur

un matériau isolant à partir d'observations de courte durée lorsque la charge surfacique et le potentiel peuvent être élevés alors que le taux de changement est très faible.

D'autres situations nécessitent une sensibilité élevée, par exemple dans le cadre de mesures de faibles potentiels susceptibles de représenter des risques pour des dispositifs à semi-conducteur sensibles, et de mesures de la densité de charge sur chaque face de films minces. Une haute précision peut également être nécessaire, par exemple lorsqu'il est nécessaire de réaliser des mesures de différence entre au moins deux mesures de champ électrique, par exemple pour une mesure en ligne de la densité de charge ou du taux de décroissance de la charge.

En général, les méthodes présentées se basent principalement sur le bien-fondé de la méthode plutôt que sur l'obtention d'une grande précision. Une introduction à chacune des méthodes est fournie afin de clarifier certaines difficultés et assurer la mise en œuvre fiable et l'interprétation univoque des résultats.

8.2 Champ électrique

8.2.1 Généralités

Les mesures du champ électrique sont réalisées au moyen de deux types de mesureurs de champ: capteurs inductifs et moulins à champ.

Les instruments de type capteur inductif utilisent une surface de mesure reliée à un amplificateur à forte impédance d'entrée avec un condensateur relié à la terre. Ces types d'instruments sont simples et relativement peu coûteux mais leur sensibilité et utilité sont limitées. Ils ont une constante de temps d'entrée finie ce qui signifie qu'ils ne peuvent être utilisés que pour des mesures de durée relativement courte (dizaines de secondes) après mise à zéro dans un environnement de champ électrique à zéro. Leurs relevés sont sérieusement perturbés en fonctionnement en présence d'air ionisé.

Un moulin à champ est ainsi désigné car un volet (obturateur) tournant mis à la terre est utilisé pour moduler le champ électrique observé au niveau de la surface de mesure. Le signal alternatif généré dépend uniquement de la superficie de la surface de mesure et de la valeur du condensateur d'entrée tant que le taux de modulation du champ électrique observé est tout aussi rapide que la constante de temps d'entrée. La détection sensible à la phase génère un signal de sortie qui indique la résistance et la polarité du champ électrique observé.

Une autre disposition utilise une hélice vibrante pour moduler le champ électrique au niveau de la surface de mesure. Pour ces types d'instruments, une tension est généralement refoulée vers l'entrée de sorte que l'instrument fonctionne en mode zéro. Ceci est particulièrement utile pour des applications de détecteur par sonde suiveuse de tension.

8.2.2 Application

Une mesure du champ électrique peut fournir des informations sur l'amplitude et la polarité du potentiel de surface, de la densité surfacique ou volumique de la charge ou du potentiel spatial local.

Le capteur inductif répond en continu aux champs observés. Le champ mesuré produit une réponse qui est relative aux champs précédemment observés, il est donc essentiel que ces instruments soient mis en tension ou à zéro dans la zone exempte de champs électriques et que les mesures soient réalisées dans un temps relativement court après remise à zéro. Le moulin à champ n'est pas affecté par le champ électrique présent lorsqu'il est mis en tension et, dans la mesure où l'hélice présente une référence à la terre continue, le zéro reste stable pendant de longues périodes de fonctionnement.

Il est important de correctement mettre à la terre l'instrument et de vérifier la stabilité de lecture à zéro pendant les durées comparables au temps prévu nécessaire pour la mesure. Il convient également de vérifier la présence d'autres surfaces mises à la terre dans le champ d'observation.

Les surfaces situées autour de la zone de mesure doivent être maintenues propres. Ceci est particulièrement important pour les instruments à haute sensibilité et les opérations impliquant des particules isolantes. Les particules isolantes se chargent rapidement et provoquent le décalage du zéro de l'instrument lorsqu'elles se déposent autour de la zone de mesure. Un nettoyage à l'air propre permet d'éviter le dépôt des particules mais il est nécessaire de vérifier de temps en temps la lecture à zéro du mesureur de champ.

Le réglage du zéro du mesureur de champ peut être vérifié en couvrant l'ouverture avec une plaque métallique mise à la terre.

La présence d'un capteur inductif ou moulin à champ déforme le champ électrique. De plus, la réponse de l'instrument correspond à l'intégrale du champ ou du potentiel sur une zone sensible mal définie. Ces effets peuvent être significatifs et il convient d'en tenir compte.

8.3 Potentiel

8.3.1 Généralités

Les potentiels se développent sur des objets, des surfaces chargées ou dans un volume contenant une charge d'espace. Dans le premier cas, ils peuvent être mesurés avec un voltmètre électrostatique. Dans tous les cas, ils peuvent être déterminés par un mesureur de champ mis à la terre ou à partir du potentiel nécessaire pour fournir un signal zéro de champ électrique au niveau du capteur de champ. Il convient que ces mesures ne nécessitent pas de retirer la charge et qu'elles soient réalisées sans modification significative du champ électrique au niveau de la surface soumise à essai, au risque d'altérer la distribution de la charge présente.

8.3.2 Potentiel de surface

Il est préférable de réaliser les mesures avec un détecteur à sonde suiveuse de tension, la sonde étant montée à proximité de la surface de sorte que la réponse ne soit pas affectée par toutes autres charges électrostatiques environnantes. Les principales limites proviennent de la difficulté à couvrir de larges gammes de potentiels et les risques de claquage électrique si la vitesse de réponse ne peut pas suivre des changements brusques de potentiel de surface. Les avantages résident dans la bonne exactitude de mesure de potentiel, l'indépendance de l'écartement entre les sondes et la charge de faible capacité effective de la sonde.

Un mesureur de champ relié à la terre peut être utilisé comme un voltmètre permettant de réaliser facilement des mesures du potentiel de surface - même à des tensions très élevées. La distance de séparation doit être connue et il convient qu'elle soit assez large pour éviter toute augmentation de la capacité qui risquerait de réduire le potentiel à mesurer. Il convient également que la distance soit suffisamment importante pour éviter les décharges entre la surface chargée et le mesureur mis à la terre. Il convient cependant que la distance ne soit pas trop grande au risque que d'autres charges ou surfaces mises à la terre à proximité n'affectent les lectures.

Précautions:

- Le champ électrique entre la surface ou le corps et le mesureur de champ est en général non uniforme et le potentiel de surface est obtenu en multipliant le champ électrique E (V/m) observé par la distance de séparation (m) et en appliquant un facteur de correction qui dépend de la disposition physique. Pour un mesureur de champ situé à proximité d'une grande surface plane conductrice, le champ électrique est uniforme, il n'y a aucune ambiguïté et un facteur de correction peut être obtenu pour un mesureur de champ proprement dit ou par une plaque de protection. Une plaque de protection ne permet de

réaliser qu'un aplatissement modéré de la courbe de correction. Il est en général plus facile d'utiliser un mesureur de champ sans plaque de protection pour les mesures réalisées manuellement.

- Si la surface n'est pas un plan de grande dimension, il est nécessaire d'établir la relation entre le champ électrique, la distance de séparation et le potentiel. Ceci peut être réalisé de manière empirique ou par modélisation informatique.
- Lorsque les risques d'électricité statique sont étudiés dans des zones de travail complexes, il est recommandé de déplacer le mesureur de champ à la périphérie pour s'assurer de bien identifier toutes les sources de charge significatives. Les potentiels de surface individuels peuvent ensuite être mesurés, éventuellement avec protection contre les autres sources à proximité. Cette méthode permet d'éviter d'attribuer des valeurs de potentiel aux surfaces pour lesquelles la lecture augmente réellement du fait d'une source de charge proche plus importante.
- Pour les mesures impliquant des surfaces isolantes, on doit admettre que ces surfaces peuvent être transparentes aux champs électriques. Il est possible de déterminer l'emplacement réel des sources de charge en modifiant la position du mesureur de champ d'observation.

8.3.3 Potentiel spatial

Le potentiel spatial local peut être mesuré par le champ électrique avec un mesureur de champ mis à la terre. Le mesureur de champ mis à la terre perturbe la distribution du potentiel dans une mesure qui dépend du diamètre effectif du mesureur de champ. Le champ électrique, E ($V\ m^{-1}$) est relié au potentiel spatial local V (volts) pour un diamètre de mesureur de champ d (m) comme suit:

$$E = f \times \frac{V}{d} \quad (9)$$

où f est une constante approximativement égale à 1. La relation reste vraie tant que le mesureur de champ s'écarte d'une distance de plusieurs diamètres des surfaces et structures avoisinantes mises à la terre. Ceci peut être vérifié par essai en utilisant un mesureur de champ alimenté par batterie et en le portant au potentiel auquel la lecture du champ électrique est égale à zéro, c'est-à-dire en l'utilisant comme un détecteur à sonde suiveuse de tension.

Il convient de noter que l'introduction d'un mesureur de champ mis à la terre dans un environnement fortement chargé ne permet pas d'initier des décharges par étincelles ou effet couronne au niveau de la surface du mesureur.

8.4 Charge

La charge électrostatique nette sur un produit ou une quantité de matériau peut être mesurée en l'injectant dans une enceinte conductrice isolée, désignée pot-collecteur de Faraday, puis en mesurant la charge induite à l'extérieur du pot au moyen d'un amplificateur d'électromètre. Il est également possible de mesurer l'augmentation de tension du pot par rapport à sa capacité en utilisant un mesureur de champ électrostatique ou un détecteur à sonde suiveuse de tension, voire d'intégrer le courant à la terre.

Une attention toute particulière doit être portée aux circuits d'électromètre sensibles afin d'assurer une résistance d'entrée élevée, d'éliminer le bruit de tout câble de connexion et de réduire les courants de polarisation d'entrée. Pour ce qui concerne les mesures fondées sur une augmentation de la tension du pot, la capacité du pot doit être beaucoup plus importante que celle de l'élément chargé. Cette méthode est simple et appropriée pour des mesures jusqu'à 1 pC. Dans le cadre des études industrielles impliquant la collecte d'importantes

quantités de charge, la sécurité peut se révéler critique et l'intégration du courant peut représenter un moyen simple de maintenir de manière fiable le pot proche de la terre.

Les précautions d'ordre pratique à prendre pour réaliser des mesures fiables sont les suivantes:

- un pot suffisamment profond pour s'assurer que l'intégralité de la charge est introduite dans le pot sans rien à l'extérieur;
- une bonne protection du pot contre l'influence de toutes charges dans l'environnement local;
- éviter l'influence de toutes charges locales dans le cadre de l'opération de charge à l'étude. Ceci nécessite par exemple de relier l'appareil à la terre lorsque l'opérateur installe des éléments dans le pot, s'assurer que l'opérateur est relié à la terre et que ses vêtements ne peuvent en aucun cas contribuer au développement de champs électriques lors de l'opération de charge;
- éviter toute fuite et tous effets de charge piégée sur le montage d'isolation du pot et dans les connexions et le câblage aux circuits de mesure de charge externe;
- s'assurer que les lectures à zéro et de charge sont stables pendant des durées plus longues que celles nécessaires à la réalisation des mesures.

Il convient également d'assurer la sécurité en veillant à ce que le pot chargé soit mis à la terre en toute sécurité sans provoquer d'étincelles critiques.

8.5 Densité de charge

8.5.1 Densité de charge surfacique

Une feuille chargée en matériau isolant bien éloignée de toute autre surface mise à la terre produit le même champ électrique par rapport à chaque surface qui correspond à la somme algébrique des densités de charge sur les deux surfaces. Les densités de charge sur chaque face de la feuille peuvent être mesurées en appliquant la feuille contre une surface mise à la terre. La charge exercée sur la surface en contact avec la surface mise à la terre ne produit aucun champ extérieur, ce qui permet de déterminer la charge exercée sur la surface extérieure qui est la moins étroitement couplée et qui produit un champ électrique au niveau d'un mesureur de champ placé à proximité. Il convient de connaître l'épaisseur et la permittivité relative du matériau ainsi que la distance exacte entre le capteur et la surface.

Les mesures réalisées à 5 % près nécessitent de placer l'ouverture de mesure du mesureur de champ à une distance au moins égale à 1,5 fois le diamètre d'ouverture de mesure de la surface de la feuille. Il convient que la plaque de protection plane environnante soit située à au moins une distance égale à 9 fois l'écartement de séparation. Pour les mesures à 1 % près, la surface environnante doit correspondre à au moins 15 fois le diamètre d'ouverture de mesure.

L'observation de petites images électroniques d'échelle nécessite d'utiliser des ouvertures de mesure et des distances de séparation similaires à la taille du modèle.

Les mesures réalisées sur des toiles mobiles nécessitent que la vitesse de réponse du mesureur de champ soit suffisamment élevée par rapport à la vitesse de la toile, avec une résolution spatiale appropriée afin de pouvoir détecter toute variation de l'image électronique sur la surface.

8.5.2 Densité de charge volumique

Pour une enceinte sphérique et une distribution uniforme de la charge, le champ électrique limite et le potentiel spatial maximal correspondent à la densité de charge moyenne respectivement de manière linéaire et quadratique. Par conséquent, pour une distribution uniforme de la charge, la densité de charge électrostatique dans un volume peut être obtenue

du champ électrique aux limites ou du potentiel spatial maximal au sein d'une enceinte d'échantillonnage simple de l'atmosphère locale.

Pour les enceintes de forme complexe, il est possible d'utiliser une modélisation informatique pour obtenir les valeurs des champs électriques aux limites et de la distribution du potentiel dans le volume.

L'enceinte peut être l'ensemble du récipient contenant la charge ou un petit récipient d'échantillonnage de l'atmosphère locale. L'enceinte d'échantillonnage doit être tout particulièrement conçue pour bien équilibrer le transfert de l'atmosphère par rapport au blindage effectif du champ électrique, créé au niveau de la surface extérieure de l'enceinte par la charge dans le plus grand récipient. L'efficacité du blindage aux limites de l'enceinte d'échantillonnage peut être vérifiée par essai en l'absence de charge d'espace en mesurant les lectures internes lorsque l'enceinte d'échantillonnage est portée à un potentiel élevé. La pénétration de champs extérieurs peut être très significative si l'enceinte d'échantillonnage doit être abaissée dans les zones centrales des grandes distributions d'échelle de charge électrostatique, où le potentiel spatial local peut atteindre plusieurs dizaines de kilovolts.

8.6 Décroissance de la charge

La dissipation de charge des matériaux constitue un facteur à prendre en compte dans le cadre du contrôle des effets électrostatiques. La mesure du taux d'auto-dissipation de charge représente par conséquent un paramètre important. La dissipation est indiquée par le temps de décroissance de la charge.

Traditionnellement, l'aptitude des matériaux à conduire, et de ce fait, à dissiper la charge a été évaluée par mesure de la résistivité surfacique ou volumique. Ceci peut être réalisé de manière satisfaisante pour les matériaux homogènes. Malheureusement, dans la pratique, bon nombre de matériaux ne sont pas considérés comme homogènes et ont une résistivité qui dépend de la position (directionnelle ou en tension). Dans la mesure où les charges statiques se produisent sur les surfaces par contact ou frottement, la méthode appropriée permettant de déterminer les propriétés de maintien de la charge des matériaux consiste à simuler cette situation pratique par dépôt d'un élément de charge sur le matériau et à observer la vitesse à laquelle elle est dissipée.

La charge d'un matériau par frottement constitue un moyen très simple et pratique de charger la surface d'un matériau solide. Cette méthode présente souvent l'avantage de pouvoir simuler le monde réel. Cependant, l'application de cette méthode de charge peut ne pas être très cohérente. Les poudres, granulés et paillettes de matériau peuvent être facilement chargés, en simulant les conditions du monde réel, par renversement ou simulation d'écoulement.

Le dépôt de charge par décharge par effet couronne à haute tension représente souvent une méthode simple et souple pour charger des matériaux ou des surfaces. Cette méthode est applicable aux surfaces solides, aux poudres ou granulés et aux liquides.

Les matériaux ou objets conducteurs et dissipatifs, d'une résistivité inférieure à environ $10^{11}\Omega$, peuvent être chargés par induction ou par raccordement direct à une source de tension élevée.

La méthode habituelle d'observation de la dissipation de la charge utilise un mesureur de champ pour enregistrer la décroissance du champ de surface associé.

Les matériaux et surfaces utilisés pour assurer un trajet de décharge aux objets supportés peuvent également être évalués en observant la décroissance de tension d'une plaque de métal chargée placée sur le matériau ou la surface.

Sur bon nombre de matériaux isolants, le taux de décroissance de la charge dépend très fortement de la densité de charge – plus la densité de charge est élevée, plus la décroissance

est rapide. Un taux de décroissance de la charge initial très rapide peut diminuer radicalement au fur et à mesure de la décroissance de la densité de charge. Par conséquent, le meilleur moyen d'interpréter le taux de décroissance consiste à considérer l'application du matériau.

Si l'intérêt est porté à la quantité de la charge retenue par un produit pulvérulent pendant le stockage par exemple, la caractéristique à long terme représente un facteur important. Dans une situation de charge dynamique, telle que le transfert pneumatique de matériau, le facteur important est représenté par le taux de migration de charge à court terme avec nettoyage des isolateurs en contact avec le produit.

L'emplacement, la densité de charge et la proximité de surfaces mises à la terre affectent dans leur ensemble les champs électriques conduisant la migration de charge. Dans l'idéal par conséquent, les taux de décroissance de la charge doivent être mesurés dans deux conditions extrêmes afin d'évaluer l'influence des surfaces avoisinantes mises à la terre. Un contact en pointe d'un échantillon à support ouvert favorise plutôt la migration sur la surface alors que le transport par l'échantillon est privilégié pour un échantillon soutenu sur une plaque mise à la terre. Pour les matériaux installés, il est bien entendu nécessaire d'observer la décroissance de la charge en utilisant la terre de l'installation.

Il convient de veiller à réduire au minimum la manipulation des matériaux et les modifications correspondantes des propriétés de surface. Il convient bien entendu de placer les poudres dans un conteneur approprié.

8.7 Résistance et résistivité

La résistance électrique est le paramètre physique ayant la plus grande gamme s'étendant sur quelques 30 ordres de grandeur allant des métaux jusqu'à presque tous les matériaux parfaitement isolants. La résistance et la résistivité des solides et des liquides ont été mesurées depuis très longtemps et un grand nombre de méthodes ont été décrites dans la documentation normative. Une seule méthode ne s'applique bien évidemment pas à toute la gamme mais dans le domaine des phénomènes électrostatiques, il suffit pratiquement dans la plupart des cas de placer l'échantillon entre une paire d'électrodes et de mesurer le courant pour une tension donnée. La résistance à la surface d'un matériau peut être différente de celle dans le même matériau compte tenu de l'effet des contaminants absorbés, notamment l'eau. On doit utiliser un type de système d'électrode nettement différent mais le principe est le même.

On observe une décroissance continue du courant (ou augmentation de la résistivité) pour des matériaux fortement isolants sous un champ électrique constant. De même, pour ces matériaux, le courant peut également augmenter de manière non linéaire en fonction de l'augmentation de la tension. Ces facteurs invalident le concept de résistivité et rendent difficile l'interprétation des observations expérimentales. Il est généralement admis que la résistance enregistrée après une durée spécifiée pour ces matériaux fortement isolants représente la valeur acceptée.

Il est parfois nécessaire de réaliser la mesure de la résistance dans des circonstances pratiques telles que de la surface d'une structure installée à la terre du bâtiment, ou par des chaussures de protection. Dans ces cas, le principe applicable repose sur le fait qu'il convient que le système d'électrode soit, dans toute la mesure du possible, représentatif de l'application réelle.

Il est important d'établir un bon contact entre les électrodes et l'échantillon. On utilise souvent des matériaux conducteurs mous ou des feuilles de métal soutenues par un matériau mou. Des cellules spéciales sont de toute évidence nécessaires pour les liquides et les poudres. Lorsque la résistance du produit est similaire à celle des composants isolants du système de mesure, il convient d'utiliser des électrodes de protection pour dévier les courants parasites. Lors des opérations de remplissage de poudres, on doit veiller à utiliser une méthode qui assure une densité de compacité cohérente.

8.8 Chargeabilité (capacité de charge)

Afin de pouvoir évaluer les courants susceptibles de se produire lors des opérations de traitement ou de manipulation de produits individuels, il est souvent nécessaire de mesurer la chargeabilité. On constate que plus le travail réalisé sur le produit est important, plus la charge est grande. Par exemple, le meulage produit plus de charge que le tamisage de la poudre, et le pompage d'un liquide par un filtre produit plus de charge qu'un flux laminaire. D'autres situations courantes sont: le frottement d'un matériau, le transport d'une toile sur un train étireur, le transport pneumatique de produit pulvérulent, le débit des liquides dans des canalisations et le déplacement de personnes sur un revêtement de sol isolant.

La charge résultant d'un composant du système peut être mesurée directement au moyen d'un pot de Faraday, ou indirectement par observation des champs électriques ou des potentiels créés par cette charge. Du fait de l'égalité d'amplitude de la charge sur la surface d'essai et le matériau de frottement, il est possible de mesurer la charge sur l'un ou l'autre élément.

Des matériaux neufs doivent être utilisés afin d'éviter les changements dus à la contamination.

La séparation de charge peut être accompagnée par la dissipation de charge. Des décharges peuvent se produire entre les corps de séparation. L'équilibre de charge mesuré résulte de l'équilibre des procédés de charge et de décharge. Par conséquent, il convient de mesurer la charge dès que cela est réalisable après la génération de la charge. Par exemple, il convient de verser les produits en écoulement (fluides) en essai dans un système de mesure de type pot de Faraday.

Les champs électriques ambiants peuvent avoir une incidence sur le procédé de séparation de charge, il convient de ce fait de réaliser ces mesures dans un environnement exempt de champ.

8.9 Courant

Plusieurs zones ou emplacements sont à considérer pour mesurer le courant significatif en termes de phénomènes électrostatiques. Des courants très faibles, généralement de moins de quelques nano-ampères, sont générés par conduction dans les isolants. Des courants plus élevés de l'ordre des microampères sont produits par les produits chargés en écoulement alors que des courants élevés de l'ordre des ampères peuvent être générés dans des décharges électrostatiques. Des électromètres disponibles dans le commerce permettent de mesurer de manière appropriée les deux premiers types de courant. Une autre méthode consiste à déterminer l'augmentation du potentiel d'un condensateur connu pour les trois niveaux de courant. Si l'on considère les courants de décharge par étincelles, il est nécessaire de s'assurer que l'ensemble de la charge s'écoule par la dérivation (shunt) de mesure et que la dérivation a une faible résistance de sorte que la tension générée par l'intensité de courant est faible comparée à la tension source. Il convient que l'impédance réactive de la dérivation soit négligeable par rapport à sa résistance, de sorte que la tension sur la dérivation représente une mesure exacte de l'intensité de courant instantané. Le système d'enregistrement transitoire doit avoir un temps de montée en réponse suffisamment plus court que le temps de montée minimal de l'événement de décharge le plus rapide à mesurer. Pour les décharges par étincelles provenant de corps conducteurs, il convient que cette valeur soit de 1 ns ou moins.

On doit porter une attention particulière à l'excursion de tension maximale du système de mesure et il convient de prévoir un dispositif de mise en court-circuit à la terre sans étincelle dans les zones comportant des gaz inflammables.

L'un des moyens appropriés de conserver une faible valeur d'inductance consiste à former une résistance d'entrée de 1 Ω (par exemple) à partir de dix résistances de 10 Ω montées en parallèle. Les résistances montées en surface permettent d'obtenir une dérivation à faible impédance réactive pour des fréquences jusqu'à 1 GHz. Il convient qu'une résistance en série

de 50Ω relie l'entrée du câble de 50Ω au détecteur et qu'il y ait une impédance d'entrée de 50Ω à la terre. Les résistances de 50Ω sont nécessaires pour correspondre à l'impédance caractéristique du câble à ses extrémités afin d'éviter les réflexions de signal qui déforment les formes d'onde observées. Il convient de noter que l'impédance d'entrée de 50Ω est égale à la moitié de la tension observée. On doit prêter une attention particulière à la mise à la terre et au blindage afin d'éviter de faire des observations parasites des événements de décharge de transitoire rapide. Il est utile de vérifier la présence de signaux négligeables lorsque l'événement de décharge se produit directement à la surface mise à la terre plutôt qu'au niveau de la sonde.

8.10 Énergie des décharges capacitives

La détermination de l'énergie électrostatique libérée dans une décharge est un paramètre important pour l'évaluation de la vulnérabilité au dommage des dispositifs sensibles et du caractère à risque des mélanges de matériaux inflammables dans l'air. Il n'existe à l'heure actuelle aucune méthode véritablement reconnue permettant de mesurer directement cette énergie. La méthode la plus générale de détermination de l'énergie électrostatique stockée consiste à mesurer la tension, V , et la capacité, C , de l'objet chargé, l'énergie étant donnée par $0,5 CV^2$. Par conséquent, la décharge d'un condensateur connu chargé à un potentiel préétabli constitue la base des méthodes courantes d'évaluation des effets de décharge. La CEI 61000-4-2 décrit la méthode d'essai des appareils électroniques de puissance et la BS EN 13821 concerne la détermination de l'énergie d'inflammation minimale des mélanges poussière/air.

8.11 Énergie d'inflammation

8.11.1 Généralités

L'énergie requise pour enflammer les gaz ou nuages de poussières inflammables est plus faible si le circuit de décharge comporte des composants résistifs et inductifs qui prolongent la durée de la décharge. L'essai réputé le plus représentatif à cet effet n'utilise pas de bobines d'inductance supplémentaires. L'énergie d'inflammation minimale (MIE) pour un mélange particulier vapeur/air ou poussière/air est déterminée par des essais répétés avec réduction progressive de l'énergie d'étincelle jusqu'à absence totale d'inflammation. La poudre est dispersée dans l'air à proximité de l'éclateur par une courte bouffée d'air comprimé et la décharge par étincelles est appliquée quelques dizaines de millisecondes plus tard. Chaque ensemble de conditions nécessite un grand nombre d'observations. La CEI 61241-2-3 spécifie la méthode de détermination de l'énergie d'inflammation minimale des mélanges poussière/air.

Une méthode appropriée d'évaluation du pouvoir d'inflammation des étincelles provenant de surfaces chargées consiste à provoquer une étincelle d'une électrode sphérique mise à la terre contenue dans une enceinte d'isolation alimentée par un mélange de gaz inflammables contrôlé. Le dispositif est désigné sonde d'inflammation. L'inflammation du mélange inflammable baignant l'électrode indique un pouvoir d'inflammation direct. Les inflammations semblent se produire plus rapidement si les surfaces sont à un potentiel négatif par rapport à la sonde. L'occurrence de l'inflammation indique que les conditions se situent dans les limites du risque d'inflammation. Cependant, l'inflammation relevant d'un traitement statistique, il est nécessaire de réaliser de nombreux essais sans inflammation afin de s'assurer que les risques d'inflammation sont faibles.

La tension doit être mesurée avant et après la décharge car toute l'énergie initiale peut ne pas avoir été libérée.

L'effet des étincelles électrostatiques peut varier dans une large mesure en fonction du temps de montée et de la durée. On constate que le temps de montée des étincelles dues à l'air entre des conducteurs en métal est plus rapide pour des tensions inférieures, voire même plus rapide encore avec un éclateur de fermeture qu'avec un éclateur fixe. L'essai de la CEI spécifie l'utilisation d'une décharge par étincelles provenant d'une électrode chargée s'approchant d'un circuit sensible et un contact direct de l'électrode, la bonne forme d'onde

de courant étant assurée par un relais rapide. Le courant de décharge instantané est plus élevé pendant le contact direct, ce qui implique par conséquent un essai plus rigoureux du dispositif.

Pour réaliser des mesures fiables des énergies d'inflammation des mélanges inflammables de vapeur/air ou de poussière/air dispersés, les composants doivent être bien mélangés et les concentrations doivent être bien définies au niveau des électrodes d'inflammation. L'espace entre les électrodes d'inflammation doit être plus grand que le minimum requis afin de pouvoir réduire l'effet de refroidissement des électrodes à étincelles lors du développement du noyau d'inflammation. On doit porter une attention particulière au circuit de décharge et ses composants afin de s'assurer que la décharge est réellement capacitive. L'optimisation des débits et durées de la décharge d'inflammation pour ce qui concerne la dispersion du nuage de poussières nécessite une grande expérience en la matière.

Lorsqu'on utilise la sonde d'inflammation, une bonne ventilation de toute la zone considérée doit être assurée afin d'éviter l'accumulation d'un grand volume d'atmosphère inflammable et le risque d'une explosion de grande ampleur en cas d'inflammation.

8.11.2 Energie équivalente

L'inflammabilité d'une substance inflammable du fait d'une décharge électrostatique est caractérisée par l'énergie d'inflammation minimale. L'intensité (facteur temporel) et l'étalement spatial (facteur spatial) de la décharge électrostatique représentent également des facteurs importants pour déterminer la probabilité d'inflammation d'une décharge électrostatique. Cependant, à l'exception des décharges par étincelles, il n'est pas facile de déterminer l'énergie totale de décharge électrostatique. Il est encore moins facile de déterminer la part de cette énergie qui contribue à l'inflammation. C'est pour cette raison qu'on utilise la décharge par étincelles pour mesurer l'énergie d'inflammation dans la mesure où la décharge développe une densité énergétique élevée tant dans le domaine temporel que spatial ce qui facilite la détermination de l'énergie de décharge. Dans une décharge électrostatique autre que la décharge par étincelles, l'énergie équivalente correspondante est définie comme $X J$ lorsque la décharge enflamme une atmosphère inflammable avec l'énergie d'inflammation minimale $X J$. Etant donné que l'énergie équivalente est déterminée expérimentalement par comparaison avec l'énergie d'inflammation, il est préférable de l'utiliser pour l'analyse du risque d'inflammation. A noter que l'énergie de décharge autre que la décharge par étincelles à laquelle il est fait référence ci-après correspond à cette énergie équivalente. Des études plus récentes sur l'efficacité de la contribution d'une décharge électrostatique spécifique à l'inflammation d'une atmosphère inflammable, indiquent que cette énergie équivalente peut également être désignée énergie efficace (voir références [7] et [8]).

8.12 Charge transférée dans des décharges électrostatiques

8.12.1 Généralités

AVERTISSEMENT: il convient de ne jamais mesurer le transfert de charge en présence d'atmosphères inflammables.

La quantité de charge transférée dans une décharge électrostatique peut être mesurée pour tous les types de décharge. Une application de mesure de transfert de charge concerne la prévision de la probabilité d'inflammation. Dans certains cas, il est établi que la probabilité qu'une décharge enflamme une atmosphère inflammable peut être associée à la quantité de charge transférée dans la décharge [7]. Il convient de noter que toute relation entre le transfert de charge et la probabilité d'inflammation peut être limitée aux matériaux spécifiques qui génèrent les décharges et au système de mesure particulier utilisé. Ceci s'explique par le fait que les décharges varient en fonction de la distribution spatiale et temporelle de l'énergie. Par exemple, une décharge par effet de brosse peut présenter une moindre probabilité d'inflammation qu'une décharge par étincelles impliquant le transfert de la même quantité de charge car l'énergie associée au transfert de charge est distribuée dans un plus grand volume de gaz. Bien que des valeurs limites aient été établies pour le transfert de charge minimal nécessaire pour enflammer des gaz de différente sensibilité, il convient de ne considérer les valeurs limites qu'à titre indicatif. On doit prêter une attention particulière à la sécurité des

matériaux dont les résultats de mesure du transfert de charge sont proches des valeurs limites spécifiées.

La Figure 6 illustre une disposition de base de mesure de la charge transférée dans des décharges électrostatiques.

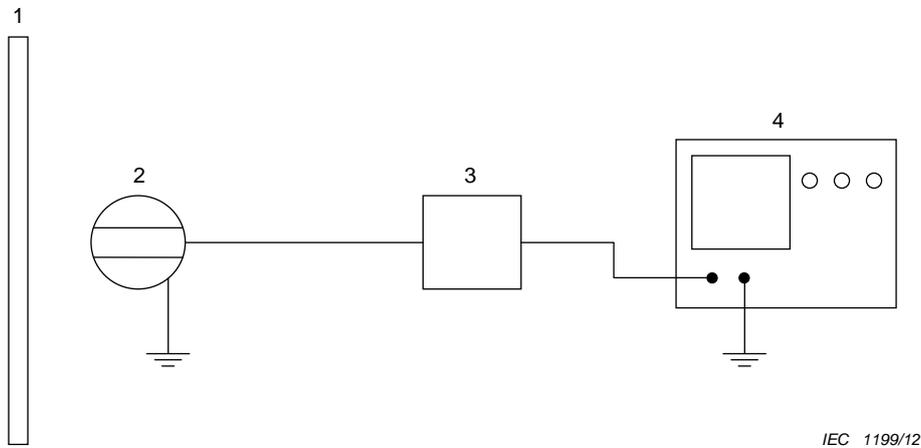


Figure 6a) – Dispositions de base

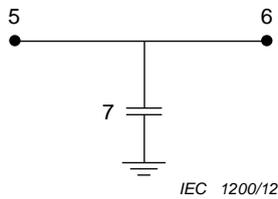


Figure 6b) – Circuits de mesure avec condensateur

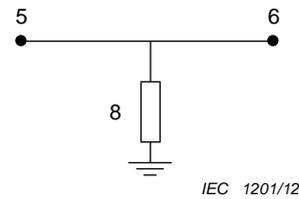


Figure 6c) – Circuits de mesure avec résistance

Légende

- 1 Objet ou surface chargé(e)
- 2 Electrode de décharge sphérique à deux composants
- 3 Circuit de mesure
- 4 Oscilloscope à mémoire numérique (par exemple, largeur de bande de 1 GHz)
- 5 Raccordement à l'électrode
- 6 Raccordement à l'oscilloscope
- 7 Condensateur (par exemple, 20 nF)
- 8 Résistance (par exemple, 0,25 Ω)

Figure 6 – Dispositions de base pour mesurer la charge transférée dans des décharges électrostatique, avec des circuits de mesure alternatifs

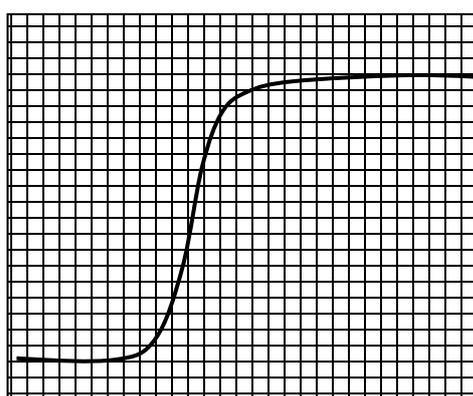
8.12.2 Électrode de décharge

Il convient que la taille et la géométrie de l'électrode soient adaptées à l'application pour laquelle les mesures sont réalisées. Par exemple, le diamètre optimal permettant de produire des décharges incendiaires aux gaz d'hydrocarbures types à partir de surfaces fortement chargées est d'environ 30 mm. Pour les surfaces à densité de charge plus faible, une électrode de diamètre plus petit, 2 mm par exemple, peut être plus appropriée, notamment

dans le cas de l'inflammation de gaz très sensibles tels que l'hydrogène. Il convient d'éviter d'utiliser des électrodes de diamètre bien inférieur à 2 mm car elles sont susceptibles d'induire une décharge par effet couronne. Dans l'idéal, il convient que les électrodes de diamètre supérieur à 10 mm soient à deux composants, le noyau central étant raccordé au système de mesure et la gaine extérieure étant reliée à la terre. Pour éviter l'effet de charge induite sur l'électrode avant une décharge, il est nécessaire d'utiliser des électrodes à deux composants.

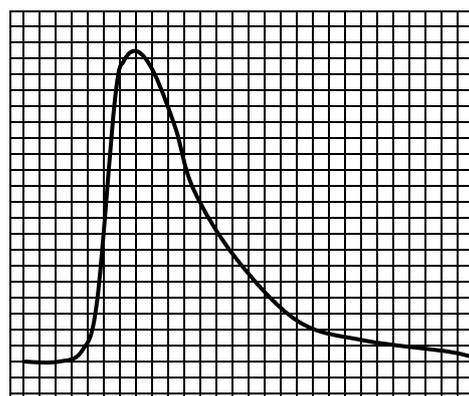
8.12.3 Circuit de mesure

Le circuit de mesure peut comporter l'un des deux composants suivants: un condensateur ou une résistance, dont les valeurs types sont respectivement de 20 nF et 0,25 Ω . Un oscilloscope est utilisé pour principalement mesurer la différence de potentiel en fonction du temps. Chacun des composants possibles produit un tracé tension/temps différent sur l'oscilloscope comme illustré à la Figure 7.



IEC 1202/12

Figure 7a) – Circuit de mesure avec condensateur



IEC 1203/12

Figure 7b) – Circuit de mesure avec résistance

NOTE Il s'agit de représentations idéales de tracés d'oscilloscope, mais dans la pratique, le tracé tension/temps peut afficher des sur-oscillations et autres artéfacts.

Figure 7 – Tracés d'oscilloscope tension/temps

Un condensateur installé dans le circuit de mesure produit un tracé à fonction en échelon sur l'oscilloscope. Le transfert de charge, exprimé en coulombs, peut être calculé en multipliant l'amplitude du tracé en volts par la valeur de la capacité en farads.

Une résistance installée dans le circuit de mesure produit une impulsion. Le système de mesure de l'oscilloscope est utilisé pour intégrer la tension en fonction du temps pour produire une valeur en volts par secondes (V/s) qu'il est ensuite possible de diviser par la valeur de la résistance en ohms, pour obtenir le transfert de charge en coulombs.

8.12.4 Autres dispositions de mesure du transfert de charge

Des instruments du commerce, disponible sur le marché, désignés coulombmètres portatifs, disposent d'un système autonome de mesure du transfert de charge. Les instruments sont en général faciles à utiliser et fournissent une lecture directe de la valeur du transfert de charge. Les coulombmètres portatifs permettent d'identifier les sources potentielles de décharges incendiaires, mais il convient cependant de tenir compte des éléments suivants à leur usage:

- si l'électrode de décharge est fixe, elle peut ne pas avoir la taille optimale pour l'application;
- si l'électrode de décharge est une sphère solide, les mesures peuvent être influencées par les charges induites;

- c) en l'absence d'affichage graphique, il peut ne pas être possible de pouvoir déterminer si la mesure relève d'une décharge simple ou de la charge cumulée de plusieurs décharges.

8.13 Capacité

La capacité peut être mesurée au moyen d'autres instruments de mesure de tension par pont ou en mesurant les variations de tension lorsque la charge est partagée entre une capacité connue et une capacité inconnue. Pour un partage de charge entre deux condensateurs C_1 et C_2 avec des tensions initiales V_1 et V_2 et une tension finale commune V_3 , la capacité inconnue C_2 est donnée par:

$$C_2 = C_1 \cdot \frac{V_1 - V_2}{V_3 - V_2}. \quad (10)$$

Il est nécessaire de prêter une attention particulière à la mesure des valeurs des condensateurs utilisés pour fournir l'énergie des décharges par étincelles dans la mesure où la relaxation diélectrique peut affecter le taux auquel la charge est disponible. De ce fait, la capacité utile peut être inférieure à la capacité mesurée avec des méthodes à basse fréquence. Dans ce cas, la mesure par partage de charge via une décharge par étincelles et en utilisant un condensateur de haute qualité connue aux environs de la tension d'exploitation normale peut représenter la méthode la plus appropriée.

Les faibles valeurs de capacité doivent être déterminées en mesurant la différence entre les lectures lorsque le conducteur actif n'est pas en contact avec l'élément d'essai, puis lorsqu'il est en contact, sans autre modification des dispositions de raccordement, pour permettre la capacité des conducteurs de liaison.

8.14 Rigidité diélectrique

La mesure de la rigidité diélectrique des films ou couches minces d'isolation constitue un facteur important pour évaluer la possibilité de résistance aux décharges par effet de brosse par propagation sur le matériau. Le paramètre important est la tension de claquage et la valeur critique est d'environ 4 kV.

La tenue au claquage des isolateurs est principalement caractérisée par les défauts présents dans le matériau. Le résultat est par conséquent fortement influencé par la zone en essai. Le nombre de défauts augmente en fonction de l'agrandissement de la zone, réduisant ainsi la tenue au claquage. Réciproquement, une zone plus petite augmente la tension de claquage et le danger apparent. A titre de recommandation, la tenue au claquage du polyéthylène est d'environ 20 MVm⁻¹, de ce fait une couche d'environ 200 µm d'épaisseur résistera à 4 kV. La capacité d'un condensateur à plaque ayant ce diélectrique de type à couche est d'environ 90 nF m⁻² et l'énergie stockée (0,5 CV²) à 4 kV est de 720 mJ m⁻². Par conséquent, une énergie d'environ 7 mJ est en principe disponible d'une surface de matériau de 100 cm². Une surface d'électrode d'essai de quelques centimètres carrés fournit une estimation réaliste du danger.

Un circuit simple destiné à charger un condensateur a été développé pour fournir la tension d'essai en rampe. On doit veiller à éviter les chocs électriques dans la mesure où le circuit utilise une tension élevée en association avec de grandes capacités et des résistances de protection relativement faibles. La CEI 60243-1 et la CEI 60243-2 spécifient les méthodes d'essai correspondantes.

Bibliographie

- [1] LUTTGENS, G. and WILSON, N., "*Electrostatic Hazards*", Butterworth, Heinemann 1997
- [2] AMERASEKARA, A. and DUVVERY, C., "*ESD in Silicon Integrated Circuits*", John Wiley & Sons Ltd, 1995
- [3] KELLY, M., "*A Comparison of electrostatic discharge models and failure signatures for CMOS integrated circuit devices*", EOS/ESD Symposium 1995
- [4] CLC/TR 50404/2003, *Electrostatics – Code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity* (disponible en anglais uniquement)
- [5] CROSS, J.A., "*Electrostatics – Principles, Problems and Applications*", Adam Hilger, Bristol, 1987
- [6] CHANG, Jen-Shih, et al., "*Handbook of Electrostatic Processes*", Marcel Dekker, New York - Basel - Hong Kong 1995
- [7] GIBSON, N. and LLOYD, F.C., "*Incendivity of discharges from electrostatically charged plastics*", Brit. J. Appl. Phys., Vol. 16, pp. 1619 - 1631, 1965
- [8] BRITTON L.G., *Avoiding static ignition hazards in chemical operations*. American Institute of Chemical Engineers, New York, 1999
- [9] CEI 60068-1, *Essais d'environnement – Partie 1: Généralités et guide*
- [10] CEI 60079-1-1:2002, *Matériel électrique pour atmosphères explosives gazeuses – Partie 1-1: Enveloppe antidéflagrante "d" – Méthode d'essai pour la détermination de l'interstice expérimental maximal de sécurité*
- [11] CEI 60079-12:2002, *Matériel électrique pour atmosphères explosives gazeuses – Partie 12: Classement des mélanges de gaz ou de vapeurs et d'air suivant leur interstice expérimental maximal de sécurité et leur courant minimal d'inflammation*
- [12] CEI 60079-17, *Atmosphères explosives – Partie 17: Inspection et entretien des installations électriques*
- [13] CEI 60079-20:2002, *Matériel électrique pour atmosphères explosives gazeuses – Partie 20: Données pour gaz et vapeurs inflammables, en relation avec l'utilisation des matériels électriques*
- [14] CEI 60721-2-1, *Classification des conditions d'environnement – Partie 2-1: Conditions d'environnement présentes dans la nature – Température et humidité*
- [15] CEI 61340-2-1, *Électrostatique – Partie 2-1: Méthodes de mesure – Capacité des matériaux et des produits à dissiper des charges électrostatiques*
- [16] CEI 61340-2-3, *Électrostatique – Partie 2-3: Méthodes d'essais pour la détermination de la résistance et de la résistivité des matériaux plans solides destinés à éviter les charges électrostatiques*
- [17] CEI 61340-3-1, *Électrostatique – Partie 3-1: Méthodes pour la simulation des effets électrostatiques – Formes d'onde d'essai des décharges électrostatiques pour le modèle du corps humain (HBM)*

- [18] CEI 61340-3-2, *Électrostatique – Partie 3-2: Méthodes pour la simulation des effets électrostatiques – Formes d’onde d’essai des décharges électrostatiques pour les modèles de machine (MM)*
 - [19] CEI 61340-4-1, *Électrostatique – Partie 4-1: Méthodes d’essai normalisées pour des applications spécifiques – Résistance électrique des revêtements de sol et des sols finis*
 - [20] CEI 61340-4-4, *Électrostatique – Partie 4-4: Méthodes d’essai normalisées pour des applications spécifiques – Classification électrostatique des grands récipients pour vrac souples (GRVS)*
 - [21] IEC 61892-7, *Mobile and fixed offshore units – Electrical installations – Part 7: Hazardous areas*
(disponible en anglais uniquement)
 - [22] ANSI/ESD STM5.3.1-1999, *Charged Device Model (CDM) – Component Level U*. von Pidoll et al., *Determining the incendivity of electrostatic discharges without explosive gas mixtures*. IEEE Transactions on Industry Applications, 40 (2004), 1467-1475
 - [23] LANEGGER, T. et al, PTB, Braunschweig, 2010
 - [24] GLOR, M. et al, *Measurement of Charge Transfer during Filling and Emptying FIBC; Process Safety and Environmental Protection* 87 (1), pp. 64-69
 - [25] TAYLOR, D.M., SECKER, P.E., "*Industrial Electrostatics: Fundamentals and Measurements*", 1994
-

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch