

# TECHNICAL REPORT

# RAPPORT TECHNIQUE

---

**High-voltage switchgear and controlgear –  
Part 303: Use and handling of sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>)**

**Appareillage à haute tension –  
Partie 303: Utilisation et manipulation de l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>)**



## THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2008 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  
Email: [inmail@iec.ch](mailto:inmail@iec.ch)  
Web: [www.iec.ch](http://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.

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

The IEC on-line Catalogue enables you to search by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: [www.iec.ch/online\\_news/justpub](http://www.iec.ch/online_news/justpub)

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

- Electropedia: [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary online.

- Customer Service Centre: [www.iec.ch/webstore/custserv](http://www.iec.ch/webstore/custserv)

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

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

---

### 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.

- Catalogue des publications de la CEI: [www.iec.ch/searchpub/cur\\_fut-f.htm](http://www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm)

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: [www.iec.ch/online\\_news/justpub](http://www.iec.ch/online_news/justpub)

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

- Electropedia: [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International en ligne.

- Service Clients: [www.iec.ch/webstore/custserv/custserv\\_entry-f.htm](http://www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm)

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

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



# TECHNICAL REPORT

# RAPPORT TECHNIQUE

---

**High-voltage switchgear and controlgear –  
Part 303: Use and handling of sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>)**

**Appareillage à haute tension –  
Partie 303: Utilisation et manipulation de l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>)**

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMMISSION  
ELECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

PRICE CODE **XC**  
CODE PRIX

## CONTENTS

FOREWORD.....	5
INTRODUCTION.....	7
1 Scope.....	8
2 Normative references .....	8
3 Terms and definitions .....	8
4 Storage and transportation of SF <sub>6</sub> .....	11
4.1 Storage of containers filled with SF <sub>6</sub> .....	11
4.2 Transportation of containers filled with SF <sub>6</sub> .....	13
4.3 Storage and transportation of electric power equipment containing SF <sub>6</sub> .....	14
4.4 Responsibilities .....	14
5 Safety and first aid .....	14
5.1 General safety rules .....	14
5.1.1 Protection of personnel.....	15
5.1.2 Handling of contaminated safety equipment and tools .....	16
5.1.3 Pressurised equipment and tools or measuring devices.....	17
5.1.4 Personal safety and protective equipment .....	17
5.1.5 Facilities and services .....	18
5.2 Additional safety measures in case of abnormal release of SF <sub>6</sub> due to external fire or internal arc fault.....	18
5.3 First aid equipment and treatment .....	19
5.3.1 Irritation of the skin.....	19
5.3.2 Irritation of the eyes.....	19
5.3.3 Breathing difficulty .....	20
6 Training and certification .....	20
6.1 General.....	20
6.2 Training modules.....	20
6.2.1 Module A – Awareness .....	21
6.2.2 Module B1 – Maintenance not implying gas recovery.....	21
6.2.3 Module B2 – Installation and commissioning.....	22
6.2.4 Module C1 – Maintenance implying gas recovery .....	22
6.2.5 Module C2 – Decommissioning of electric power equipment at the end-of-life .....	23
6.3 Certification.....	23
7 SF <sub>6</sub> handling during installation and commissioning .....	23
7.1 Evacuation, filling and checking the SF <sub>6</sub> quality after filling .....	23
7.2 Topping-up of SF <sub>6</sub> pre-filled compartments to the rated pressure/density .....	25
7.3 Filling sealed pressure systems.....	27
8 SF <sub>6</sub> handling during normal service life .....	27
8.1 Re-filling of SF <sub>6</sub> to the nominal pressure/density .....	27
8.2 Checking the SF <sub>6</sub> quality .....	28
8.2.1 Measurement of the SF <sub>6</sub> quality with portable equipment.....	29
8.2.2 Sampling and shipment of SF <sub>6</sub> for off-site analysis .....	29
9 SF <sub>6</sub> recovering and reclaiming during maintenance.....	30
9.1 Recovery and reclaiming of SF <sub>6</sub> from any compartment of controlled and/or closed pressure systems containing non-arc'd and/or normally arc'd SF <sub>6</sub> .....	30

9.2	Recovery and reclaiming from any compartment of controlled and/or closed pressure systems containing heavily arced SF <sub>6</sub> .....	32
10	Dismantling of SF <sub>6</sub> electric power equipment at the end-of-life .....	34
10.1	End-of-life of controlled and/or closed pressure systems .....	35
10.2	End-of-life of sealed pressure systems .....	35
10.3	Recovery and reclaiming of SF <sub>6</sub> at the end-of-life of sealed pressure systems .....	36
10.4	Dismantling of electric power equipment at the end-of-life .....	38
10.5	By-products at the end-of-life .....	39
11	Description of SF <sub>6</sub> handling equipment.....	40
11.1	Reclaimer.....	40
11.1.1	External and internal pre-filters.....	41
11.1.2	Filters .....	41
11.1.3	Vacuum pump .....	42
11.1.4	Main and auxiliary compressors.....	43
11.1.5	External and internal gas storage containers .....	43
11.1.6	Evaporator and gas storage container heater .....	43
11.1.7	Gas piping and pipe junctions.....	43
11.1.8	Control instruments .....	43
11.1.9	Safety valves.....	44
11.2	Flexible hose connections .....	44
11.3	Portable devices for gas measurement.....	44
11.3.1	Dew point meter .....	44
11.3.2	SF <sub>6</sub> percentage measuring device.....	45
11.3.3	Reaction tubes sensitive to SO <sub>2</sub> .....	45
11.3.4	Portable SF <sub>6</sub> detectors .....	45
11.3.5	Alarm system SF <sub>6</sub> detectors .....	46
11.4	Cylinder for gas samples .....	46
Annex A (informative)	Sulphur hexafluoride .....	47
Annex B (informative)	Environmental effects of SF <sub>6</sub> .....	51
Annex C (informative)	SF <sub>6</sub> by-products .....	54
Annex D (informative)	Potential effects on health of SF <sub>6</sub> by-products.....	57
Bibliography.....		76
Figure 1 –	Commissioning or re-commissioning of SF <sub>6</sub> compartments .....	24
Figure 2 –	Topping-up of SF <sub>6</sub> pre-filled compartments to the rated pressure/density .....	26
Figure 3 –	SF <sub>6</sub> re-filling to the nominal pressure/density .....	28
Figure 4 –	Checking the SF <sub>6</sub> quality on-site .....	29
Figure 5 –	SF <sub>6</sub> sampling and shipment .....	30
Figure 6 –	Recovering and reclaiming from any compartment of controlled and/or closed pressure systems containing non-arced and/or normally arced SF <sub>6</sub> .....	31
Figure 7 –	Recovering and reclaiming from any compartment of controlled and/or closed pressure systems containing heavily arced SF <sub>6</sub> .....	33
Figure 8 –	End-of-life of controlled and/or closed pressure systems.....	35
Figure 9 –	End-of-life of sealed pressure systems.....	36
Figure 10 –	SF <sub>6</sub> recovery and reclaiming at the end-of-life of sealed pressure systems .....	37
Figure 11 –	Dismantling of electric power equipment .....	39
Figure 12 –	General purpose reclaimer .....	41

Figure A.1 – Pressure/temperature/density characteristics for SF <sub>6</sub> [9].....	48
Table 1 – Methods for storage of SF <sub>6</sub> .....	12
Table 2 – Container types and labelling required for storage and transportation of SF <sub>6</sub> .....	13
Table 3 – International regulations for shipment of SF <sub>6</sub> .....	14
Table 4 – Measures when working with SF <sub>6</sub> electric power equipment .....	15
Table 5 – Safety measures when opening and/or accessing gas compartments .....	16
Table 6 – Neutralising solutions .....	17
Table 7 – Additional safety measures .....	19
Table 8 – Commissioning or re-commissioning of SF <sub>6</sub> compartments.....	25
Table 9 – Topping-up of SF <sub>6</sub> pre-filled compartments to the rated pressure/density .....	27
Table 10 – SF <sub>6</sub> re-filling to the nominal pressure/density .....	28
Table 11 – Checking the SF <sub>6</sub> quality on-site .....	29
Table 12 – SF <sub>6</sub> sampling and shipment.....	30
Table 13 – Recovering and reclaiming from any compartment of controlled and/or closed pressure systems containing non-arced and/or normally arced SF <sub>6</sub> .....	32
Table 14 – Recovering and reclaiming from any compartment of controlled and/or closed pressure systems containing heavily arced SF <sub>6</sub> .....	34
Table 15 – SF <sub>6</sub> recovery at the end-of-life of sealed pressure systems .....	38
Table 16 – Expected SF <sub>6</sub> characteristics and quantity of by-products .....	40
Table 17 – Typical filter types used during SF <sub>6</sub> reclaiming .....	42
Table 18 – Gas measuring devices .....	44
Table A.1 – Main chemical characteristics of SF <sub>6</sub> [9].....	47
Table A.2 – Main physical characteristics of SF <sub>6</sub> [9].....	49
Table A.3 – Main electrical characteristics of SF <sub>6</sub> [9] .....	49
Table D.1 – TLVs for SOF <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , HF, and S <sub>2</sub> F <sub>10</sub> .....	60
Table D.2 – Results of example calculations for leakage situations.....	63
Table D.3 – Results for leakage situations taking account of SOF <sub>2</sub> hydrolysis .....	64
Table D.4 – Sample calculation of S <sub>2</sub> F <sub>10</sub> concentration for partial discharges .....	65
Table D.5 – Sample calculation of S <sub>2</sub> F <sub>10</sub> concentration for corona discharges .....	66
Table D.6 – Sample calculation of S <sub>2</sub> F <sub>10</sub> concentration for disconnector sparking.....	67
Table D.7 – Sample calculation of SOF <sub>2</sub> concentrations for internal fault situations .....	68
Table D.8 – Switchgear volume and filling pressure .....	71
Table D.9 – Arc energies for interruptions.....	72
Table D.10 – Arc energies for internal faults .....	72
Table D.11 – SOF <sub>2</sub> production rates .....	73
Table D.12 – Quantities of SOF <sub>2</sub> formed.....	73
Table D.13 – SF <sub>6</sub> leakage rates .....	73
Table D.14 – SOF <sub>2</sub> leakage rates .....	74

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

## HIGH-VOLTAGE SWITCHGEAR AND CONTROLGEAR –

**Part 303: Use and handling of sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>)**

## 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 should be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with an IEC Publication.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability should 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 should 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 62271-303, which is a technical report, has been prepared by subcommittee 17A: High-voltage switchgear and controlgear, of IEC technical committee 17: Switchgear and controlgear.

This first edition of IEC/TR 62271-303 cancels and replaces the first edition of IEC 61634 published in 1995. This edition constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition.

IEC 62271-303 is a major revision of the old IEC 61634. The former sections of IEC 61634 are removed and replaced by the chapters of the CIGRE brochure n. 276.

IEC 61634 was issued in 1995 when the focus was on safety. In 2008, safety is a very well known and established concept and the focus is nowadays on the environmental compatibility. SF<sub>6</sub> must be kept in a closed cycle and any intentional release must be forbidden. The implementation of the SF<sub>6</sub> reuse concept suggested in the CIGRE brochure was updated with the most recent information. Today SF<sub>6</sub> can be recovered and reclaimed for either being reused on-site or given back to the gas supplier and reused as raw material for the production of "technical grade SF<sub>6</sub>". Detailed procedures for appropriate SF<sub>6</sub> handling are given together with the description of the state-of-the-art equipments and measuring devices.

More in detail, clause by clause:

- The former Section 1 was removed and replaced with Clause 1 "Scope", Clause 2 "Normative references" and Clause 3 " Terms and Definitions".
- Clause 4 "Storage and transportation of SF<sub>6</sub>", Clause 5 "Safety and first aid", Clause 6 "Training and certification", and Clause 11 "Description of SF<sub>6</sub> handling equipment" were taken from the CIGRE brochure and their content was revised.
- Clause 7 " SF<sub>6</sub> handling during installation and commissioning", Clause 8 " SF<sub>6</sub> handling during normal service life", Clause 9 " SF<sub>6</sub> recovery and reclaiming during maintenance", and Clause 10 "Dismantling of SF<sub>6</sub> electric power equipment at the end-of-life" were taken from the CIGRE brochure, their content was revised and replaces the former sections 2, 3, 4, 5, and 6.
- The former Annexes A, B, C, and D were revised while the Annexes E and F were dropped. The Bibliography replaces the former Annex G.

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

Enquiry draft	Report on voting
17A/813/DTR	17A/817/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 parts of IEC 62271 series, under the general title *High-voltage switchgear and controlgear* can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the maintenance result 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

SF<sub>6</sub> technology is used in switchgear and controlgear, for more than 30 years. Its application is mainly in electric power equipment for rated voltages exceeding 1 kV up to the highest rated voltages for which switchgear and controlgear are manufactured. It is estimated that several millions of the different types of SF<sub>6</sub>-filled units are currently in service.

Three methods for gas containment are technically available, according to IEC 62271-1:

- controlled pressure system;

NOTE 1 Controlled pressure systems are no longer used for new equipment, because of the unacceptable leakage rate (see IEC 62271-203).

- closed pressure system: modern high-voltage electric power equipments. The standardized values for leakage rates are 0,5 % and 1 % per year and per gas-filled compartment;
- sealed pressure system: modern medium-voltage electric power equipments (commercially designated as “sealed for life products” or “hermetically sealed systems”). The tightness of sealed pressure systems is specified by their expected operating life. The expected operating life with regard to leakage performance is specified by the manufacturer. Preferred values are 20, 30 and 40 years.

NOTE 2 To fulfil the expected operating life requirement the leakage rate of the SF<sub>6</sub> sealed pressure systems is considered to be less than 0,1 % per year.

The long experience with the use of SF<sub>6</sub> in switchgear and controlgear evidences that a certain number of elementary precautions and procedures should be adopted in order to achieve operational, safety at work and environmental benefits such as:

- safe operation of the equipment;
- optimisation of resources and tools required;
- minimisation of out-of-service time for equipment;
- standard training of personnel handling SF<sub>6</sub>;
- reduction of the amount of gas released during handling operations down to the functional physical limit;
- avoidance of any deliberate release, for example flushing to the atmosphere;
- reduction of SF<sub>6</sub> losses and emissions during commissioning, service, operation and end-of-life treatment to a minimum.

Recently, the latest practical recommendations on the use of SF<sub>6</sub> technology applied to switchgear and controlgear have been published by WG B3.02 of CIGRE Study Committee B3 [1]<sup>1</sup>. This information is used to revise IEC 61634 into the present technical report.

---

<sup>1</sup> Figures in square brackets refer to the **Bibliography**.

## HIGH-VOLTAGE SWITCHGEAR AND CONTROLGEAR –

### Part 303: Use and handling of sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>)

#### 1 Scope

The scope of this technical report is to address the procedures for safe and environmental compatible handling of SF<sub>6</sub> during installation, commissioning, normal and abnormal operations, disposal at the end-of-life of high-voltage switchgear and controlgear. Storage and transportation of SF<sub>6</sub> are also covered.

These procedures should be regarded as minimum requirements to ensure the safety of personnel working with SF<sub>6</sub> and to minimize the SF<sub>6</sub> emission to the environment.

This technical report generally applies also to gas mixtures containing SF<sub>6</sub>.

NOTE 1 For the use of this technical report, the term “high voltage” (reference IEC 601-01-27) is the rated voltage above 1 000 V. However, the term “medium voltage” (reference IEC 601-01-28) is commonly used for distribution systems with voltages above 1 kV and generally applied up to and including 52 kV.

NOTE 2 Throughout this technical report, the term “electric power equipment” stands for “high-voltage and medium voltage switchgear and/or controlgear”.

#### 2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this technical report. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60050-441, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 441: Switchgear, controlgear and fuses*

IEC 60376, *Specification of technical grade sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) for use in electrical equipment*

IEC 60480, *Guidelines for the checking and treatment of sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) taken from electrical equipment and specifications for its reuse*

IEC 62271-1, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications*

IEC 62271-100, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 100: Alternating-current circuit-breakers*

#### 3 Terms and definitions

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

NOTE There are many different types of electric power equipment which use SF<sub>6</sub> as a dielectric and/or arc-quenching medium.

##### 3.1

##### **abnormal release of sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>)**

release from equipment in service due to a failure in the pressure system

NOTE An abnormal SF<sub>6</sub> release is usually an un-wanted and continuous emission of gas. As soon as an abnormal SF<sub>6</sub> leakage is detected, appropriate measures to locate and eliminate the leak should be immediately arranged.

### 3.2

#### **handling of sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>)**

any process which might involve transfer of SF<sub>6</sub>

### 3.3

#### **evacuation**

transfer of a gas different from SF<sub>6</sub> (for example air or N<sub>2</sub>) from the gas compartment to the atmosphere. The operation is performed utilising a vacuum pump

### 3.4

#### **recovery of sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>)**

transfer of SF<sub>6</sub> from the gas compartment into a reclaimer or storage container. The operation is normally performed utilising a recovery compressor

### 3.5

#### **topping-up with sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>)**

filling with SF<sub>6</sub> a pre-filled compartment to the SF<sub>6</sub> rated filling pressure

NOTE Pre-filled compartments are closed pressure systems filled in the factory prior to shipment. They contain SF<sub>6</sub> at a typical pressure between 0,12 MPa to 0,15 MPa allowing for a faster and easier commissioning on-site.

### 3.6

#### **reclaim of sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>)**

a series of SF<sub>6</sub> handling including recovery and minimum SF<sub>6</sub> refining process such as filtering dust, by-products, moisture, oil, etc.

NOTE 1 A standard reclaimer is described in 11.1.

NOTE 2 Sometimes the words “reclaiming” or “reclamation” may be used with the same meaning as “reclaim”.

### 3.7

#### **metal-enclosed switchgear and controlgear**

switchgear and controlgear assemblies with an external metal enclosure intended to be earthed, and complete except for external connections  
[IEV 441-12-04]

### 3.8

#### **insulation-enclosed switchgear and controlgear**

switchgear and controlgear assemblies with an external insulation enclosure and completely assembled, except for external connections

NOTE The external insulation may be supplied with a (semi-) conducting layer.

[IEV 441-12-06, modified]

### 3.9

#### **gas-insulated metal-enclosed switchgear**

metal-enclosed switchgear in which the insulation is obtained, at least partly, by an insulating gas other than air at atmospheric pressure

NOTE This term generally applies to high-voltage switchgear and controlgear.

[IEV 441-12-05]

**3.10****gas-filled compartment**

compartment of switchgear and controlgear in which the gas pressure is maintained by one of the following systems:

- controlled pressure system;
- closed pressure system;
- sealed pressure system.

NOTE 1 Several gas-filled compartments may be permanently interconnected to form a common gas-system (gas-tight assembly).

NOTE 2 This definition reproduces 3.6.6.1 of IEC 62271-1.

**3.11****controlled pressure system for gas**

volume which is automatically replenished from an external compressed gas supply or internal gas source

NOTE 1 Examples of controlled pressure systems are air-blast circuit-breakers or pneumatic operating mechanisms.

NOTE 2 A volume may consist of several permanently connected gas-filled compartments.

NOTE 3 This definition reproduces 3.6.6.2 of IEC 62271-1.

**3.12****closed pressure system for gas**

volume which is replenished only periodically by manual connection to an external gas source

NOTE 1 Example of closed pressure systems are SF<sub>6</sub> single pressure circuit-breakers.

NOTE 2 This definition reproduces 3.6.6.3 of IEC 62271-1.

**3.13****sealed pressure system**

volume for which no further gas or vacuum processing is required during its expected operating life

NOTE 1 Examples of sealed pressure systems are tubes of vacuum circuit-breakers or some SF<sub>6</sub> circuit-breakers.

NOTE 2 Sealed pressure systems are completely assembled and tested in the factory.

NOTE 3 This definition reproduces 3.6.6.4 of IEC 62271-1.

**3.14****technical grade sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>)**

SF<sub>6</sub> gas having a very low level of impurities in accordance with IEC 60376

**3.15****used sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>)**

gas removed from an electrical equipment, initially filled with SF<sub>6</sub> according to IEC 60376 or IEC 60480. If after filling, the gas is removed for any purpose during the life of the equipment, for example repair, service, maintenance, the gas will be transferred and is considered as used gas

NOTE Annex C provides information regarding the by-products of used SF<sub>6</sub>, which occur as gaseous and solid.

**3.16****used sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) suitable for reuse on site**

used SF<sub>6</sub> complying with the maximum acceptable impurity level in IEC 60480

NOTE If necessary, service units with appropriate filters and adsorber materials should be used.

### 3.17

#### **used sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) suitable for reuse at the gas manufacturer**

used SF<sub>6</sub> exceeding the maximum acceptable impurity level in IEC 60480, but complying with the specification for gas reuse given by the gas manufacturer

NOTE If necessary to meet the specification, service units with appropriate filters and adsorber materials should be used.

### 3.18

#### **used sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) not suitable for reuse**

gas complying with 3.15 but not complying with 3.16, and/or 3.17.

NOTE Used sulphur hexafluoride not suitable for reuse is disposed according to local or international regulations on waste management.

### 3.19

#### **non-arced sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>)**

used sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) having less than approx. 0,1 % by volume of gaseous by-products

NOTE Non-arced sulphur hexafluoride is typically expected to be in any compartment after filling and prior to energising and/or after insulation testing and/or in insulation compartments which never experienced arcing.

### 3.20

#### **normally arced sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>)**

used sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) having between approx. 0,1 % by volume and approx. 5 % by vol. of gaseous by-products

NOTE 1 Normally arced sulphur hexafluoride is typically expected to be in circuit breakers/load break switches after normal (load or fault) operations.

NOTE 2 A small amount of solid by-products, mainly metal fluorides and tungsten oxifluorides, may be present as well.

### 3.21

#### **heavily arced sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>)**

used sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) having more than approx. 5 % by vol. of gaseous by-products

NOTE 1 Heavily arced sulphur hexafluoride is typically expected to be in any gas compartments after internal arc fault and/or circuit breakers/load break switches after interruption failure and/or circuit breakers after successful interruptions of several short circuits at high amplitude in relation with its ratings.

NOTE 2 A large amount of solid by-products, mainly metal fluorides and tungsten oxifluorides, is expected as well.

## 4 Storage and transportation of SF<sub>6</sub>

Storage and transportation of SF<sub>6</sub>, either in containers or in electric power equipment is always carried out in accordance with local and international regulations.

NOTE An empty SF<sub>6</sub> container may still contain a residual amount of SF<sub>6</sub>. It should be stored and transported in the same way as for a filled container.

### 4.1 Storage of containers filled with SF<sub>6</sub>

In general, SF<sub>6</sub> can be stored in two ways either as a gas at less than 2 MPa or as a liquid up to 5 MPa. Gaseous storage has the advantage of reducing the recovery and filling times but requires large storage volumes and is therefore generally restricted to small volume equipment or used in fixed location gas handling facilities. Liquid storage gives the ability to reduce storage volumes and economically transport large quantities of SF<sub>6</sub>.

Containers are handled carefully and stored in a cool, dry, well ventilated area away from flammable or explosive material. They should be protected from direct sunlight, mounted clear of wet ground and secured to prevent falling over. Special valve protections should be adopted to avoid any potential damage on the valve itself.

Containers are refillable (non refillable containers are banned) and clearly labelled to identify their contents; containers containing technical grade SF<sub>6</sub> and used SF<sub>6</sub> suitable for reuse on site should be physically separated from those containing used SF<sub>6</sub> suitable for reuse at the gas manufacturer or used SF<sub>6</sub> not suitable for reuse.

Table 1 gives an overview of all possible storage methods on which a storage container may be based.

**Table 1 – Methods for storage of SF<sub>6</sub>**

Method	Requirements	Features
Gaseous	Typical pressure lower than 2 MPa. SF <sub>6</sub> remains in the gaseous state	Requires relatively small recovery pressure differential (typically 100:1) but needs larger storage volumes. Gas cannot be liquefied in containers for transportation. Therefore it is limited to small quantities (typically 200 kg) and stationary use
Liquid-cooling assisted	Typical pressure equal to 3 MPa. Employs additional cooling system to cool SF <sub>6</sub> after compression, which allows SF <sub>6</sub> to be stored in liquid form	Requires relatively small recovery pressure differential (typically 700:1) but needs cooling aggregate. Performance of cooling aggregate can influence processing speed. Additional maintenance requirements. Limited storage volume required and generally not suitable for transportation
Liquid-pressure only	Typical pressure equal to 5 MPa. SF <sub>6</sub> compressed to 5 MPa liquefies by pressure only	Requires recovery differential of typically 1000:1 but eliminates the need of additional aggregates. Can be used with any storage vessel rated 5 MPa or higher

When used SF<sub>6</sub> is stored on-site, the storage containers comply with local and international regulations on pressurised vessels. Container labelling should be done according to local and international regulations, as well.

NOTE International regulations are published and periodically revised by the Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods (TDG) and on the Globally Harmonized System of Classification and Labelling (GHS) of the Economic Commission for Europe of the United Nations

Table 2 gives an overview of container types and required labelling. For practical reasons it is recommended to preferentially use transportable storage containers, wherever possible.

**Table 2 – Container types and labelling required for storage and transportation of SF<sub>6</sub>**

Gas	Characteristic	Container type	Container labelling
Technical grade SF <sub>6</sub>	Liquefied inert gas	<b>Suitable for liquefied gas up to a pressure of 7 MPa.</b> NOTE The filling factor for technical grade SF <sub>6</sub> is up to 1,04 kg/l. <b>Recommendation:</b> Containers should be marked with a green label or the container should be painted green according to EN 1089-3	<b>Stencilled on container:</b> UN 1080, sulphur hexafluoride <b>Danger label 2.2</b>
Used SF <sub>6</sub> suitable for reuse on site	Liquefied inert gas	<b>Suitable for liquefied gas up to a pressure of 7 MPa.</b> NOTE Due to the inert gas content (for example N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> ), the filling factor is smaller than 0,8 kg/litre (see NOTE 1). <b>Recommendation:</b> Containers should be specially coloured to avoid confusion between used and technical grade SF <sub>6</sub> (an orange band on the upper third of the container is suggested)	<b>Stencilled on container:</b> UN 3163, sulphur hexafluoride, carbon tetrafluoride or air or nitrogen (see NOTE 2) <b>Danger label 2.2</b>
Used SF <sub>6</sub> suitable for reuse at gas manufacturer and/or used SF <sub>6</sub> not suitable for reuse	Liquefied inert gas	Container type and labelling are the same as for used SF <sub>6</sub> suitable for reuse on-site	
	Liquefied gas containing toxic gaseous by-products (see NOTE 3)	Same as for used SF <sub>6</sub> suitable for reuse on site	<b>Stencilled on container:</b> UN 3162, sulphur hexafluoride, hydrogen fluoride, thionyl fluoride (see NOTE 2) <b>Danger label 2.3</b>
	Liquefied gas containing both toxic and corrosive gaseous by-products (see NOTE 4)	<b>Special containers approved for storing and transportation of corrosive gases</b> (such as hydrofluoric acid HF) with a corrosion-proof valve and adapter	<b>Stencilled on container:</b> UN 3308, sulphur hexafluoride, hydrogen fluoride, thionyl fluoride <b>Danger labels 2.3 + 8</b>
<p>NOTE 1 The filling factor is the weight of SF<sub>6</sub> contained in the container divided by the container volume and is usually specified in kg/litre.</p> <p>NOTE 2 Only the two most abundant contaminants have to be specified.</p> <p>NOTE 3 Any used SF<sub>6</sub> containing toxic gaseous by-products can be reclaimed on site to remove the toxic gaseous by-products and allowing an easier transportation.</p> <p>NOTE 4 Any used SF<sub>6</sub> containing both toxic and corrosive gaseous by-products can be reclaimed on site to remove the toxic and corrosive gaseous by-products and allowing an easier transportation.</p>			

#### 4.2 Transportation of containers filled with SF<sub>6</sub>

International regulations for shipment of electric power equipment containing SF<sub>6</sub> and/or SF<sub>6</sub> containers are available for transportation by road (ADR), rail (RID), ship (IMDG code), and air (IATA – DGR). These are similar concerning UN numbering, classification, danger labelling, final classification, and transport documentation. However official languages differ as follows:

- ADR: German, French, English;
- RID: English,
- IMDG code: English;
- IATA – DGR: English.

The international regulations for shipment of SF<sub>6</sub> are summarised in Table 3.

**Table 3 – International regulations for shipment of SF<sub>6</sub>**

Gas	Characteristic	Class	Final classification	Transport document
Technical grade SF <sub>6</sub> (see NOTE 1)	Liquefied inert gas	2A	UN 1080 liquefied gas, n.o.s. 2.2	UN 1080 liquefied gas, n.o.s (sulphur hexafluoride) 2.2
Used SF <sub>6</sub> suitable for reuse on site	Liquefied inert gas	Transportation class and danger label are the same as for technical grade SF <sub>6</sub>	UN 3163 liquefied gas, n.o.s. 2.2	UN 3163 liquefied gas, n.o.s. (sulphur hexafluoride and air or nitrogen or carbon tetrafluoride) 2.2
Used SF <sub>6</sub> suitable for reuse at gas manufacturer and/or used SF <sub>6</sub> not suitable for reuse	Liquefied inert gas	UN number, transportation class, danger label, final classification and transport document are the same as for used SF <sub>6</sub> suitable for reuse on site		
	Liquefied toxic gas (gas containing toxic gaseous by-products) (see NOTE 2)	2T	UN 3162 liquefied toxic gas, n.o.s. 2.3	UN 3162 liquefied gas, toxic, n.o.s. (sulphur hexafluoride and hydrogen fluoride and thionyl fluoride) 2.3
	Liquefied toxic and corrosive gas (gas containing both toxic and corrosive gaseous by-products) (see NOTE 3)	2TC	UN 3308 liquefied toxic and corrosive gas, n.o.s. 2.3 + 8	UN 3308 liquefied gas, toxic, corrosive, n.o.s. (sulphur hexafluoride and hydrogen fluoride and thionyl fluoride) 2.3 + 8
<p>NOTE 1 Avoid any contamination of containers dedicated to technical grade SF<sub>6</sub></p> <p>NOTE 2 Any used SF<sub>6</sub> containing toxic gaseous by-products can be reclaimed on-site to remove the toxic gaseous by-products and allowing an easier transportation.</p> <p>NOTE 3 Any used SF<sub>6</sub> containing both toxic and corrosive gaseous by-products can be reclaimed on-site to remove the toxic and corrosive gaseous by-products and allowing an easier transportation.</p>				

### 4.3 Storage and transportation of electric power equipment containing SF<sub>6</sub>

Electric power equipments filled with SF<sub>6</sub> are stored and transported according to local and international regulations.

### 4.4 Responsibilities

The owner of the electric power equipment utilising SF<sub>6</sub> is responsible for the proper use, transportation, and disposal of the equipment and the gas. He is also responsible for record-keeping regarding SF<sub>6</sub> banked in equipment and/or stored in containers as well as emission rates on a yearly basis. This is supported by the original equipment manufacturer and the gas supplier with basic information on the manuals as per IEC 62271-1.

## 5 Safety and first aid

### 5.1 General safety rules

Before starting any maintenance/service work in electric power equipment, the detailed state/condition of the equipment should be inspected and reported in detail. In addition to the local safety regulations that are met, at least the following general safety rules should be followed:

- Switch off and isolate.

- Secure against re-closing.
- Verify that equipment is de-energised.
- Earth and short-circuit the equipment.
- Cover or fence off nearby live parts.

Written documents giving permission to work on the electric power equipment should be agreed and signed by both the owner / operator of the equipment and the service provider.

Table 4 lists the major issues to consider when working with SF<sub>6</sub> electric power equipment.

**Table 4 – Measures when working with SF<sub>6</sub> electric power equipment**

Item	Work in the vicinity of equipment (operation of equipment, visual check, room-cleaning)	Filling, recovering, evacuation of gas compartments	Opening of gas compartments, work on open compartments
Material safety data sheet/operational manuals	Not required	Applicable	Applicable
Training	Applicable (see NOTE)	Applicable	Applicable
SF <sub>6</sub> handling equipment	Not required	Applicable	Applicable
Cleaning/ neutralising equipment	Not required	Not required	Applicable
Personal protection equipment	Not required	Not required	Applicable
NOTE General information should be specified according to type of work and installation, according to local safety regulations.			

A notice stating that open fire, smoking, use of thermal engines, heating to more than 200 °C and welding without special precautions are prohibited and giving first-aid instructions (see 5.3) should be displayed while SF<sub>6</sub> is being handled in any location.

When a gas compartment is opened after the electric power equipment has been in service, in order to avoid contact with the fine solid by-products, which may be present, personnel should wear suitable protective clothing. Particular attention should be given to protecting the eyes and the respiratory tract. Personnel working in or near to opened gas compartments, which have contained normally arced and/or heavily arced SF<sub>6</sub>:

- use suitable tools and equipment;
- observe high standards of personal hygiene;
- clean themselves and their equipment using disposable materials, before leaving the work area;
- remove protective clothing and wash themselves thoroughly as soon as possible after having left the work area;
- ensure that clothing, tools and components which have been in contact with by-products are securely packed in sealed bags or other sealed containers and are subsequently treated to neutralise any residues.

### 5.1.1 Protection of personnel

SF<sub>6</sub> is handled by certified personnel, only. Different training modules may be adopted, depending on the kind of work to be performed on the electric power equipment (see Clause 6).

A specific training covering the recovering of used SF<sub>6</sub> from a gas-filled compartment is requested for personnel opening and/or entering the gas compartment. The operating instruction manual of the equipment provided by the original equipment manufacturer (OEM) should be strictly followed.

Table 5 gives an overview of the potential risks, safety precautions as well as safety equipment and tools required when opening and/or entering a gas compartment. No substantial difference between indoor and outdoor conditions is given as the operator opens and/or enters the compartment.

**Table 5 – Safety measures when opening and/or accessing gas compartments**

Item	Any compartment which contained normally or heavily arced SF <sub>6</sub>	Any compartment which contained non-arc'd SF <sub>6</sub>
Potential risk	Fumes of cleaning substances O <sub>2</sub> starvation Remaining used SF <sub>6</sub> Residual reactive gaseous by-products Solid by-products and adsorber materials	Fumes of cleaning substances O <sub>2</sub> starvation Remaining used SF <sub>6</sub> or other gas from production process
Safety precaution	Removal of solid by-products and adsorber materials Ventilation Measurement of O <sub>2</sub> concentration when entering Wear personal protective equipment Protect solid by-products against hydrolysis	Ventilation Measurement of O <sub>2</sub> concentration when entering
Safety equipment and tools	Suction ventilator or vacuum cleaner O <sub>2</sub> concentration measuring device Single use protective overalls, protective footwear, hair cap Acid proof safety gloves Full face mask (preferred) or, at least, breathing protective mask Protective goggles Environmental protection against rain and/or wind (outdoor only)	Suction ventilator or vacuum cleaner O <sub>2</sub> concentration measuring device

Like any gas but oxygen, a concentration greater than 19 % by vol. of SF<sub>6</sub> in the air is considered as potential risk of asphyxiation. This is because it reduces the oxygen concentration down to 16 % by vol., which is usually considered as the threshold for asphyxiation. As a consequence it is recommended that the oxygen content in the gas compartment be measured prior to accessing. In addition to that, the oxygen content in the ambient may be checked when working in confined spaces.

Eating, drinking and smoking are not allowed when accessing or opening a gas compartment. It is recommended that clothes should be changed and the skin washed as soon as possible after the work to prevent potential danger of irritation or burns.

**5.1.2 Handling of contaminated safety equipment and tools**

Equipment and tools, which have been in contact with solid by-products and/or adsorber materials is considered as contaminated. They are collected afterwards and placed in plastic bags. The plastic bags are sealed with tape and labelled. Disposal is done according to the local regulations.

Reusable equipment and/or tools should be washed and neutralised in a water/soda solution with 10 % by weight liquid soda or equivalent and then rinsed with clean water. Examples of neutralising solutions are given in Table 6.

Disposal of both the water/soda solution and the washing water is done according to the local regulations.

**Table 6 – Neutralising solutions**

Active agent	Formula	Concentration Kg/100 l	$T_1$ ( see NOTE 1) Hours	$T_2$ (see NOTE 2) Hours	Reference
Lime	Ca(OH) <sub>2</sub>	Saturated	Not applicable	24	[2]
Sodium carbonate (washing soda)	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1,1 3	Not applicable Wash	24 Not applicable	[3] [2]
		10 (NOTE 3)	Not applicable 1	0,25 48	[4] [5]
		10-14 (NOTE 3) 3	Not applicable	Not applicable	[6]
Sodium bicarbonate	NaHCO <sub>3</sub>	1 (NOTE 4)	Not applicable	Not applicable –	[4]

NOTE 1 Reusable safety equipment, tools, gas compartments, and internal parts of compartments which contained normally arced SF<sub>6</sub> should, where practicable, be treated with a neutralising solution for a time period  $T_1$ . They should then be rinsed with clean water.

NOTE 2 Reusable safety equipment, tools, gas compartments, and internal parts of compartments which contained heavily arced SF<sub>6</sub> should, where practicable, be treated with a neutralising solution for a time period  $T_2$ . They should then be rinsed with clean water.

NOTE 3 When using alkaline solutions at such high concentrations, care should be taken to avoid contact with the skin and eyes.

NOTE 4 Recommended for washing the skin.

### 5.1.3 Pressurised equipment and tools or measuring devices

As any pressurised gas, a sudden volume expansion results in a local temperature drop and may cause freezing. Suitable gloves and protective goggles should be worn when working on high-pressure piping, valves or connectors, during filling operations.

All equipment and tools used during SF<sub>6</sub> handling potentially contain gaseous or liquid SF<sub>6</sub> under high pressure. They should be handled with care.

### 5.1.4 Personal safety and protective equipment

The use of personal safety and protective equipment is not related to the presence of the SF<sub>6</sub> electric power equipment itself. Standard safety shoes, helmet, and protective goggles may be required according to local regulations to get in the vicinity of the switchgear.

In case of abnormal release of SF<sub>6</sub> due to external fire or internal arc fault, additional safety rules apply for entering a switchgear room, according to 5.2.

Depending on the kind of work to be performed on site and according to Table 5, workers engaged in handling SF<sub>6</sub> are provided with the following personal safety and protective equipment:

- Protective gloves: acid resistant gloves made of for example neoprene, PVC, rubber. In addition to protective gloves the use of protective creams is recommended;

- Protective goggles: chemical type industrial goggles according to local regulations (for example European Standard EN 166);
- Breathing protective mask: to be used in conjunction with protective goggles, the breathing protective mask helps to protect mouth and nose against dust and should be used in case of exposure to minor dusty areas, only;
- Full face mask: for short-term inspection and work where ventilation can be provided but where the concentration of by-products may exceed the appropriate maximum level, a face mask with changeable active charcoal filter is used according to local regulations (for example European Standards EN 140, EN 141 and EN 143 specify masks, gas filters and particle filters, respectively. Combined filters of type A2/B2/E2/K2/P3 manufactured to these standards are available and are able to provide protection against by-products including particles with a diameter greater than 1 µm);
- Single use protective overall: dust proof protective clothes to wear over normal clothes, shoe covers, hair cap. Pocket-less, hooded, non-permeable (for example bonded polypropylene) disposable industrial grade overalls having elastic ankle and wrist grips, overlapping the footwear and gloves;
- Respirator: when entering indoor applications after major leakage or internal arcing when the concentration of O<sub>2</sub> or the amount of by-products are at unsafe levels, a respirator is used according to local regulations (for example European Standard EN 136);
- O<sub>2</sub> concentration measurement device for permanent monitoring the O<sub>2</sub> content in the environment;
- Environmental protection for outdoor: temporary shelter to prevent the ingress of rain and the wind dispersing solid by-products (if any) while the gas compartment is open.
- Vacuum cleaner: a high efficiency dedicated vacuum cleaner, equipped with a filter capable of trapping particles in the range of 1 µm, and a non-metallic open-ended nozzle according to local regulations (for example a type H machine in accordance with BS 5415, Supplement No. 1, 1986).
- Suction ventilator: equipment for forced ventilation of enclosed spaces and other inaccessible areas. Such equipment might be portable or permanently installed, depending on the size of the installation.

#### **5.1.5 Facilities and services**

Where gas compartments containing used SF<sub>6</sub> have to be emptied and opened, it is desirable that adequate washing facilities for workers be available, and a supply of water for preparing cleaning solutions may be required.

#### **5.2 Additional safety measures in case of abnormal release of SF<sub>6</sub> due to external fire or internal arc fault**

General safety recommendations to adopt when working with SF<sub>6</sub> on site are given in the 5.1. The present subclause describes additional safety measures in case of abnormal release of SF<sub>6</sub> due to external fire or internal arc fault.

Under those circumstances, personnel trained on modules C1 or C2 (see 6.2.4 and 6.2.5, respectively) are allowed to enter and clean the switchgear room or to access the electric power equipment. Table 7 gives an overview of the potential risks, safety precautions as well as safety equipment and tools required.

NOTE Fire fighting crews are allowed to enter the switchgear room in the terms described in the local regulations.

**Table 7 – Additional safety measures**

Item	Abnormal release of heavily arced SF <sub>6</sub>	Abnormal release of non-arc'd or normally arced SF <sub>6</sub>
Potential risk	Fumes of cleaning substances O <sub>2</sub> starvation SF <sub>6</sub> abnormally released Residual reactive gaseous by-products Solid by-products	Fumes of cleaning substances O <sub>2</sub> starvation SF <sub>6</sub> abnormally released
Safety precaution	Removal of solid by-products Ventilation Measurement of O <sub>2</sub> concentration when entering Wear personal protective equipment	Ventilation Measurement of O <sub>2</sub> concentration when entering
Safety equipment and tools	Suction ventilator or vacuum cleaner O <sub>2</sub> concentration measuring device Single use protective clothes, shoe covers, hair cap Acid proof safety gloves Full face mask (preferred) or, at least, breathing protective mask and protective goggles	Suction ventilator or vacuum cleaner O <sub>2</sub> concentration measuring device

The same rules apply to areas below the level at which the release occurred, poorly ventilated or unventilated areas (for example cable trenches, inspection pits, drainage systems). Outdoor equipment needs standard measures for outdoor conditions to be applied (for example rain protection, wind protection). Natural ventilation is normally enough to prevent the potential risk of O<sub>2</sub> starvation.

A second person being in continuous visual and acoustical contact should be present, when entering areas which might have a low oxygen concentration.

### 5.3 First aid equipment and treatment

First aid equipments are:

- Normal industrial first-aid equipment including eyewash equipment containing a saline solution
- Means for contacting emergency services
- Guidance for medical doctors.

The application of the general safety rules (see 5.1) should minimise the likelihood of accidents. In case of an accident, first aid treatment should be applied as reported in 5.3.1 through 5.3.3.

#### 5.3.1 Irritation of the skin

In case of signs of skin irritation, the personnel are removed from the area. Contaminated clothing are removed and the affected part washed with cool running water. Medical professional advice is sought.

#### 5.3.2 Irritation of the eyes

In case of signs of eyes irritation, the personnel leave the area. Irrigation of the eye or eyes is carried out immediately and continued until a medical professional advises the patient to stop.

### 5.3.3 Breathing difficulty

Personnel should immediately leave the area to fresh air. Contaminated clothing should be removed and the patient should be covered with a blanket and kept still and under observation. Emergency medical assistance is called without delay. In case of breathing failing, artificial respiration should be given by trained and qualified personnel.

## 6 Training and certification

### 6.1 General

By the nature of the technology used for electric power equipment utilising SF<sub>6</sub>, operational safety and environmental aspects are intrinsically and tightly coupled together and therefore should be treated at the same time.

The following subclauses are focused on trainings performed to assure that operational safety requirements and environmental aspects are met concerning electric power equipment utilising SF<sub>6</sub>.

Work on electric power equipment involving gas handling (for example development, manufacturing, testing, erection, commissioning, maintenance, service, and dismantling at the end-of-life) is performed either by certified personnel or under the supervision of certified personnel. For the personnel involved, training is mandatory. Training can be done in different locations (for example special training centre of the user, in the factory or on site during erection, commissioning and maintenance of installed equipment).

Given the specific nature of the electric industry and equipments, safety and continuity of service are very important. With the exception of the general training module (module A – awareness, see 6.2.1), the scope of the training is related to a specific design (for example high-voltage life tank breaker, medium-voltage switchgear, high-voltage gas insulated switchgear) and different designs require different trainings to be certified.

NOTE The successful training completion should be checked by an “in-house” examination and recorded by certificates of competence or other written confirmation related to the training module being issued by the “in-house” training body.

In all cases, the training should be based on local regulations, operating instruction manuals of the equipment, instruments datasheets, international standards, the present technical report, and CIGRE brochures.

### 6.2 Training modules

With respect to the different pressure systems according to definitions given in 3.12 and 3.13, the individual training programme and its composition of modules should be chosen accordingly considering the fact that sealed pressure systems, by definition, do not require gas handling for maintenance during its entire operating life.

Workers handling SF<sub>6</sub> should be familiar with safety, legal and environmental aspects, the properties of the gas, the gas handling tools and equipment, and procedures to assure the continuity of service and minimise SF<sub>6</sub> emissions.

The trainings are organised in modules with the intention of satisfying the needs given by the kind of work to be performed on the electric power equipment. They are:

- Module A: Awareness
- Module B1: Maintenance not implying gas recovery
- Module B2: Installation and commissioning

- Module C1: Maintenance implying gas recovery (for example extension during the operating life included)
- Module C2: Decommissioning of electric power equipment at the end-of-life.

The modules are described in a detailed manner in the following subclauses.

### 6.2.1 Module A – Awareness

This module provides the basic level of training required and applies to all functions involved, particularly for:

- Companies' staff being entrusted by their management with the responsibility for processes and related own or third parties' personnel operating SF<sub>6</sub> filled equipment, independently from the question whether SF<sub>6</sub> handling is involved or not;
- All personnel working with SF<sub>6</sub> filled equipment, independently from the question whether SF<sub>6</sub> handling is involved or not.

No prerequisites are requested for attending the training.

NOTE All personnel working in the proximity to SF<sub>6</sub> filled equipment should be made aware according to the general safety rules given in 5.1.

The training covers the following aspects:

- Basic knowledge of relevant environmental issues (for example climate change, Kyoto Protocol, Global Warming Potential, see Annex B);
- Environmental relevance of SF<sub>6</sub> emissions and mitigation approaches [12];
- Physical, chemical and environmental characteristics of SF<sub>6</sub> (see Annex A);
- Use of SF<sub>6</sub> in electric power equipment;
- Existence of local regulations and international standards;
- Personnel safety and first aid (for example local regulations, emergency plans and instructions in case of for example asphyxiation, internal arc fault), (see Clause 5);
- Design of electric power equipment (properties and application/functionality).

### 6.2.2 Module B1 – Maintenance not implying gas recovery

This module provides the first intermediate level of training required for personnel who are requested to:

- Check the SF<sub>6</sub> quality on-site;
- Perform a SF<sub>6</sub> re-filling operation;

The certification concerning module A is requested to attend the training. In alternative to that, a combined training session covering both modules A and B1 can be arranged.

The training covers the following aspects:

- Existence of local regulations and international standards in relation to the tasks;
- SF<sub>6</sub> quality according to IEC 60376 (technical grade SF<sub>6</sub>) and IEC 60480 (SF<sub>6</sub> for re-use);
- The instruction manuals given by the Original Equipment Manufacturer in relation to the tasks;
- Personnel safety and first aid (for example safety equipment required for personal protection), (see Clause 5);
- Types of SF<sub>6</sub> filled compartments (see 3.10, 3.11, 3.12, and 3.13);
- Instruments and procedures for checking the SF<sub>6</sub> quality (see 8.2 and 11.3);

- Procedures for re-filling of closed pressure systems (see 8.1);
- Leak detection methods and repair techniques;
- Categories for SF<sub>6</sub> reclaiming and reuse (see 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, and 3.21);
- Storage and transportation of SF<sub>6</sub> (see Clause 4);
- Monitoring of SF<sub>6</sub> gas and appropriate recording of data related to local environmental obligations.

### 6.2.3 Module B2 – Installation and commissioning

This module provides the second intermediate level of training required for personnel who are requested to installing and commissioning of electric power equipment on-site.

The certification concerning module B1 is requested to attend the training. In alternative to that, a combined training session covering modules A, B1 and B2 can be arranged.

The training covers the following aspects:

- Existence of local regulations and international standards in relation to the tasks;
- The instruction manuals given by the Original Equipment Manufacturer in relation to the tasks;
- Personnel safety and first aid (for example working on open gas compartments in relation to the task) (see Clause 5);
- Procedures for air evacuation and SF<sub>6</sub> filling (see 7.1);
- Procedures for topping-up with SF<sub>6</sub> (see 7.2);
- Procedures for recovery and reclaiming of non-arced SF<sub>6</sub> (see 9.1);
- SF<sub>6</sub> handling equipments in relation to the tasks (see Clause 11).

### 6.2.4 Module C1 – Maintenance implying gas recovery

This module provides the first advanced level of training required for personnel who are requested to:

- Perform maintenance of electric power equipment utilising SF<sub>6</sub>, including gas recovery, reclaiming as well as appropriate handling of by-products;
- Provide further extension of the electric power equipment during its operating life.

The certification concerning module B1 is requested to attend the training. In alternative to that, a combined training session covering modules A, B1, and C1 can be arranged. Module B2 can be added as an option.

The training covers the following aspects:

- Existence of local regulations and international standards in relation to the tasks;
- The instruction manuals given by the original equipment manufacturer in relation to the tasks;
- Personnel safety and first aid (for example safety equipment required for personal protection, working on open gas compartments in relation to the task, neutralising and handling of by-products);
- Procedures for entering the switchgear room in case of abnormal release of SF<sub>6</sub> due to fire or internal arc fault (see 5.2);
- Procedures for recovery and reclaiming of normally and heavily arc'd SF<sub>6</sub> (see 9.1 and 9.2);
- SF<sub>6</sub> handling equipments in relation to the task (see Clause 11);

- Procedures for cleaning from by-products and neutralisation (see 5.1.2);
- Handling of safety equipment and tools which have been in contact with solid by-products (see 5.1.2).

### **6.2.5 Module C2 – Decommissioning of electric power equipment at the end-of-life**

This module provides the second advanced level of training required for personnel who are requested to decommissioning the electric power equipment at the end-of-life.

The certification concerning module C1 is requested to attend the training. In alternative to that, a combined training session covering modules A, B1, C1, and C2 can be arranged. Module B2 can be added as an option.

The training covers the following aspects:

- Existence of local regulations and international standards in relation to the tasks;
- The instruction manuals given by the original equipment manufacturer in relation to the tasks;
- Transportation of the power electric equipment to the dismantling site, if applicable (see 4.3);
- Dismantling of equipment and part sorting (see Clause 10);
- Instructions given by the original equipment manufacturer on the use of tight drilling systems for recovering SF<sub>6</sub> from the electric power equipment, if applicable.

### **6.3 Certification**

Successful completion of training leads to in-house certification, where “in-house certification”, means a certificate of competence or other written confirmation issued by an employer to such of his own employees or external persons who have satisfactorily completed a course of training, relating to relevant work. Theoretical and/or practical examination sessions are performed to prove the skill and the ability gained.

Records shall be retained so as to:

- Identify the training content;
- Identify which task and equipment design personnel have been certified for (for example SF<sub>6</sub> recovery);
- Restrict task performance (for example SF<sub>6</sub> recovery for a certain design) to the personnel who have been certified for (for example modules C1 and C2);
- Sustain a high level of expertise.

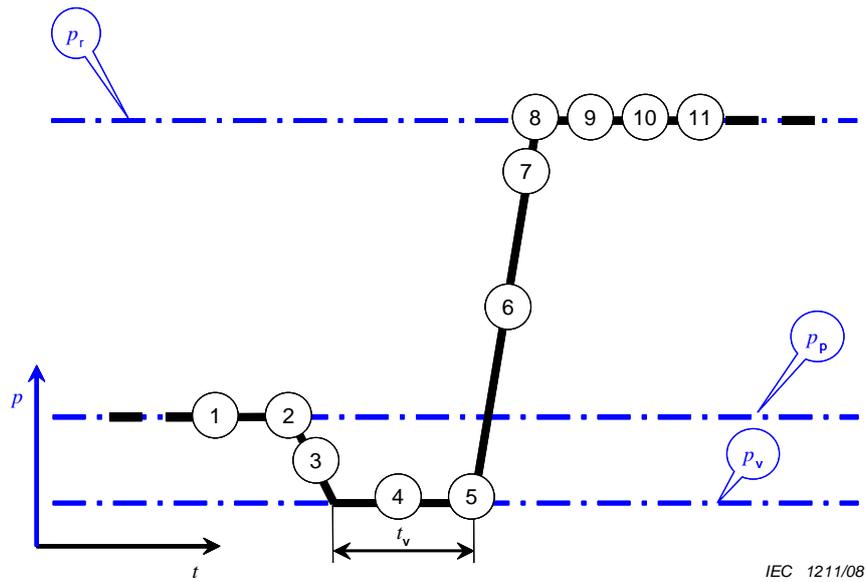
## **7 SF<sub>6</sub> handling during installation and commissioning**

This clause provides guidance for working with technical grade SF<sub>6</sub>, according to IEC 60376 or used SF<sub>6</sub> suitable for reuse on site, according to IEC 60480 i.e. when a gas compartment is filled, after the switchgear and/or controlgear has been installed on site.

### **7.1 Evacuation, filling and checking the SF<sub>6</sub> quality after filling**

This subclause applies to switchgear compartments of pressure systems that currently contain a gas different from SF<sub>6</sub> (typically air or N<sub>2</sub>) at ambient pressure or slightly overpressure (typically 0,1 MPa to 0,15 MPa).

Unless otherwise specified by the original equipment manufacturer in the operating instruction manual, the following detailed sequence of operations for air/N<sub>2</sub> evacuation and SF<sub>6</sub> filling in each compartment is performed according to Figure 1. Additional details are in Table 8.



IEC 1211/08

**Key**

- |   |  |       |   |
|---|--|-------|---|
| 1 | Prepare SF <sub>6</sub> handling equipment | 9     | Tightness inspection                    |
| 2 | Adsorber installation                      | 10    | SF <sub>6</sub> quality checking        |
| 3 | Evacuation                                 | 11    | Documentation                           |
| 4 | Residual air and/or moisture content       | $p_r$ | SF <sub>6</sub> rated filling pressure  |
| 5 | Documentation                              | $p_p$ | Initial pressure in the gas compartment |
| 6 | Filling with SF <sub>6</sub>               | $p_v$ | Evacuation pressure < 2 kPa             |
| 7 | Documentation                              | $t_v$ | Evacuation time ≥ 30 min                |
| 8 | Pressure/density sensor inspection         |       |   |

**Figure 1 – Commissioning or re-commissioning of SF<sub>6</sub> compartments**

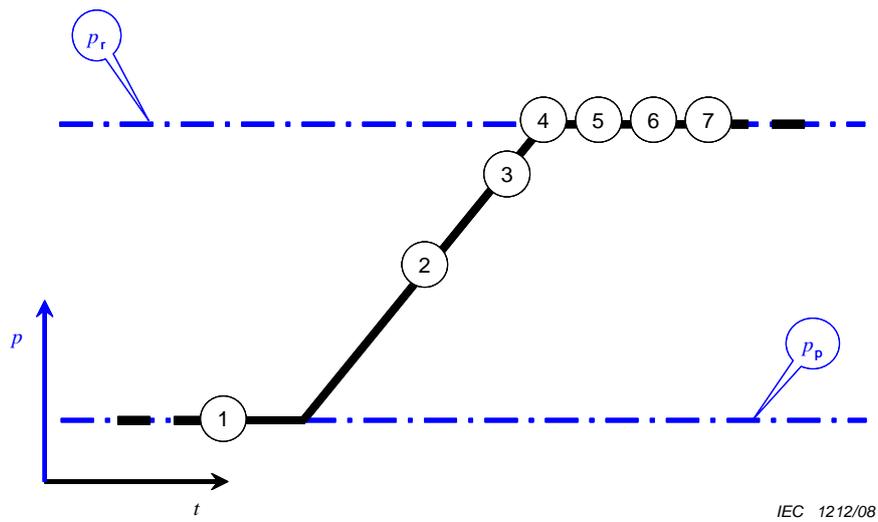
**Table 8 – Commissioning or re-commissioning of SF<sub>6</sub> compartments**

Step		Procedure
1	Prepare SF <sub>6</sub> handling equipment	Check that the SF <sub>6</sub> reclaimer is working properly and the gas connections are clean and dry to avoid contamination. Check the validity of the calibration of instruments subject to calibration.
2	Adsorber installation	Quickly insert the adsorber materials in the compartment. Start evacuation immediately afterwards.
3	Evacuation	Connect the vacuum pump and leave it running for at least 30 min. after an evacuation pressure lower than 2 kPa has been reached in the gas compartment.
4	Residual air and/or moisture content	Disconnect the vacuum pump and read the pressure gauge. The evacuation pressure should remain lower than 2 kPa.
5	Documentation	Record at least the manufacturer and serial number and/or the identification of the gas compartment, the evacuation pressure (i.e. the residual air content), ambient temperature and date for further reference.
6	Filling with SF <sub>6</sub>	Connect the SF <sub>6</sub> container and fill the compartment until the SF <sub>6</sub> rated filling pressure is reached. Use a safety valve and a calibrated gauge to avoid overfilling (see NOTES 1 and 2).
7	Documentation	Record at least the manufacturer and serial number and/or the identification of the gas compartment, the final filling pressure, ambient temperature and date for further reference.
8	Pressure/density sensor inspection	Check the functionality of the pressure/density sensor. The operation can be performed during the filling operation.
9	Tightness inspection	Check the tightness of at least all permanent connections made on site as requested by the original equipment manufacturer in the operating instruction manual.
10	SF <sub>6</sub> quality checking	Wait for the time specified by the original equipment manufacturer in the operating instruction manual before measuring the moisture content and the SF <sub>6</sub> percentage (see NOTE 3).
11	Documentation	Record at least the manufacturer and serial number and/or the identification of the gas compartment, the functionality of the pressure/density sensor, the moisture content, the SF <sub>6</sub> content, ambient temperature and date for further reference.
<p>NOTE 1 SF<sub>6</sub> to be introduced into the gas compartment should be either technical grade SF<sub>6</sub> or used SF<sub>6</sub> suitable for reuse on site.</p> <p>NOTE 2 No SF<sub>6</sub> check is required if the gas comes from the supplier in sealed containers, or if the gas is stored in sealed containers with an appropriate label or certificate to guarantee the gas is suitable for reuse. In all other cases, the SF<sub>6</sub> quality should be checked prior to the filling operation. The SF<sub>6</sub> quality check comprises moisture content, SF<sub>6</sub> percentage, and residual acidity content.</p> <p>NOTE 3 If the gas compartment has a small volume, refilling after SF<sub>6</sub> quality checking may be required.</p>		

## 7.2 Topping-up of SF<sub>6</sub> pre-filled compartments to the rated pressure/density

This subclause applies to compartments of pressure systems pre-filled in the factory prior to shipment. They contain SF<sub>6</sub> at above atmospheric pressure (typically 0,12 MPa to 0,15 MPa), allowing for a faster and easier commissioning on-site.

Unless otherwise specified by the Original Equipment Manufacturer in the operating instruction manual, the following detailed sequence of operations for SF<sub>6</sub> topping-up in each pre-filled compartment is performed according to Figure 2. Additional details are in Table 9.



**Key**

- |   |  |       |  |
|---|--|-------|--|
| 1 | Prepare SF <sub>6</sub> handling equipment | 6     | SF <sub>6</sub> quality checking                               |
| 2 | Topping-up with SF <sub>6</sub>            | 7     | Documentation  |
| 3 | Documentation                              | $p_r$ | SF <sub>6</sub> rated filling pressure                         |
| 4 | Pressure/density sensor inspection         | $p_p$ | Initial SF <sub>6</sub> pressure in the gas-filled compartment |
| 5 | Tightness inspection                       |       |  |

**Figure 2 – Topping-up of SF<sub>6</sub> pre-filled compartments to the rated pressure/density**

**Table 9 – Topping-up of SF<sub>6</sub> pre-filled compartments to the rated pressure/density**

Step		Procedure
1	Prepare SF <sub>6</sub> handling equipment	Check that the gas connections are clean and dry, hoses are evacuated and no leaks on connection fittings exist to avoid contamination. Check the validity of the calibration of instruments subject to calibration
2	Topping-up with SF <sub>6</sub>	Connect the SF <sub>6</sub> container and fill the compartment until the SF <sub>6</sub> rated filling pressure is reached. Use a safety valve and a calibrated gauge to avoid overfilling (see NOTES 1 and 2)
3	Documentation	Record at least the manufacturer and serial number and/or the identification of the gas compartment, the final filling pressure, ambient temperature and date for further reference
4	Pressure/density sensor inspection	Check the functionality of the pressure/density sensor. The operation can be performed during the filling operation
5	Tightness inspection	Check the tightness of at least all permanent connections made on site as requested by the Original Equipment Manufacturer in the operating instruction manual
6	SF <sub>6</sub> quality checking	Wait for the time specified by the Original Equipment Manufacturer in the operating instruction manual before measuring the moisture content and the SF <sub>6</sub> percentage (see NOTE 3)
7	Documentation	Record at least the manufacturer and serial number and/or the identification of the gas compartment, the functionality of the pressure/density sensor, the moisture content, the SF <sub>6</sub> content, ambient temperature and date for further reference
<p>NOTE 1 SF<sub>6</sub> to be introduced into the gas compartment should be either technical grade SF<sub>6</sub> or used SF<sub>6</sub> suitable for reuse on site.</p> <p>NOTE 2 No SF<sub>6</sub> check is required if the gas comes from the supplier in sealed containers. In all other cases, the SF<sub>6</sub> quality is checked prior to the filling operation, or if the gas is stored in sealed containers with an appropriate label or certificate to guarantee the gas is suitable for reuse. The SF<sub>6</sub> quality check comprises moisture content, SF<sub>6</sub> percentage, and residual acidity content.</p> <p>NOTE 3 If the gas compartment has a small volume, refilling after SF<sub>6</sub> quality checking may be required.</p>		

### 7.3 Filling sealed pressure systems

The large majority of medium-voltage switchgear and/or controlgear are sealed pressure systems, as defined in 3.13. Typically this type of equipment is filled with SF<sub>6</sub> in the factory and no further SF<sub>6</sub> handling is required during its expected operating life.

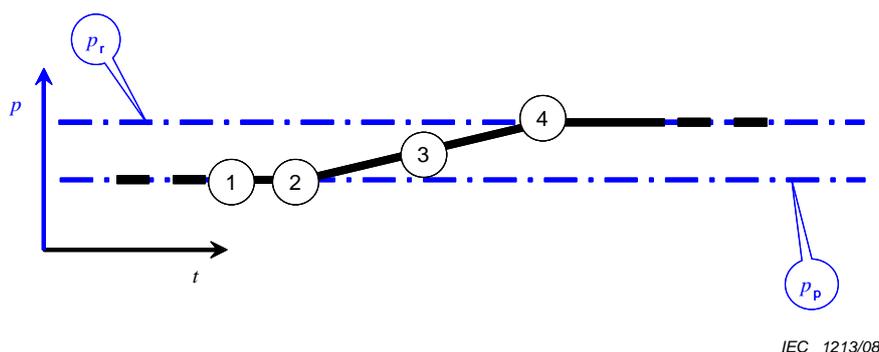
NOTE Under some abnormal circumstances (for example in case of damage) it might be required to re-fill or re-commission the equipment on-site. The original equipment manufacturer should be contacted on purpose.

## 8 SF<sub>6</sub> handling during normal service life

### 8.1 Re-filling of SF<sub>6</sub> to the nominal pressure/density

This subclause applies to compartments (usually indicated by the first alarm/indication of the pressure/density monitor) of closed pressure systems to assure continuity of service. In case of an abnormal leak, appropriate corrective measures to locate and eliminate the leak are immediately arranged.

Unless otherwise specified by the original equipment manufacturer in the operating instruction manual, the following detailed sequence of operations for SF<sub>6</sub> re-filling in each compartment is performed according to Figure 3. Additional details are in Table 10.



**Key**

- |   |  |       |  |
|---|--|-------|--|
| 1 | Identify the nature of the leak            | 4     | Documentation  |
| 2 | Prepare SF <sub>6</sub> handling equipment | $p_r$ | SF <sub>6</sub> rated filling pressure                         |
| 3 | Re-filling with SF <sub>6</sub>            | $p_p$ | Initial SF <sub>6</sub> pressure in the gas-filled compartment |

**Figure 3 – SF<sub>6</sub> re-filling to the nominal pressure/density**

**Table 10 – SF<sub>6</sub> re-filling to the nominal pressure/density**

Step		Procedure
1	Identify the nature of the leak	Check the last time the gas compartment was re-filled to understand whether the leak is abnormal
2	Prepare SF <sub>6</sub> handling equipment	Check that the gas connections are clean and dry, hoses are evacuated and no leaks on connection fittings exist to avoid contamination. Check the validity of the calibration of instruments subject to calibration
3	Re-filling with SF <sub>6</sub>	Connect the SF <sub>6</sub> container and fill in the compartment until the SF <sub>6</sub> rated filling pressure is reached. Use a safety valve and a calibrated gauge to avoid overfilling (see NOTES 1 and 2)
4	Documentation	Record at least the manufacturer and serial number and/or the identification of the gas compartment, the final filling pressure, ambient temperature and date for further reference
<p>NOTE 1 SF<sub>6</sub> to be introduced into the gas compartment is either technical grade SF<sub>6</sub> or used SF<sub>6</sub> suitable for reuse on site.</p> <p>NOTE 2 As the amount of SF<sub>6</sub> used for re-filling is very small in comparison to the amount of SF<sub>6</sub> in the related compartment, it is not necessary to perform a SF<sub>6</sub> quality check after the re-filling operation.</p>		

**8.2 Checking the SF<sub>6</sub> quality**

The measurement of the SF<sub>6</sub> quality is usually done on-site, using portable equipment. Off-site analysis may exceptionally be performed to cross-check unsatisfactory on-site results, by sampling the gas and sending it to a qualified chemical laboratory.

Typical SF<sub>6</sub> quality checks according to IEC 60480 are moisture content (for example water content in mg/kg), SF<sub>6</sub> percentage (for example air and/or CF<sub>4</sub> in % vol.), and total reactive gaseous by-products (for example total amount of reactive gasses in µl/l).

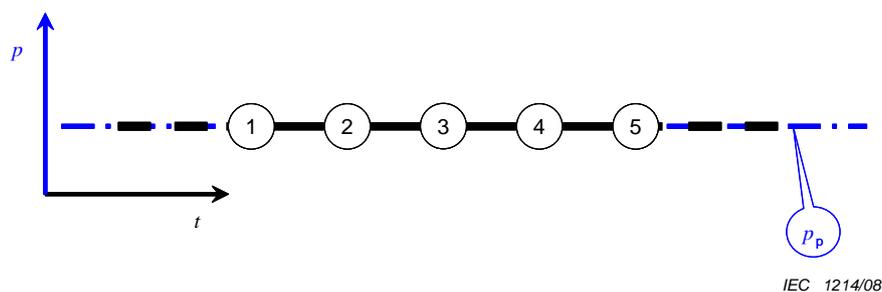
The total reactive gaseous by-products are checked first to prevent damage of other portable equipment, if the history of the gas-filled compartment is unknown or if the gas-filled compartment contains heavily arced SF<sub>6</sub>.

### 8.2.1 Measurement of the SF<sub>6</sub> quality with portable equipment

This subclause applies to SF<sub>6</sub> filled compartments of controlled and/or closed pressure systems or SF<sub>6</sub> filled containers to check the quality of the gas with portable equipment.

Unless otherwise specified by the Original Equipment Manufacturer in the operating instruction manual, the following detailed sequence of operations for an on-site SF<sub>6</sub> quality check is performed according to Figure 4. Additional details are in Table 11.

Characteristics of portable equipments are described in Clause 11.



#### Key

1	Prepare portable equipment	4	Disconnect the portable equipment
2	Connect the portable equipment	5	Documentation
3	Read the portable equipment	$p_p$	SF <sub>6</sub> pressure in the gas-filled compartment

**Figure 4 – Checking the SF<sub>6</sub> quality on-site**

**Table 11 – Checking the SF<sub>6</sub> quality on-site**

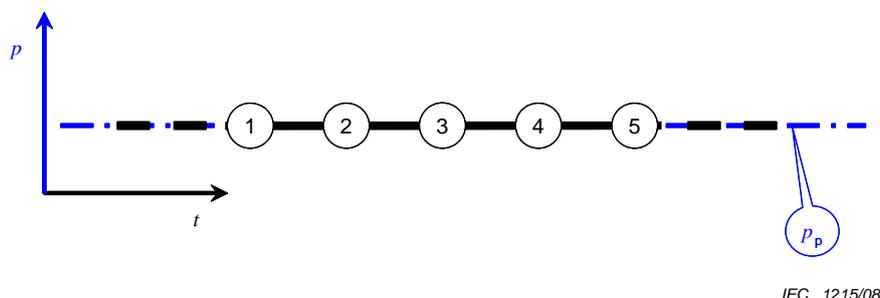
Step		Procedure
1	Prepare portable equipment	Check that the portable equipment is working properly; and the gas connections are clean and dry, hoses are evacuated and no leaks on connection fittings exist to avoid any false measurements. Check the validity of the calibration of instruments subject to calibration. Use short connections to minimise SF <sub>6</sub> release
2	Connect the portable equipment	Connect the portable equipment. Make tight connections and establish gas flow
3	Read the portable equipment	Refer to the operating instruction manual provided by the portable equipment manufacturer
4	Disconnect the portable equipment	Stop the gas flow and disconnect the portable equipment (see NOTE)
5	Documentation	Record at least the manufacturer and serial number and/or the identification of the gas compartment, the reading and the date for further reference
NOTE If the gas compartment has a small volume, refilling after SF <sub>6</sub> quality checking may be required.		

### 8.2.2 Sampling and shipment of SF<sub>6</sub> for off-site analysis

This subclause applies to SF<sub>6</sub> filled compartments of controlled and/or closed pressure systems or SF<sub>6</sub> filled containers to cross-check unsatisfactory SF<sub>6</sub> quality measurements on-site.

Unless otherwise specified by the Original Equipment Manufacturer in the operating instruction manual, the following detailed sequence of operations for SF<sub>6</sub> sampling and shipment is performed according to Figure 5. Additional details are in Table 12.

Characteristics of cylinders for SF<sub>6</sub> samples are described in 11.4.



IEC 1215/08

**Key**

- |   |  |       |  |
|---|--|-------|--|
| 1 | Prepare SF <sub>6</sub> sampling equipment | 4     | Disconnect the sampling cylinder                       |
| 2 | Documentation                              | 5     | Shipment   |
| 3 | Connect the sampling cylinder              | $p_p$ | SF <sub>6</sub> pressure in the gas-filled compartment |

**Figure 5 – SF<sub>6</sub> sampling and shipment**

**Table 12 – SF<sub>6</sub> sampling and shipment**

Step		Procedure
1	Prepare SF <sub>6</sub> sampling equipment	Evacuate the sampling cylinder (see NOTE 1). Check that the gas connections are clean and dry, hoses are evacuated and no leaks on connection fittings exist to avoid contamination of the sample and use short connections to minimise SF <sub>6</sub> release
2	Documentation	Tag the sampling cylinder with at least the following information: the manufacturer and serial number and/or the identification of the gas compartment, date, pressure, and ambient temperature
3	Connect the sampling cylinder	Connect the sampling cylinder. Make tight connections and establish gas flow
4	Disconnect the sampling cylinder	Stop gas flow and disconnect the sampling cylinder (see NOTE 2)
5	Shipment	Transportation to the laboratory is done in accordance to local and international regulations, as described in 4.2
NOTE 1 For sampling cylinders, see 11.4.		
NOTE 2 If the gas compartment has a small volume, refilling after SF <sub>6</sub> quality checking may be required.		

**9 SF<sub>6</sub> recovering and reclaiming during maintenance**

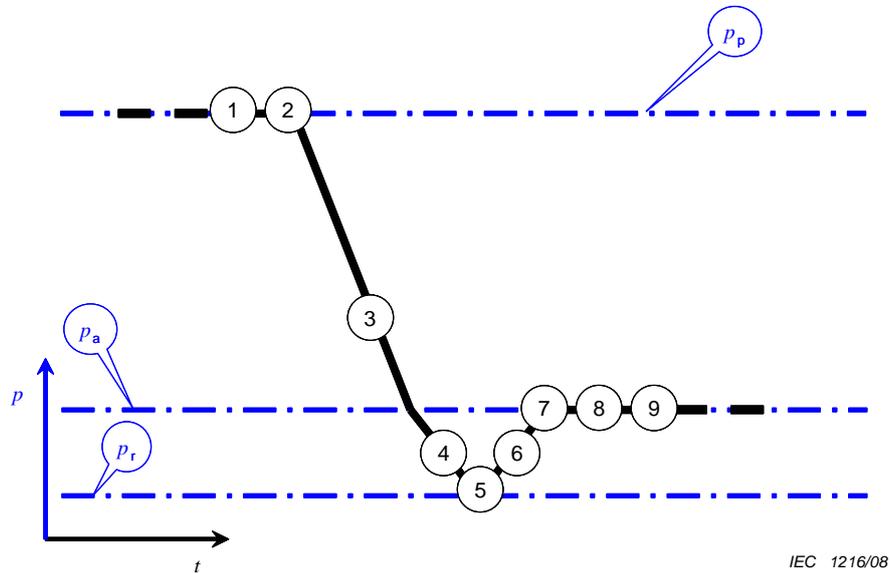
The clause contains the procedures for recovering and reclaiming SF<sub>6</sub> from any gas-filled compartment during maintenance.

**9.1 Recovery and reclaiming of SF<sub>6</sub> from any compartment of controlled and/or closed pressure systems containing non-arced and/or normally arcad SF<sub>6</sub>**

This subclause applies to any compartment of controlled and/or closed pressure systems containing non-arced and/or normally arcad SF<sub>6</sub>, when it is recovered for maintenance.

Unless otherwise specified by the original equipment manufacturer in the operating instruction manual, the following detailed sequence of operations for SF<sub>6</sub> recovery from each compartment are performed according to Figure 6. Additional details are in Table 13.

The safety rules given in 5.1 are strictly followed.



#### Key

1	Prepare SF <sub>6</sub> handling equipment	7	Open the gas compartment
2	Connect filters	8	Remove solid by-products and adsorbers when present
3	SF <sub>6</sub> recovery	9	Neutralisation, if required
4	Minimise residual SF <sub>6</sub> content	$p_p$	SF <sub>6</sub> pressure in the gas-filled compartment
5	Documentation	$p_a$	Atmospheric pressure
6	Flooding with air	$p_r$	SF <sub>6</sub> residual pressure < 2 kPa

**Figure 6 – Recovering and reclaiming from any compartment of controlled and/or closed pressure systems containing non-arced and/or normally arcad SF<sub>6</sub>**

**Table 13 – Recovering and reclaiming from any compartment of controlled and/or closed pressure systems containing non-arced and/or normally arced SF<sub>6</sub>**

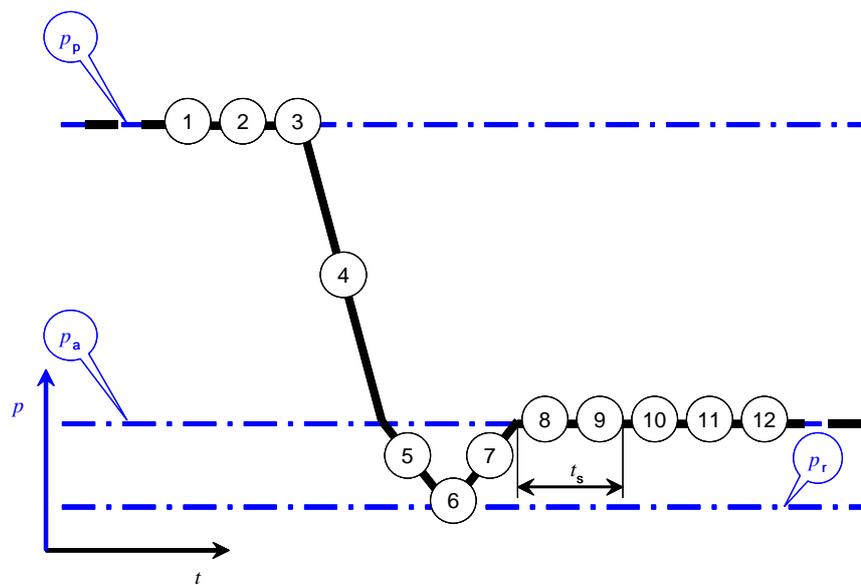
Step		Procedure
1	Prepare SF <sub>6</sub> handling equipment	Check that the SF <sub>6</sub> reclaimer is properly working, the filters and pre-filters are still active, and the gas connections are clean and dry, hoses are evacuated and no leaks on connection fittings exist to avoid contamination. Check the validity of the calibration of instruments subject to calibration
2	Connect filters	Connect the pre-filter between the gas-filled compartment and the compressor and the filter between the compressor and the storage container
3	SF <sub>6</sub> recovery	Connect the gas-filled compartment. Use the main compressor stage as soon as the SF <sub>6</sub> residual pressure in the compartment approaches the pressure in the storage container. Use a safety valve and a calibrated gauge to avoid overfilling of the storage container (see NOTE)
4	Minimise residual SF <sub>6</sub> content	Connect the auxiliary compressor stage when the SF <sub>6</sub> residual pressure in the compartment approaches 100 kPa and leave it running until a pressure lower than 2 kPa is reached
5	Documentation	Record at least the manufacturer and serial number and/or the identification of the gas compartment, the reading and the date for further reference
6	Flooding with air	Disconnect the compressor and let the air enter slowly into the gas compartment.
7	Open the gas compartment	Carefully open the gas compartment. Apply safety rules according to 5.1
8	Remove solid by-products and adsorbers when present	Immediately use vacuum cleaner or wipe with a clean lint free rag to collect the solid by-products, if present. Place adsorber materials in a plastic bag. Seal the plastic bag with tape and tag it
9	Neutralisation, if required	If solid by-products were collected, use 10 % by weight soda solution or equivalent to wash and neutralise all parts and then wash with clean water, according to Table 6
<p>NOTE In the case of liquid storage the weight of the storage container is controlled in order to avoid overfilling. The filling factor is smaller than 0,8 kg/l for safety reasons.</p>		

**9.2 Recovery and reclaiming from any compartment of controlled and/or closed pressure systems containing heavily arced SF<sub>6</sub>**

This subclause applies to any compartment of controlled and/or closed pressure systems containing heavily SF<sub>6</sub>, when it is recovered for maintenance.

Unless otherwise specified by the original equipment manufacturer in the operating instruction manual, the following detailed sequence of operations for SF<sub>6</sub> recovery from each compartment is performed according to Figure 7. Additional details are in Table 14.

The safety rules given in Clause 5 are strictly followed.



IEC 1217/08

**Key**

1	Prepare SF <sub>6</sub> handling equipment	9	Open the gas compartment
2	Connect filters	10	Remove solid by-products, adsorber materials and removable parts
3	Connect additional pre-filter	11	Neutralisation
4	SF <sub>6</sub> recovery	12	Documentation
5	Minimise residual SF <sub>6</sub> content	$p_p$	Initial SF <sub>6</sub> pressure in the gas-filled compartment
6	Documentation	$p_a$	Atmospheric pressure
7	Flooding with air	$p_r$	SF <sub>6</sub> residual pressure < 2 kPa
8	Settling down of solid by-products	$t_s$	Settling down time ≥ 1 h

**Figure 7 – Recovering and reclaiming from any compartment of controlled and/or closed pressure systems containing heavily arced SF<sub>6</sub>**

**Table 14 – Recovering and reclaiming from any compartment of controlled and/or closed pressure systems containing heavily arced SF<sub>6</sub>**

Step		Procedure
1	Prepare SF <sub>6</sub> handling equipment	Check that the SF <sub>6</sub> reclaiming is properly working, the filters and pre-filters are still active and the gas connections are clean and dry, hoses are evacuated and no leaks on connection fittings exist to avoid contamination. Check the validity of the calibration of instruments subject to calibration
2	Connect filters	Connect the pre-filter between the gas-filled compartment and the compressor and the filter between the compressor and the storage container
3	Connect additional pre-filter	Connect an additional pre-filter at the inlet of the SF <sub>6</sub> reclaiming
4	SF <sub>6</sub> recovery	Connect the gas-filled compartment. Use the main compressor stage as soon as the SF <sub>6</sub> residual pressure in the compartment approaches the pressure in the storage container. Use a safety valve and a calibrated gauge. Use an external storage container and avoid its overfilling (see NOTE 1)
5	Minimise residual SF <sub>6</sub> content	Connect the auxiliary compressor stage when the SF <sub>6</sub> residual pressure in the compartment approaches 100 kPa and leave it running until a pressure lower than 2 kPa is reached
6	Documentation	Record at least the manufacturer and serial number and/or the identification of the gas compartment, the reading and the date for further reference
7	Flooding with air	Disconnect the compressor and let the air enter slowly into the gas compartment
8	Settling down of solid by-products	Wait at least for 1 h to give enough time the remaining solid by-products to settle down in the gas compartment
9	Open the gas compartment	Carefully open the gas compartment. Apply safety rules according to Clause 5
10	Remove solid by-products, adsorber materials and removable parts	Immediately use a vacuum cleaner to collect the solid by-products. Place adsorber materials and removable parts in plastic bags. Seal plastic bags with tape and tag them
11	Neutralisation	Use 10 % by weight soda solution or equivalent to wash and neutralise all parts and then wash with clean water, according to Table 6
12	Documentation	Record all relevant information concerning the internal fault. Include some pictures
<p>NOTE 1 In the case of liquid storage the weight of the storage container is controlled in order to avoid overfilling. The filling factor is smaller than 0,8 kg/l for safety reasons.</p> <p>NOTE 2 In case the gas compartment is open to the atmosphere, the procedure should be followed starting from step 9.</p>		

## 10 Dismantling of SF<sub>6</sub> electric power equipment at the end-of-life

This clause covers the different phases when electric power equipment is dismantled at the end-of-life. From the environmental point of view, this is an important stage in the life cycle of a product.

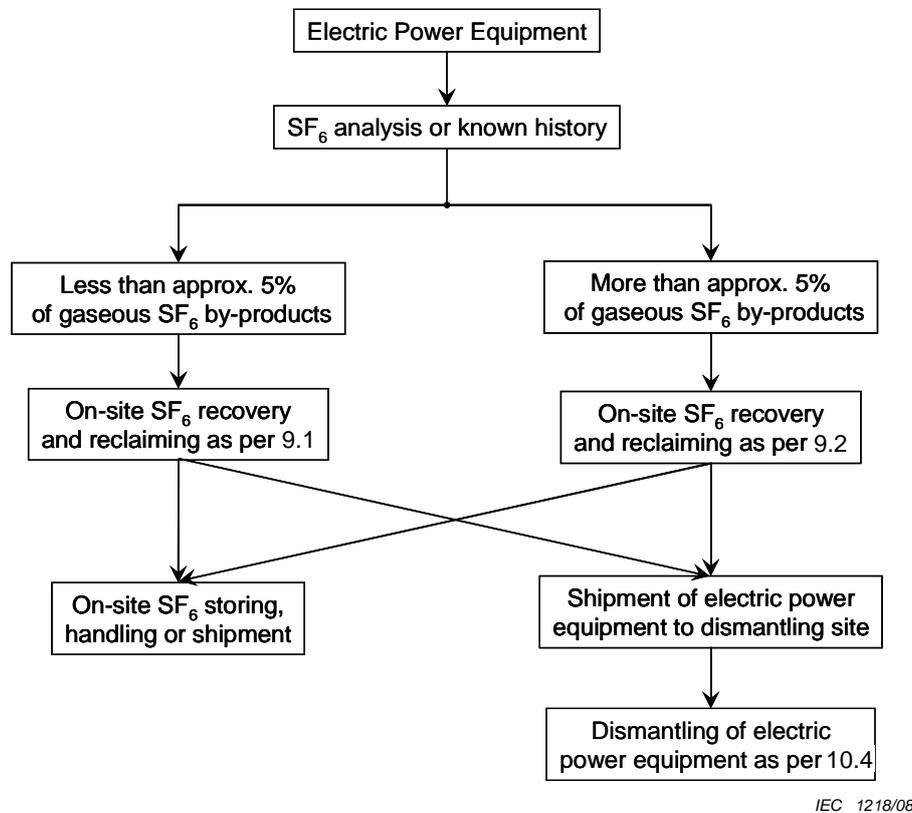
End-of-life dismantling is performed according to local regulations under the owner/operator's responsibility and supported by the original equipment manufacturer as his knowledge and experience are essential. Third parties, such as qualified service companies, may also carry out end-of-life dismantling. End-of-life of electric power equipment is considered at the designing stage of state-of-the-art equipment.

NOTE The procedures described in this clause may be also applicable at maintenance and overhaul.

Dismantling of electric power equipment and related treatment of used SF<sub>6</sub>, gas compartments, powders, adsorber materials and effluents are conducted with due regard to personnel and environmental safety, as described in Clause 5.

### 10.1 End-of-life of controlled and/or closed pressure systems

Figure 8 describes the typical procedure to follow during end-of-life of controlled and/or closed pressure systems.

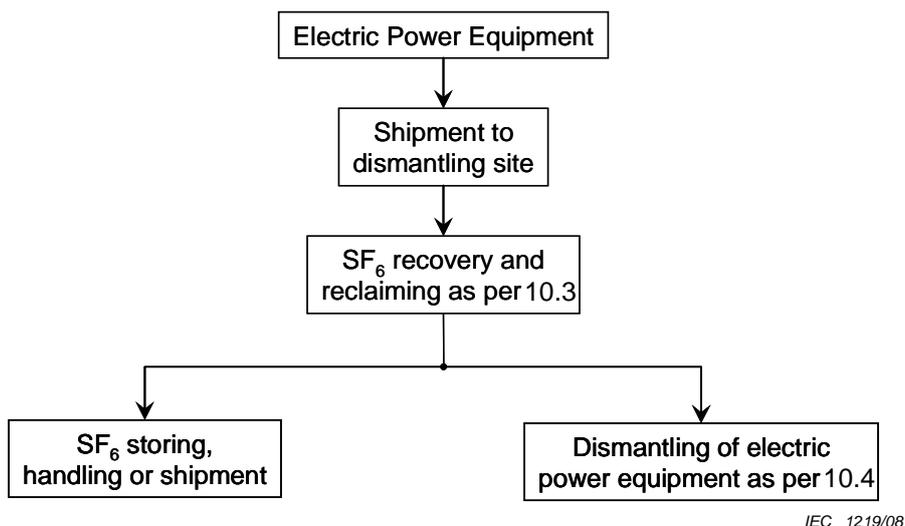


**Figure 8 – End-of-life of controlled and/or closed pressure systems**

If the past history of a gas-filled compartment is unknown, the gas is analysed and handled in safe conditions according to Clause 9. Once SF<sub>6</sub> has been recovered and reclaimed, it can be either reused on-site, or stored or transported off-site for further reuse, according to Clause 4. The electric power equipment can be either dismantled on-site or shipped to a dismantling site.

### 10.2 End-of-life of sealed pressure systems

Sealed pressure systems are typically shipped to the dismantling site as shown in Figure 9. If requested, SF<sub>6</sub> recovery and further dismantling could be performed on-site. The procedure for SF<sub>6</sub> recovery remains the same and is reported in 10.3.



**Figure 9 – End-of-life of sealed pressure systems**

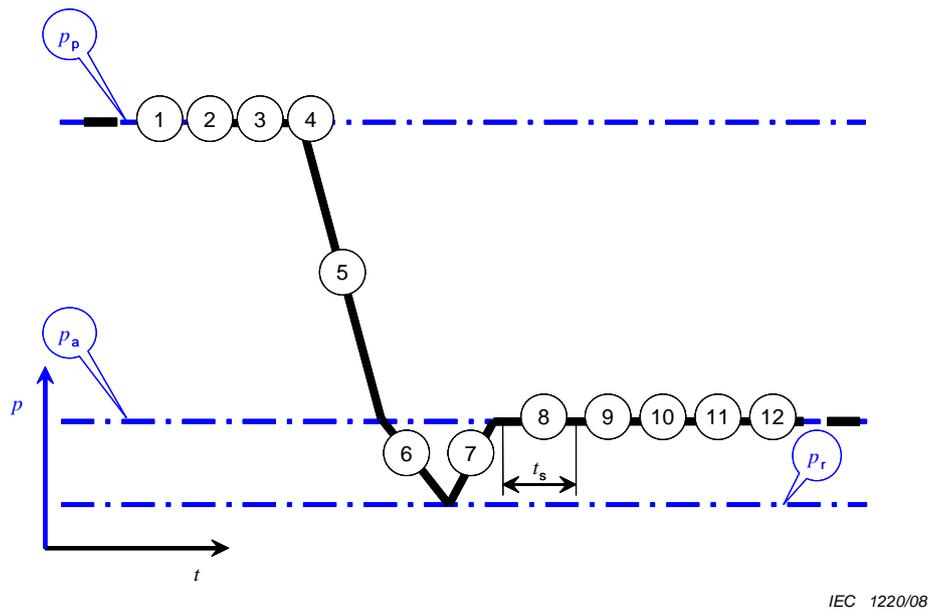
Sealed pressure systems should be shipped to the dismantling site before removal of SF<sub>6</sub>, this operation being typically conducted by service companies. These companies implement the necessary handling and storage means to avoid any shocks that may crack or break the enclosure, in particular resin-based enclosures. Experience shows that the risk of the SF<sub>6</sub> being dispersed in the environment during handling and transportation is extremely low, if the transportation instructions issued by the original equipment manufacturer are followed.

**10.3 Recovery and reclaiming of SF<sub>6</sub> at the end-of-life of sealed pressure systems**

SF<sub>6</sub> recovery and reclaiming at the end-of-life of any sealed pressure systems should be performed at the dismantling site. When sealed pressure systems are fitted with connecting facilities, dedicated tools according to manufacturer instructions should be used for the SF<sub>6</sub> recovery. If not, then tight drilling systems should be used.

Unless otherwise specified by the original equipment manufacturer in the operating instruction manual, the following detailed sequence of operations for SF<sub>6</sub> recovery and reclaiming at the end-of-life of the sealed pressure system is performed according to Figure 10. Additional details are in Table 15.

The safety rules given in Clause 5 are strictly followed.

**Key**

- |   |   |       |   |
|---|---|-------|---|
| 1 | Prepare SF <sub>6</sub> handling equipment      | 9     | Open the gas compartment  |
| 2 | Connect filters                                 | 10    | Remove solid by-products, removable parts, and adsorbers when present |
| 3 | Connect additional pre-filter, if required      | 11    | Neutralisation, if required   |
| 4 | Connect SF <sub>6</sub> compartment             | 12    | Documentation   |
| 5 | SF <sub>6</sub> recovery                        | $p_p$ | Initial SF <sub>6</sub> pressure in the gas-filled compartment        |
| 6 | Minimise residual SF <sub>6</sub> content       | $p_a$ | Atmospheric pressure  |
| 7 | Flooding with air                               | $p_r$ | SF <sub>6</sub> residual pressure < 2 kPa                             |
| 8 | Settling down of solid by-products, if required | $t_s$ | Settling down time $\geq 1$ h, if required                            |

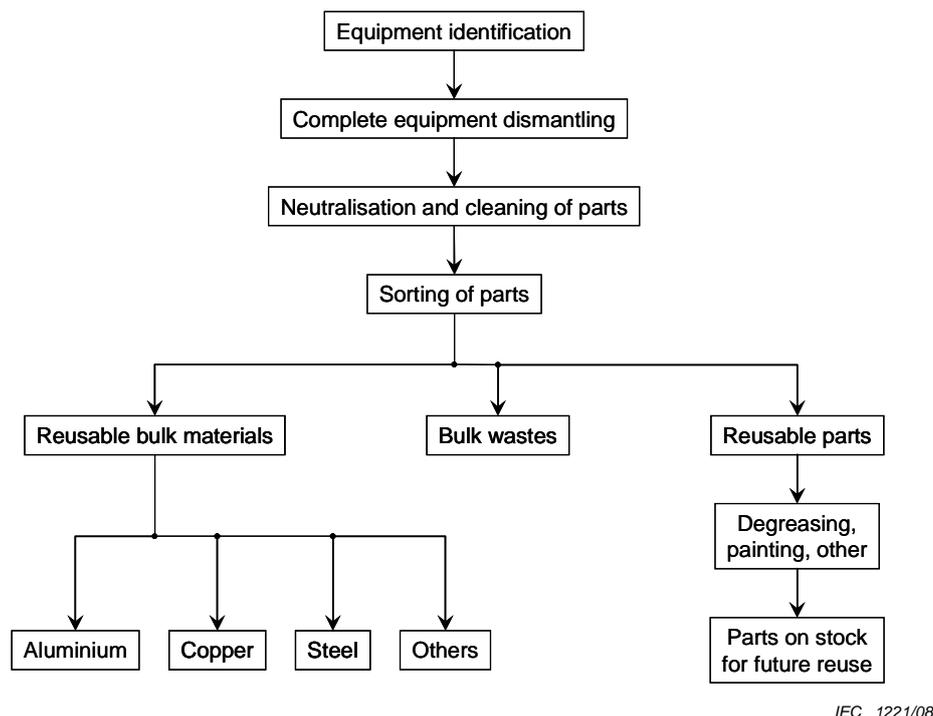
**Figure 10 – SF<sub>6</sub> recovery and reclaiming at the end-of-life of sealed pressure systems**

**Table 15 – SF<sub>6</sub> recovery at the end-of-life of sealed pressure systems**

Step		Procedure
1	Prepare SF <sub>6</sub> handling equipment	Check that the SF <sub>6</sub> reclaiming system is working properly, the filters and pre-filters are still active and the gas connections are clean and dry, hoses are evacuated and no leaks on connection fittings exist to avoid contamination. Check the validity of the calibration of instruments subject to calibration
2	Connect filters	Connect the pre-filter between the gas-filled compartment and the compressor and the filter between the compressor and the storage container
3	Connect additional pre-filter, if required	Connect an additional pre-filter at the inlet of the SF <sub>6</sub> reclaiming system
4	Connect SF <sub>6</sub> compartment	Use dedicated tools and follow the instructions of the original equipment manufacturer to connect the SF <sub>6</sub> compartment. In other cases, tight drilling systems are used
5	SF <sub>6</sub> recovery	Use the main compressor stage to transfer the gas to the storage container. Use a safety valve and a calibrated gauge. Use an appropriate external storage container and avoid its overfilling (see NOTE)
6	Minimise residual SF <sub>6</sub> content	Connect the auxiliary compressor stage and leave it running until a pressure lower than 2 kPa is reached
7	Flooding with air	Disconnect the compressor and let the air enter slowly into the gas compartment
8	Settling down of solid by-products, if required.	Wait at least for 1 h to give enough time the remaining solid by-products to settle down in the gas compartment
9	Open the gas compartment	Carefully open the gas compartment. Apply safety rules according to Clause 5
10	Remove solid by-products, removable parts, and adsorbents when present	Immediately use vacuum cleaner or wipe with a clean lint free rag to collect the solid by-products, if present. Place adsorbents and removable parts in a plastic bag. Seal the plastic bags with tape and tag them
11	Neutralisation, if required	If solid by-products were collected, use 10 % by weight soda solution or equivalent to wash and neutralise all parts and then wash with clean water, according to Table 6
12	Documentation	Record at least the manufacturer and serial number and/or the identification of the equipment, the date of dismantling and the quantity of SF <sub>6</sub> recovered in kg
<p>NOTE In the case of liquid storage the weight of the storage container is controlled in order to avoid overfilling. The filling factor is smaller than 0,8 kg/l for safety reasons.</p>		

#### 10.4 Dismantling of electric power equipment at the end-of-life

Figure 11 describes the typical procedure for the dismantling of electric power equipment at the end-of-life.



**Figure 11 – Dismantling of electric power equipment**

The first operation consists in identifying every assembly or sub-assembly coming to the dismantling site. An identification sheet is required with all information necessary for the product.

Gas compartments and internal parts may contain solid by-products, which are neutralised and cleaned so that they can be handled, recycled, or disposed of according to local regulation or international standards. Procedures for neutralisation and cleaning are simple to apply and require only readily available materials, as given in Table 6.

For the dismantling phase, operators should know the products. Tools and drawings should be available.

A typical item of electric power equipment is made up of the following approximate relative quantities of material by weight:

- Metals, ferrous and non-ferrous: 75 % to 90 %
- Dielectric materials: 10 % to 25 %.

Where SF<sub>6</sub> is present, it constitutes only a very small part of the total weight and its presence adds little to the effort required to prepare the equipment for recovery, reuse or disposal. Most of the weight of the dielectric material is provided by solid insulation (for example cast resin, plastics, ceramics). The major part of the reclaimable value is in the metals.

### 10.5 By-products at the end-of-life

The quantity of by-products within an item of electric power equipment depends on the cumulative arc energy in relation to the amount of SF<sub>6</sub>, which has been supplied to it and on the type and quantity of adsorbers. This depends on the function and service history of the equipment in question. A load-break switch is likely to contain much smaller quantities of by-products than a high breaking-capacity circuit-breaker with a history of frequent fault clearances.

Practical examples of calculation of the amount of by-products are given in Annex D. In the large majority of cases, the degree of decomposition, even in circuit-breakers, is low.

The reasons for that are:

- On average, very few high-current interruptions are performed in service.
- Adsorber materials are fitted in gas compartments.

Expected SF<sub>6</sub> characteristics and quantity of by-products for various types of electric power equipment are given in Table 16.

**Table 16 – Expected SF<sub>6</sub> characteristics and quantity of by-products**

Design	SF <sub>6</sub> characteristics	Expected quantity of by-products
GIS busbars, cable box, vacuum breaker compartment (SF <sub>6</sub> as insulation medium), ...	Non arced SF <sub>6</sub>	From zero to a few tenths of a percent by volume
GIS earthing switch and disconnecter	Normally arced SF <sub>6</sub>	Light powder deposit
Medium-voltage load-break switch and ring main unit		Light powder deposit
Medium-voltage and high-voltage circuit-breaker		Up to a few percent by volume, light powder deposits
Any gas-filled compartment after an internal arcing fault	Heavily arced SF <sub>6</sub>	Could exceed 5 % by volume, medium to heavy powder deposits

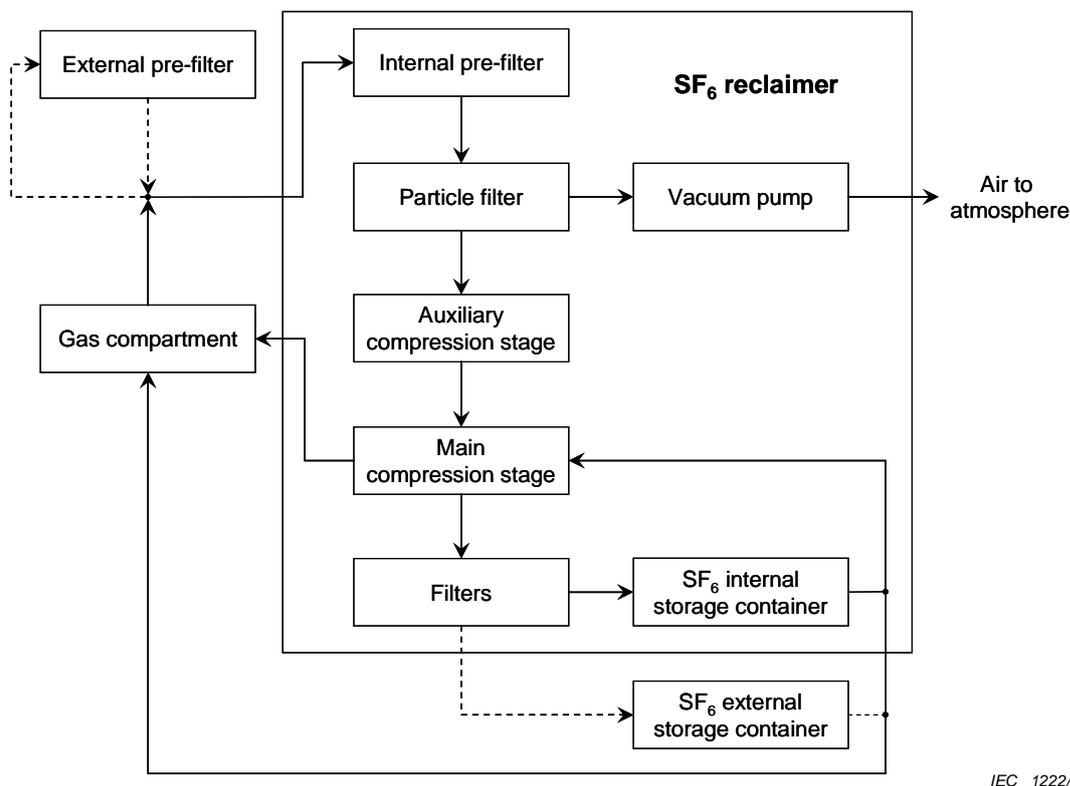
## 11 Description of SF<sub>6</sub> handling equipment

This clause gives guidelines for the specifications, minimum functionality and performance criteria for SF<sub>6</sub> handling equipment and specific components.

### 11.1 Reclaimer

The appropriate type and size of the reclaimer should be chosen according to the SF<sub>6</sub> quantity to be handled. Figure 12 shows the basic functional scheme of a general purpose reclaimer. The typical functions of a standard reclaimer are as follows:

- Evacuation of air from the gas compartment
- Filling of SF<sub>6</sub> in the gas compartment
- Recovery of SF<sub>6</sub> from the gas-filled compartment
- Storage and filtering of SF<sub>6</sub>
- Flooding of the gas compartment with ambient air.



IEC 1222/08

**Figure 12 – General purpose reclaimer**

### 11.1.1 External and internal pre-filters

A pre-filter, either external or internal, is required to recover used SF<sub>6</sub>. The reactive gaseous by-products are acid compounds and could damage the reclaimer or the gas storage container. The requirements of the pre-filtering unit are basically the same as those of the filtering units installed in the general purpose reclaimer, but the pre-filtering capacity could be considerably higher.

Recommended major characteristics are:

- Pore size lower than 10 μm (low through-flow resistance)
- Residual moisture lower than 200 ppmv
- Residual reactive gaseous by-products lower than 200 ppmv.

### 11.1.2 Filters

Filters are required to remove the reactive gaseous by-products before they are stored – hence allowing for the reuse of SF<sub>6</sub>. These filters are installed in the reclaimer.

Table 17 shows typical filter types used during SF<sub>6</sub> reclaiming.

**Table 17 – Typical filter types used during SF<sub>6</sub> reclaiming**

Filter Type	Tasks	Major characteristics
Particle filter	Removes solid by-products and other particles at the reclaimer inlet	Pore size lower than 1 µm
Dry filter	Removes reactive gaseous by-products and moisture	Residual moisture lower than 100 ppmv Residual SO <sub>2</sub> +SOF <sub>2</sub> lower than 12 ppmv Particle retention ability
Oil filter	Removes oil when required	Special filter utilising active charcoal

#### 11.1.2.1 Particle filter

Some by-products, which are generated during switching operations, are made up of fine solid particles (for example metal particles, solid by-products). The inner side of the particle filter consists of paper or suitable bonded fabric able to retain the particles in a range higher than 1 µm. Normally, the particle filter is installed at the inlet and upstream from the outlet of the reclaimer to protect parts of the reclaimer as well as the gas storage container.

#### 11.1.2.2 Dry filter

Appropriate filters can adsorb moisture and reactive gaseous by-products. They are mainly used in combination with the particle filter. Molecular sieves with a pore size smaller than 0,5 nm are used. In case of a bigger pore size is used, under certain conditions, thermodynamic exothermal reactions can occur resulting in severe filter overheating.

Soda lime (NaCO<sub>3</sub>) should not be used as a filter material for SF<sub>6</sub> as, upon contact with certain reactive gaseous by-products, produces CO<sub>2</sub>, which is difficult to remove from SF<sub>6</sub>.

#### 11.1.2.3 Oil filter

An oil trap should be inserted in the SF<sub>6</sub> cycle if an oil-lubricated machine is used or if an oil-insulated electric component is included in the electric power equipment utilising SF<sub>6</sub>. The oil removal is achieved in several steps to avoid diffusion of the oil.

NOTE In order to minimize the risk of oil contamination, the use of oil-lubricated equipment is not recommended. Experience has shown that the maintenance and ineffectiveness of the oil separating filters on such equipment make the risk of oil contamination unacceptably high.

#### 11.1.3 Vacuum pump

The vacuum pump is used to evacuate the gas compartment/container/sample cylinders from gases different from SF<sub>6</sub>, typically air or N<sub>2</sub> to avoid SF<sub>6</sub> to be mixed with other gases.

The residual pressure at the inlet of the vacuum pump should be lower than 100 Pa. In order to speed up evacuation of gas compartments, the use of vacuum pumps with a residual pressure at the inlet lower than 10 Pa is recommended.

The vacuum pump is equipped with a vacuum pressure gauge. The resolution of the vacuum pressure gauge should be at least lower than 1 kPa (recommended value is lower than 10 Pa). Vacuum gauges independent of the gas type are generally recommended. Thermal vacuum sensors are dependent on the gas type and are not recommended as they react with SF<sub>6</sub> – vapours in different ways giving a false vacuum reading.

A valve is recommended to shut off the connection between the gas compartment and the vacuum pump. The valve should close at least manually (automatically is recommended) after having turned off the vacuum pump to avoid oil diffusion into the gas compartment.

The capacity of the vacuum pump should be suitable for the volume of the gas compartment and the evacuation time. The connecting diameter is also of great importance. For a gas compartment with a volume of 1 000 l, a connecting diameter of 20 mm or  $\frac{3}{4}$  inch is recommended. If smaller diameters are used, the evacuation process is considerably extended and the use of a vacuum pump with a higher capacity is not useful.

#### 11.1.4 Main and auxiliary compressors

When the SF<sub>6</sub> pressure in the gas-filled compartment is higher than the pressure in the storage container, it is quicker to allow direct gas expansion. In all other cases, a compressor is required to recover the gas. As the pressure in the gas-filled compartment may vary within a very wide range, a dual compressor system should be used:

- The main compression, usually employing a piston type compressor, which operates between a gas inlet pressure about 100 kPa (typically higher than 50 kPa) and the pressure in the gas storage container.
- The auxiliary compression, connected in series when needed, operates between the pressure in the gas-filled compartment and the pressure at the inlet of the main compressor.

NOTE 1 Almost all kinds of piston type compressors can be used, however those which are dry-running and hermetically sealed are preferred to reduce the possibility of SF<sub>6</sub> leaks and oil contamination. State-of-the-art compressors can achieve 100 Pa pressure at the inlet.

NOTE 2 A 2,5 MPa rated outlet pressure of the compressor is sufficient to store SF<sub>6</sub> in a gaseous form (5 MPa pressure is recommended). An additional cooling device may be used to speed up SF<sub>6</sub> recovery.

#### 11.1.5 External and internal gas storage containers

Commercial pressure vessels or special storage containers for used SF<sub>6</sub> are available as gas storage containers. They are mobile, stationary or installed in the reclaimer. Only specially approved containers for storage and/or transportation of used SF<sub>6</sub> are allowed. The maximum pressure of the storage container should be suitable for the final pressure of the compressor. The local regulations for the operation of pressure vessels are observed. For storage containers with liquid SF<sub>6</sub> storage a nominal pressure of 5 MPa is used.

#### 11.1.6 Evaporator and gas storage container heater

If SF<sub>6</sub> is stored in liquid form and used as a gas, icing or frosting of the gas storage containers takes place when large gas quantities are handled in a short time. The evaporator receives liquid SF<sub>6</sub> from the gas storage container and is designed so that no liquid can reach the gas compartment.

The gas storage container heaters are designed to avoid accidental overheating and not exceeding 60 °C gas temperature.

#### 11.1.7 Gas piping and pipe junctions

Gas piping and pipe junctions should be designed to avoid leaks and corrosion. For that purpose, copper and brass or stainless steel can be used. The design of both piping and junctions should take vibration into account so that periodical operations such as re-tightening of fittings are not required.

#### 11.1.8 Control instruments

Control gauges should be provided to show the gas pressure in the gas-filled compartment, the vacuum level, the gas temperature, etc. They should be placed in a position so that they can be observed when initiating operations of the general purpose reclaimer. Accuracy and resolution of the gauges should be adequate to allow preservation of safe operating conditions.

### 11.1.9 Safety valves

Safety valves are used in the SF<sub>6</sub> cycle for pressure relief. Local safety regulations are followed. Safety valves, which do not directly release SF<sub>6</sub> to the atmosphere, should be used.

### 11.2 Flexible hose connections

The reclaiming, the gas storage container and the gas compartment are connected via flexible hose connections. Particular care should be exercised to avoid the presence of air or other compounds inside the hoses in order to reduce the possibility of contaminating the gas. For this reason, hose connections with both self-closing and vacuum tight couplings are required. Suitable hoses, typically made of PTFE (polytetrafluorethylene or Teflon) or flexible stainless steel, able to withstand vacuum and permeation are required.

### 11.3 Portable devices for gas measurement

Table 18 gives a survey on the gas measuring devices including recommended measuring range and minimum accuracy.

**Table 18 – Gas measuring devices**

Device	Measurement	Range	Minimum accuracy
Dew point meter	Moisture	Dew point: -50 to 0 °C	±2 °C
SF <sub>6</sub> percentage measuring	SF <sub>6</sub> percentage SF <sub>6</sub> /N <sub>2</sub> or SF <sub>6</sub> /air	0 to 100 % by volume	±1 % by volume
Analysers of reactive gaseous by-products	By-products as for example SO <sub>2</sub> Oil mist	1 to 25 ppmv 0,16 to 1,6 ppmv	±15 % of the full range
SF <sub>6</sub> pressure gauge	Pressure	0 to 1 MPa	±10 kPa
Thermometer	Temperature	-25 to 70 °C	±1 °C

The gas temperature should be taken into account for a comparison at the reference temperature of 20 °C.

Gas quality measurements can be made under laboratory conditions and on-site. The following subclauses describe the most commonly portable instruments used on-site for the measurement of:

- The moisture content in the gas;
- The SF<sub>6</sub> percentage/quantity of inert gases;
- The residual quantity of reactive gaseous by-products/residual acidity content.

However some other instruments based on new technologies are available on the market and allow for combined determination of multiple gas characteristics.

#### 11.3.1 Dew point meter

The moisture content can be measured with different measuring principles and measuring instruments. However a dew point meter is the most common portable instrument used on purpose. The instrument measures the dew point of the gas, expressed in °C, and may convert it into relative mass concentration, expressed in mg/kg.

Desirable characteristics are:

- Sensor resistant to oil traces and corrosive gases;

- Permeation resistant connecting pipes using self-sealing valve connections;
- Calibrated or capable of field calibration;
- No SF<sub>6</sub> gas release to the environment (for example small compressor for gas refilling or make use of an empty cylinder);
- Less than 6 g gas used per measurement;
- Average time to obtain the readout less than 5 min.

### 11.3.2 SF<sub>6</sub> percentage measuring device

Devices that compare the speed of sound or the thermal conductivity of the SF<sub>6</sub> gas mixture with pure SF<sub>6</sub> are used to determine the SF<sub>6</sub> percentage. Velocity of sound based systems are fast (response time less than 1 min), accurate to ±1 % by vol., do not need recalibration and use only a minimal amount of gas. Their readout is the SF<sub>6</sub> concentration expressed in % by volume. They are mostly calibrated for mixtures of SF<sub>6</sub> and nitrogen and/or air.

Desirable characteristics are:

- No SF<sub>6</sub> gas release to the environment (for example small compressor for gas refilling or make use of an empty cylinder);
- Less than 3 g gas used per measurement.

Devices measuring the concentration of the non-reactive gases (such as oxygen sensors) and then calculating the % by vol. of SF<sub>6</sub> should not be used as different non-reactive gases such as nitrogen or CF<sub>4</sub> may be present.

### 11.3.3 Reaction tubes sensitive to SO<sub>2</sub>

Reaction tubes change their initial colour if SF<sub>6</sub> containing SO<sub>2</sub> is fed through them. SO<sub>2</sub> reaction tubes are also sensitive to SOF<sub>2</sub>. A small amount of SF<sub>6</sub> from the equipment (~6 g) is needed. That gas sample flows through the reaction tube to perform the measurement. It is expressed in µl/l. A measuring range from 0 to 25 ppmv is recommended.

Desirable characteristics are:

- Calibration for SO<sub>2</sub> and SOF<sub>2</sub>;
- Connecting pipes resistant to reactive gaseous by-products and utilising self sealing valve connections;
- No SF<sub>6</sub> gas release to the environment (for example small compressor for gas refilling or make use of an empty cylinder);
- Less than ~6 g gas used per measurement

Reaction tubes sensitive to HF should not be used, as this gas reacts quickly with all metals to form metal fluorides.

### 11.3.4 Portable SF<sub>6</sub> detectors

Portable detectors for SF<sub>6</sub> are broadly of two types:

- a) Electron capture detector using a β-particle source to ionise a pumped sample. The ion current between electrodes is measured. An inert gas carrier is usually used. This type is much more expensive and considerably less portable than type b). Sensitivities down to 0,1 ppmv of SF<sub>6</sub> in air can be achieved.
- b) Corona discharge cell using a high-voltage (1 kV to 2 kV) applied to a point-plane electrode configuration. The discharge current is measured. This type of detector is used in a variety of highly portable, battery-powered units of relatively low cost. Sensitivities of below 10 ppmv can be achieved, but not with all available units [7].

Detectors of the first type are generally used for leak tracing and quantification.

Detectors of the second type, if sufficiently sensitive, could be suitable for assessing whether an area contains SF<sub>6</sub> and can be useful for leak detection.

#### **11.3.5 Alarm system SF<sub>6</sub> detectors**

Alarm systems require detectors with very high long-term stability. The infrared absorption characteristic of SF<sub>6</sub> is used as the basis for most detectors of this type [8]. An infrared source is used to heat a gas sample in a differential pressure-measuring device using a sensitive capacitance transducer. The pressure rise is measured.

Sensitivities down to 10 ppmv can be achieved. Automatic calibration facilities may be incorporated. In some installations, samples of air are piped from various points to a central detector. The active detection point can be selected automatically or manually.

Alarm systems incorporating SF<sub>6</sub> detectors are generally used only where very large volumes of SF<sub>6</sub> are contained in equipment housed indoors, such as in high-voltage GIS installations.

#### **11.4 Cylinder for gas samples**

Stainless steel cylinders with a volume smaller than 1 litre are recommended. The gas quantity should be not smaller than 6 g. The gas should be sampled directly from the container (for example gas-filled compartment, gas storage container of the reclaimer) using suitable fittings. If the pressure in the gas container exceeds the maximum allowable pressure of the cylinder, then a pressure regulator and a pressure gauge are used.

## Annex A (informative)

### Sulphur hexafluoride

#### A.1 Introduction

Sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) is a synthetic gas formed by 6 atoms of fluorine gathered around a centrally situated atom of sulphur. The chemical bond between fluorine and sulphur is known as one of the most stable existing atomic bonds. Six of them grant the molecule very high chemical and thermal stability.

SF<sub>6</sub> is strongly electronegative (i.e. it tends to attract free electrons). It has a unique combination of physical properties: high dielectric strength (about 3 times that of air), high thermal interruption capabilities (about 10 times that of air) and high heat transfer performance (about twice that of air).

For that reason, since the early 1960's, SF<sub>6</sub> has been successfully used by the Electricity Industry in power equipment for the high-voltage transmission and distribution of electricity (for example high-voltage and medium-voltage switchgear, gas insulated substations, ring main units, circuit-breakers, transformers, cables).

Other non-electrical industrial applications include: aluminium production, magnesium casting, semiconductor production, production of flat panel screens, nuclear fuel cycle, noise insulating windows, tires, high performance radar, tracer gas for meteorological measurements and in power plant piping, and military applications.

#### A.2 Chemical properties

Pure SF<sub>6</sub> is odourless, tasteless, colourless, non-toxic, non-flammable, very stable and inert. Its solubility in water is 4 times lower than that of air. Its compatibility with materials used in electric constructions is similar to that of nitrogen, up to temperatures of about 180 °C.

Table A.1 lists the main chemical characteristics.

**Table A.1 – Main chemical characteristics of SF<sub>6</sub> [9]**

Formula	SF <sub>6</sub>
CAS Number	2551-62-4
Molecular weight	146,05 g/mol
Sulphur content	21,95 %
Fluorine content	78,05 %
Molecular structure	Octahedral with fluorine atoms at the six corners
Bonds	Covalent
Collision cross-section	0,477 nm
Decomposition temperature in quartz container	500 °C

#### A.3 Physical properties

SF<sub>6</sub> is one of the heaviest known gases: in normal conditions it is about five times heavier than air.

The mixing with air by convection and diffusion is slow, but once it has mixed it does not separate again.

The thermal conductivity of SF<sub>6</sub> is lower than that of air, the overall heat transfer properties are two to five times better due to its lower viscosity and higher density.

In electric power equipment the normal pressure range of SF<sub>6</sub> is between 0,1 MPa and 0,9 MPa absolute. The pressure/temperature/density characteristics of the gas are shown in Figure A.1.

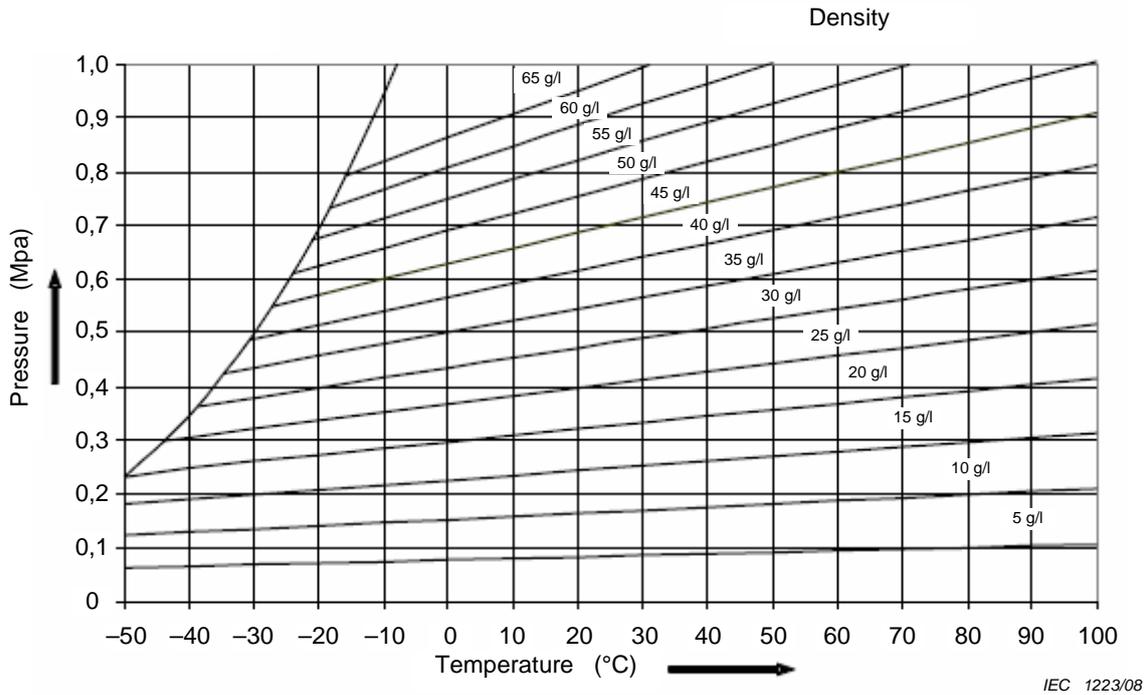


Figure A.1 – Pressure/temperature/density characteristics for SF<sub>6</sub> [9]

Table A.2 lists the main physical characteristics.

**Table A.2 – Main physical characteristics of SF<sub>6</sub> [9]**

Density at 20 °C 100 kPa	6,07 kg/m <sup>3</sup>
Thermal conductivity at 25 °C 100 kPa	0,013 W/(m.K)
Critical temperature	45,58 °C
Critical pressure	3,759 MPa
Critical density	740 kg/m <sup>3</sup>
Solubility in water at 20 °C	6,31 cm <sup>3</sup> SF <sub>6</sub> /kg H <sub>2</sub> O
Sound velocity at 0 °C 100 kPa	129,06 m/s
Refractive index	1,000783
Heat of formation	-1221,58±1,0 kJ/mol
Entropy of reaction	-349,01 J/(mol.K)
Specific heat at constant pressure at 20 °C 100 kPa	96,60 J/(mol.K)
Equation of state	See Figure A.1

#### A.4 Electrical properties

The excellent dielectric properties of SF<sub>6</sub> are due to the strong electronegative character of its molecule. It has a pronounced tendency to bind free electrons forming heavy ions with low mobility making the development of electron avalanches very difficult.

The electric strength of SF<sub>6</sub> is about 3 times higher than that of air under the same conditions.

Because of its low dissociation temperature and high dissociation energy, SF<sub>6</sub> is an excellent arc quenching medium.

When an electric arc cools in SF<sub>6</sub>, it remains conductive to a relatively low temperature, thus minimising current chopping before current zero, and thereby avoiding high overvoltages.

Table A.3 lists the main electrical characteristics of SF<sub>6</sub>.

**Table A.3 – Main electrical characteristics of SF<sub>6</sub> [9]**

Critical breakdown field relative to pressure	89 V/(m.Pa)
Relative dielectrical constant at 25 °C and 0,1 MPa absolute	1,00204
Loss factor (tan δ) at 25 °C and 0,1 MPa absolute	<2,0 × 10 <sup>-7</sup>
Effective ionisation coefficient	$\frac{\alpha}{p} = A \frac{E}{p} - B$ <p> <math>\alpha</math>: m<sup>-1</sup>  <math>E</math>: V/m  <math>p</math>: Pa  <math>A</math>: 2,8 × 10<sup>-2</sup>/V  <math>B</math>: 89 V/(m.Pa) </p>

## A.5 Handling, hazards and health characteristics

SF<sub>6</sub> does not support combustion. As the gas is much heavier than air, under conditions of insufficient mixing with air the gas has a tendency to accumulate at low levels. Areas below ground level, poorly ventilated or unventilated areas (for example cable ducts, trenches, inspection pits, drainage systems), may remain full of SF<sub>6</sub>. Personnel should be aware of the danger of asphyxiation in such places. Equipment containing SF<sub>6</sub> should not be entered without adequate ventilation and personal protection tools.

SF<sub>6</sub> is non-toxic and biologically inert. According to the American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) the Threshold Limit Value (TLV) in terms of Time Weighted Average (TWA) is 1 000 ppmv (6 100 mg/m<sup>3</sup>). This is intended for places of work in which personnel spend up to 8 h per day, 5 days per week [10]. That TLV is normally adopted for all harmless gases not present in the atmosphere.

SF<sub>6</sub> does not harm the life or the ecosystem but it is a potent and persistent greenhouse gas, as described in Annex B.

When handling SF<sub>6</sub> it is necessary therefore to adopt procedures to keep the gas in a closed cycle, avoiding any deliberate release to the environment.

Technical grade SF<sub>6</sub> is commercially available, according to IEC 60376.

Used SF<sub>6</sub> can be reused on-site, according to IEC 60480.

Used SF<sub>6</sub> can be reused at the gas manufacturer, according to the specification given by the gas manufacturer. In case the gas does not comply with the specification, it is disposed according to local or international regulations on waste management.

## **Annex B** (informative)

### **Environmental effects of SF<sub>6</sub>**

#### **B.1 Introduction**

Every human activity has an effect on the environment; the impact of a particular activity depends on its scale and on the materials involved. Activities where gases are produced or used may cause releases to the atmosphere. Three major aspects are considered:

- Ecotoxicology: toxic material and gases with effects on the environment and all forms of life.
- Ozone depletion: increase in dimensions of the holes in the stratospheric ozone layer.
- Global warming/climate change: increase in the greenhouse effect.

#### **B.2 Ecotoxicology**

SF<sub>6</sub> is not toxic and has no reported potential to be acute or chronic ecotoxic. As its solubility in water is very low, it presents no danger to surface and ground water or the soil. A biological accumulation in the nutrition cycle does not occur. Therefore, SF<sub>6</sub> does not harm the ecosystem. SF<sub>6</sub> is:

- not carcinogenic: not causing cancer;
- not mutagenic: not causing damage to the genetic constitution;
- not nitrifying: no enrichment in the food chain;
- low soluble in water.

#### **B.3 Ozone depletion**

SF<sub>6</sub> and its by-products from application in electric power equipment do not contribute to the destruction of stratospheric ozone layer [9] because they do not contain either chlorine or bromine.

#### **B.4 Global warming/climate change (greenhouse effect)**

The average global temperature of the earth results from a balance between the heating effects of solar radiation and the cooling associated with the infrared radiation from the earth. Some of the infrared radiation is reflected back to the surface of the earth and the greenhouse effect is a natural phenomenon that contributes to allow the life on earth.

It is due to the natural greenhouse gases (mainly moisture, carbon dioxide, methane) which are transparent to the radiation coming from the sun, but absorb the infrared radiation reflected back from the earth.

Without the greenhouse gases the heat from the sun would be radiated back into space and the temperature of the earth would be much lower.

The presence of the greenhouse gases traps some solar energy in the atmosphere. The consequence is a higher average temperature of the planet compared with the temperature that would have prevailed if no greenhouse effect had existed. Scientific estimations evaluate the increase to as much as 33 °C (from –18 °C to the actual 15 °C) [11].

Today, the natural phenomenon is by far predominant and human activities give only a small contribution to the total greenhouse effect. However, as the human contribution is growing, this is today a major concern. According to several studies, the actual trend, if not reversed, will cause a significant increase of the average temperature of the planet: the global climate will be changed.

Both manmade and natural greenhouse gases contribute to the greenhouse effect. The Kyoto Protocol [13] is an international agreement to control the emission of manmade greenhouse gases.

The basket of greenhouse gases, to be monitored according to the Kyoto Protocol is composed of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), methane (CH<sub>4</sub>), nitrous oxide (N<sub>2</sub>O), hydrofluorocarbons (HFCs), perfluorocarbons (PFCs), and sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>). The latter three substances are fluorinated greenhouse gases (or F-gases).

The concentrations of different gases relevant to the environment including those in the Kyoto Protocol are regularly monitored by several scientific bodies. In particular the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) prepares periodically assessment reports, up-dating the existing information on emissions and evaluating their potential future impact on the environment according to different hypothesis of their emission trends. The latest published is the Third Assessment Report (TAR) in October 2001 [11].

The fourth Assessment Report is due by the end of 2007. IPCC was established by the World Meteorological Organisation (WMO) and the United Nations Environmental Programme (UNEP) in 1988. F-gases are known for their high global warming impact as compared to CO<sub>2</sub>, the main originator of the global warming effect, and contribute approximately in the measure of 1,5 % to the overall greenhouse gas effect. The strong infrared absorption of SF<sub>6</sub> and its long lifetime in the environment are the reasons for its high Global Warming Potential (GWP) which is 22 200 higher than CO<sub>2</sub>, according to the Third Assessment Report. The GWP is calculated over a time period of 100-years warming potential of 1 kg of a gas referred to 1 kg of CO<sub>2</sub>. Its overall contribution to the global greenhouse gas effect from all applications amounts to approximately 0,2 % overall.

However, the GWP of SF<sub>6</sub> alone is not adequate to measure the environmental impact of electric power equipment based on SF<sub>6</sub> technology. The environmental impact of any specific application should be evaluated and/or compared using the Life Cycle Assessment – LCA approach as regulated by ISO 14040 [14].

The Electric Industry utilises SF<sub>6</sub> in a closed cycle, banking it for example in gas insulated substations (GIS), medium-voltage and high-voltage gas circuit breakers (GCB), high-voltage gas insulated lines (GIL), gas insulated voltage transformers (GVT). In Asia, significant quantities of SF<sub>6</sub> are banked in gas insulated power transformers (GIT) as well.

In spite of being reported as the most important user of SF<sub>6</sub> worldwide, the Electric Industry is a low contributor to the global emission of SF<sub>6</sub>, far below to other industries or users with “open application” of the gas. However, its importance as source substantially varies from region to region and from country to country, depending on the SF<sub>6</sub> handling procedures adopted, the tightness of the electric power equipment and the amount of gas banked in electric equipment.

Regional average emission rates presently vary between far less than 1 % to more than 10 %. In general, emission rates have declined significantly since 1995. Targeted industry actions have reduced emissions by 50 % to 90 % in Europe [15], Asia [16], and North America [17] and [18]. Those actions include:

- designing equipment requiring a smaller quantity of SF<sub>6</sub> and having a high tightness degree;
- improving handling processes and handling equipment for all life cycle stages according to the present technical report.

## **B.5 By-products**

Major failures causing gas releases are extremely rare as records from 40 years of experience show. The quantities released in such extreme cases are again very limited by the fact that standard design of products is compartmented, limiting the fault to the place where it originates. The gas quantities concerned are subsequently small fractions of the total gas banked in a substation.

Annex C shows that by-products can be converted without difficulty into neutral products available in nature. Procedures for their treatment, handling and disposal ensure that they have a negligible impact on the environment.

## **B.6 Environmental compatible SF<sub>6</sub> policy**

SF<sub>6</sub> should be handled in a closed cycle, to avoid any deliberate release to the environment. Among all the voluntary initiatives, gas recovery and reuse have the highest priority.

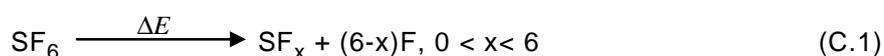
Voluntary agreements [19] involving manufacturers and users have been signed in some countries with the aim of controlling and reducing emissions of SF<sub>6</sub> from the electric power equipment. In general, in such agreements, environmental compatible policies mention that for the development, manufacturing, installation, operation, maintenance and end-of-life disposal of electric power equipment utilising SF<sub>6</sub>, state-of-the-art technologies and procedures are applied to minimize SF<sub>6</sub> emissions.

## Annex C (informative)

### SF<sub>6</sub> by-products

#### C.1 Decomposition of SF<sub>6</sub>

When arcing occurs in SF<sub>6</sub> due either to normal switching operations or fault clearances, or in the unlikely event of an internal arcing fault, different by-products are generated simultaneously in varying quantities [5], and [9]. When the SF<sub>6</sub> molecule is stressed by temperature, radiation or electrical discharge and separation of fluorine atoms occurs, a number of radicals, ions, or neutral molecules are produced, depending on the type of excitation and the energy input, according to:



When the input of energy  $\Delta E$  ceases, most of the atoms recombine to form SF<sub>6</sub>, whilst others combine with different substances in the system to form a variety of stable end products. Such substances include in particular oxygen and water and also materials used in the construction of the equipment.

These by-products are considered here in relation to the energy delivered to the SF<sub>6</sub>.

##### C.1.1 Behaviour of SF<sub>6</sub> in an electric arc

Heavy current arcing occurs normally during circuit breaker switching and fault clearance operations, and abnormally during an internal arc fault.

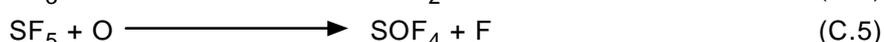
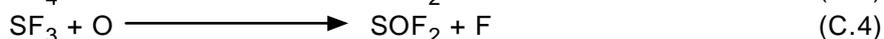
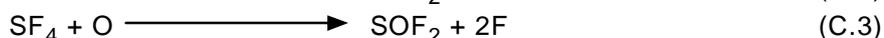
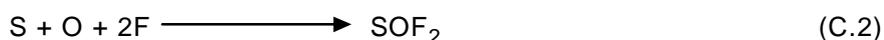
From temperatures of 500 °C, SF<sub>6</sub> begins to decompose into its constituent parts, with the degree of decomposition being directly proportional to the quantity of energy converted. In the dissociation process defined in equation (C.1), the SF<sub>6</sub> molecules are broken down into sulphur and fluorine atoms at about 3 000 °C.

The large quantity of heat adsorbed during this process is dissipated away from the arc zone by radiation and convection. Below a temperature of about 1 000 °C, the atoms recombine or react with other substances, such as vaporised electrode metal, the vessel wall, plastics or impurities. Gaseous and solid by-products can arise, including metal fluorides and sulphur fluorides, of which the most important are CuF<sub>2</sub>, AlF<sub>3</sub>, WF<sub>6</sub>, CF<sub>4</sub> and SF<sub>4</sub>.

These products, generally known as primary by-products, are formed during or shortly after a discharge in the less-than-one-second range. Dust-like deposits which may appear on the surfaces of insulators during normal operation have no detrimental effect on their dielectric performance.

Some of the by-products are chemically stable; others are very unstable, particularly in presence of water.

In presence of oxygen, by-products can arise as follows:





As the maximum operating temperatures inside electric power equipment in the absence of arcing are far below these values, no SF<sub>6</sub> decomposition of this kind is to be expected during operation.

## C.2 Corrosion behaviour of SF<sub>6</sub> and its by-products

SF<sub>6</sub> is a completely non-reactive gas. There is no possibility therefore that corrosion will be caused directly by the SF<sub>6</sub> itself. However, the primary and secondary by-products, in presence of moisture, may form corrosive electrolytes which may lead to damage some of the material used inside the equipment.

The metals commonly used, such as aluminium, steel, copper and brass, are hardly attacked at all, but materials such as glass, porcelain, insulation paper and the like are more vulnerable to damage, depending upon the concentration of the corrosive substances concerned. Other insulating materials, such as epoxy resin, polyester, polyethylene, polymethylene oxide, PTFE, PVC, etc., are not significantly affected.

It is important that measures be taken in the design to take account of the corrosive properties of the by-products. Corrosion can be prevented by the thorough exclusion of moisture and by using suitable materials.

## C.3 Measures for the removal of by-products

Moisture and by-products inside equipment in service can be reduced to acceptable levels by adsorption. Materials such as alumina, molecular sieves or mixtures thereof are suitable for this purpose. They adsorb the gaseous reactive by-products very effectively and practically irreversibly, and at the same time ensure that the gas maintains a low dew point [9].

Disposal of by-products removed from equipment is straightforward. The acid components (sulphuric acid and hydrogen fluoride) are degraded by means of alkaline compounds.

Most of the solid reaction products are not soluble in water, or can be dissolved only with difficulty, but certain metal fluorides can react with water to form hydrofluoric acid. It is necessary therefore to treat the solid reaction products with calcium hydroxide (lime), for example, to neutralise the acid components. The resultant sludge can then be disposed of according to local regulations.

## C.4 Physiological characteristics of by-products

By-products can cause irritation of the skin, eyes and mucous membranes, such as in the respiratory tract, and in high concentrations can cause pulmonary oedema, given sufficient time of exposure.

SF<sub>6</sub> containing by-products has an unpleasant pungent smell that in itself is associated with an irritant effect. The olfactory thresholds, especially for SOF<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and HF, are of the same order as the TLVs. Because of these characteristics, even small quantities of gaseous by-products may give rise to unmistakable warning indications within a matter of seconds, before any risk of poisoning can arise [5].

## **Annex D** (informative)

### **Potential effects on health of SF<sub>6</sub> by-products**

#### **D.1 Introduction**

This annex examines the risks to health due to SF<sub>6</sub> accidentally released into the local atmosphere by leakage and in the event of an internal fault.

During normal service SF<sub>6</sub> remains inside the electric power equipment and the by-products formed are neutralised by molecular sieves as well as by natural recombination processes. SF<sub>6</sub> can become present in the atmosphere because of leakage or if a gas-filled compartment fails to contain the gas, for example in the unlikely case of an internal fault. It is necessary to differentiate clearly between leakage conditions and internal fault situations leading to a sudden release of SF<sub>6</sub>, when evaluating health risk.

In the case of leakage it is necessary to consider the effects of long-term exposure to the gaseous by-products. The concentrations of these products in the air should remain low enough to present no threat to unprotected personnel during a normal working period of, for example, 8 h.

In the case of a sudden release of SF<sub>6</sub> due to an internal fault, mandatory evacuation and ventilation procedures imply a momentary exposure. By-product concentrations of higher levels than would be tolerable during, for example, 8 h can be tolerated if the exposure time is considerably reduced. Clearly in this case account should be taken of all possible sources of toxic emanations and this requires detailed knowledge of all of the products formed. In this respect a full treatment should consider contributions from metal vapour, burnt plastics, cable insulation, paint, etc., on an equal footing to those attributable to the SF<sub>6</sub>.

NOTE For example, by comparison of long-term exposure limits, copper fumes from vaporised electrodes are about four times as toxic as arc-decomposed SF<sub>6</sub> (SOF<sub>2</sub>) whilst aluminium fumes are about four times less. Both can be produced in large quantities in any incident where electrical arcing occurs, regardless of the insulation medium employed, and may constitute the major risk to health (see D.4.7.2). The contribution of fumes from the combustion of plastics (see D.4.7.3) is also highly significant.

The first aim of this annex is to lay out the basic guidelines for estimating the concentrations of toxic by-products in the air in an environment into which SF<sub>6</sub> has been released. The effects of other potentially toxic substances released under fault conditions are also considered.

The following subclauses give the methods for calculating the risks associated with the presence of by-products in the atmosphere due to leakage and to internal fault together with the principles adopted for performing the calculations.

#### **D.2 Overview**

Methods are presented for calculating the risk associated with the presence of by-products in the atmosphere due to leakage and to internal fault. The principles adopted for performing the calculations are presented in the following clauses.

#### **D.3 Formation and health effects of by-products**

##### **D.3.1 Formation of by-products**

During high power arcing in SF<sub>6</sub> the arc core reaches temperatures of the order of 10 000 K. At these temperatures the molecules of the gas are completely broken down into their parent

atoms, sulphur and fluorine, as reported in C.1.1. Any impurities present, such as air or moisture, are dissociated in a similar manner. The result of this is a localised region containing only single atoms of sulphur, fluorine, hydrogen, nitrogen, oxygen and diverse ions. The heating of the electrodes by the arc roots adds vapours of copper, tungsten, graphite and/or aluminium to this atmosphere.

After arc extinction or in regions where cooling commences, these atoms start to bind together again and reform mainly SF<sub>6</sub>. However, chemical reactions take place with the impurities present and in particular with moisture and oxygen, giving rise to the so-called arc by-products, as reported in Annex C. The quantities formed are directly related to the electrical discharge energy.

The most frequently encountered by-products are: SOF<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HF and also CF<sub>4</sub>, SF<sub>4</sub> and SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> [21]. The existence of these by-products is of importance only if they enter the local atmosphere. Their concentrations inside the electric power equipment are of no direct significance, especially since the presence of adsorbers (such as molecular sieves) will tend to purify the gas.

For some time there were concerns that the highly toxic gaseous by-product S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> might constitute a major contributor to the toxicity of SF<sub>6</sub> in which arcing has occurred. However experiments later performed showed that this idea is not substantiated [22]. In fact S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> appears now to be formed in such extremely small quantities during arcing as to contribute negligibly to the overall toxicity of SF<sub>6</sub>.

It is also known that S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> is formed by low-energy electrical discharges in SF<sub>6</sub> and that under these conditions, higher S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> production rates are encountered [23] than during arcing. The high toxicity of this compound, at concentrations that until recently were difficult to detect, has prompted considerable investment in research into the potential risks associated with its presence [20]. However, S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> decays in the presence of moisture [23], at temperatures exceeding 200 °C, and at ambient temperature by catalytic wall decomposition. The last mechanism is so efficient that the S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> generated in equipment is reduced to a negligible quantity [24].

### **D.3.2 Effects of by-products on health**

If SF<sub>6</sub>, which has been subjected to arcing or to low-energy discharges, is exhausted into the work place then the potential health risk will depend on the concentration of each by-product in the air, and hence on the volume of the room containing the equipment. Toxicity estimations should take account of the concentration of each component present in terms of the permissible concentrations for appropriate exposure times.

#### **D.3.2.1 Health effects of arc decomposed SF<sub>6</sub>**

For multi-component mixtures, toxicologists define three general cases:

- each component acts in a different manner, or on different target organs; the effects are hence not cumulative and each component is treated separately;
- the components act in a similar manner on the same target organs; their effect is thus cumulative and calculations will take this into account;
- one component largely outweighs the contribution of the others; the overall toxic effect can be estimated by studying the concentration of this component alone.

A survey of the majority of work carried out over the past decades on high power arc decomposition of SF<sub>6</sub> [21] and [25] allows the following conclusion to be drawn: the toxicity of arc decomposed SF<sub>6</sub> is initially dominated by one specific compounds, the gas thionyl fluoride SOF<sub>2</sub>.

This conclusion justifies the adoption of the following: the overall health risk to personnel, due to arc decomposed SF<sub>6</sub>, should be estimated using the SOF<sub>2</sub> concentrations generated.

In this report the by-product  $\text{SOF}_2$  is used as the indicator of the overall toxic effect of arc decomposed  $\text{SF}_6$ . This allows the health risk in various situations to be assessed together with the implications to safety procedures.

Hydrolysis of the  $\text{SOF}_2$  may occur in the presence of significant concentrations of moisture, producing  $\text{SO}_2$  and HF, as reported in C.1.1. The risks of exposure to such a mixture, neglecting that HF is unlikely to remain in the atmosphere for long periods because of its high reactivity, are slightly higher than for  $\text{SOF}_2$ , as detailed in D.4.5.1. This is taken into consideration when assessing the risks due to leakage, where sufficient time may elapse for the hydrolysis reaction to occur, either inside the equipment or in the atmosphere. Hydrolysis of  $\text{SOF}_2$  may be neglected for internal fault situations where the time between the fault and subsequent ventilation and repair work is short.

### **D.3.2.2 Health effects of $\text{SF}_6$ decomposed by low-energy discharges**

During low-energy discharges, the by-product  $\text{S}_2\text{F}_{10}$  may be formed in very small quantities. It is the most toxic by-product of  $\text{SF}_6$  known; for this reason it is also considered in the assessment of the risks due to leakage from high-voltage equipment. The contributions to toxicity of other by-products such as  $\text{SOF}_2$ ,  $\text{SO}_2$  and HF are negligible in  $\text{SF}_6$  which has been decomposed by low-energy discharges, so these products are not considered.

### **D.3.2.3 Exposure duration and dilution in air**

The two key notions essential to any evaluation of risk to health due to toxic substances are:

- Dilution into the surrounding volume
- Time duration of exposure.

The first notion is required to enable the conversion from the concentration of by-products formed inside the electric power equipment, into a concentration level in the workplace atmosphere.

NOTE For example, a somewhat alarming by-product concentration of 1 000 ppmv, generated in a 1 l experimental chamber, will lead to the very low value of 0,04 ppmv when released into a 3 m × 3 m × 2,5 m room.

The second notion will determine the method of evaluating the potential health risk, applicable under either normal conditions (basic leakage) or abnormal ones (internal fault).

Under normal conditions the TLV (Threshold Limit Value) concentration should be employed, as reported in D.8.1. This ensures the safety of those working full time in the vicinity of the  $\text{SF}_6$  filled electric power equipment.

Under abnormal conditions for example internal arc fault, personnel immediately leave the room of the electric power equipment and the exposure is hence momentary. For this type of exposure, very much higher concentrations than the TLV can be tolerated, as reported in D.4.2.

## **D.4 Calculation of by-product concentrations**

The following presents the methods and results of calculations giving the concentrations of gaseous by-products in the equipment room atmosphere for various types of installation. The contributions of other sources of risk, which arise during an internal fault, such as smokes, fumes and vapours, have also been assessed.

For the case of leakage, the quantities of  $\text{SOF}_2$  and  $\text{S}_2\text{F}_{10}$  leaked during 24 h are considered. It is assumed that no gas escapes from the equipment room. The effects of hydrolysis of  $\text{SOF}_2$  are considered.

For the internal fault situations all of the  $\text{SOF}_2$  formed is considered to be emitted rapidly into the surrounding atmosphere and is considered to be stable during the time period of interest.

For the case of maintenance of electric power equipment, particular to controlled and/or closed pressure systems, guidance is given in Clause 9. In such situations working procedures require the recovery of all the  $\text{SF}_6$  before opening the electric power equipment.

#### D.4.1 Calculation criteria

The following criteria have been used throughout this treatment, for both leakage and internal fault situations:

- The equipment room is assumed to be completely closed and ventilation is assumed to be inoperative during the period of interest.
- Arc by-product adsorbers, fitted in the electric power equipment, are assumed to be inoperative during the period of interest.
- The gas emitted is assumed to mix uniformly with the air in the room of the electric power equipment in a short time with respect to the working day or exposure duration.

#### D.4.2 Risk evaluation

##### D.4.2.1 Leakage situations

The results of the example calculations give the concentrations  $C$  of  $\text{SOF}_2$  (see D.4.5) and of  $\text{S}_2\text{F}_{10}$  (see D.4.6) in the air of the room of the electric power equipment. Each value of  $C$  should be compared with the concentration permitted for full-time work, the TLV reported in D.8.1. The final result of each calculation is expressed as a ratio  $C/\text{TLV}$ ; this should have a value of less than unity for there to be no significant risk and for full-time working to be permitted.

The concentrations of  $\text{SO}_2$  and HF are calculated for the case of  $\text{SOF}_2$  hydrolysis (see D.4.5.1). HF and  $\text{SO}_2$  are considered to have a cumulative effect on the human organism and for such a multi-component mixture, the sum  $R_{\text{tot}}$  of the individual ratios of concentration to TLV should not exceed unity.

$$R_{\text{tot}} = \frac{\text{SO}_2 \text{ concentration}}{\text{TLV (SO}_2\text{)}} + \frac{\text{HF concentration}}{\text{TLV (HF)}} \leq 1$$

NOTE This is a cautious assumption which results in the maximum permitted concentration of each component being lower than its TLV. It is adopted here in order to maintain a worst-case approach.

The TLVs for the four compounds of interest,  $\text{SOF}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , HF and  $\text{S}_2\text{F}_{10}$ , are given in Table D.1 [10]:

**Table D.1 – TLVs for  $\text{SOF}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , HF, and  $\text{S}_2\text{F}_{10}$**

	<b><math>\text{SOF}_2</math></b>	<b><math>\text{SO}_2</math></b>	<b>HF</b>	<b><math>\text{S}_2\text{F}_{10}</math></b>
TLV (ppmv)	1,6	2	3	0,01

##### D.4.2.2 Internal fault situations

For these abnormal cases the  $\text{SOF}_2$  concentrations are much higher than for leakage because all of the  $\text{SF}_6$  is released in a short period of time. Standard procedures impose evacuation and ventilation of the equipment room. The exposure to arc decomposed  $\text{SF}_6$  should therefore be momentary. For this reason, comparing a calculated  $\text{SOF}_2$  concentration with the TLV is no longer appropriate (see D.8.1).

In general, an IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health) value provides guidance for short-term exposure (see D.8.2). There is however no published IDLH value for  $\text{SOF}_2$ . It is therefore necessary to turn to the results of toxicological data in order to obtain a reference value for non-repetitive momentary exposure ( $C_m$ ).

$$C_m = 500 \text{ ppmv}$$

NOTE Toxicological data exist for exposure of test animals to atmospheres containing  $\text{SOF}_2$  [26] and [27], covering the effects of 1 h exposure of three distinct mammal species to concentrations of up to several thousand ppmv of  $\text{SOF}_2$ . The results show that for exposure to concentrations of up to 100 ppmv (mice and rats) and 500 ppmv (rabbits), all animals exhibit an apparently normal general state, 24 h after the exposure period.

The calculated  $\text{SOF}_2$  concentrations are compared with  $C_m$  to assess the risks to health due to by-products during or following an internal fault. Other factors which may be more significant should be considered in risk assessment and in the appraisal of safety procedures (see D.4.7.2 and D.4.7.3).

For human exposure, higher concentrations than 500 ppmv for 1 h could be tolerable, as larger organisms are generally less sensitive to toxic agents. It can therefore be inferred that the use of a momentary exposure limit,  $C_m$  of 500 ppmv, as a reference value for comparison with the calculated concentrations, is acceptable.

#### **D.4.3 Calculation limits for cases of internal fault**

##### **D.4.3.1 Very small room volumes**

In these situations, such as for an internal fault in a medium-voltage/low-voltage substation, the main health risk is not that due to arc by-products. The arc itself, the hot gas blast, the smoke, the fumes from burnt paint, plastics or metal vapours and finally the shock wave, probably constitute the major risks, as reported in D.4.7.2 and D.4.7.3.

Extrapolation to room volumes much smaller than about  $50 \text{ m}^3$  is hence probably not a valid procedure for estimating health risks. An example calculation using a smaller room volume than  $50 \text{ m}^3$  has nevertheless been included to allow the  $\text{SOF}_2$  contribution to the overall toxicity to be estimated.

##### **D.4.3.2 Very long arcing times**

For all internal fault calculations a constant environment for the arc is assumed, leading to a constant  $\text{SOF}_2$  production rate, during an arcing time of 100 ms (see D.7.3.2). The constant production rate will almost certainly not be valid for arcing times above about 100 ms, as explained below:

#### **Internal fault in MV and HV circuit-breakers and in ring main units (RMU)**

In these cases, the vent valve will rapidly open the gas-filled compartment to the atmosphere. The high, arc-induced, pressure rise will tend to empty most of the  $\text{SF}_6$  in a fraction of a second but the arc will remain burning mainly in the metal vapour formed by evaporation of the electrodes. Clearly, only a fraction of the total arc energy goes to by-product formation. Experimental work is thus needed to enable extrapolation above about 100 ms.

#### **Internal fault in gas insulated switchgear (high-voltage GIS)**

In these situations, a significant quantity of metallic vapour is formed and an exothermic reaction takes place between the  $\text{SF}_6$  and the aluminium electrodes. The arcing environment will be profoundly modified and the use of a constant by-product production rate may not be justifiable.

#### **D.4.4 Situations studied**

Ten representative situations have been studied as follows:

- a) Leakage from a medium-voltage circuit-breaker after three consecutive interruptions of a 31,5 kA three-phase fault current (see IEC 62271-100, test duty T100).
- b) Leakage from a high-voltage circuit-breaker after three consecutive interruptions of a 31,5 kA three-phase fault current (see IEC 62271-100, test duty T100).
- c) Leakage from a high-voltage gas-filled compartment in which partial discharges have occurred during a period of 30 years.
- d) Leakage from a high-voltage gas-filled compartment in which corona discharges have occurred during a period of 30 years.
- e) Leakage from a high-voltage switch-disconnector in which sparking has occurred 200 times per year during a period of 30 years.
- f) Internal fault leading to pressure-relief or burn-through in a 245 kV GIS bus-bar at 40 kA (single-phase fault).
- g) Internal fault leading to pressure-relief or burn-through in a 145 kV GIS bus-bar at 31,5 kA (fault involving two phase-to-phase arcs).
- h) Internal fault leading to pressure-relief or burn-through in a medium-voltage GIS switchboard at 25 kA (single-phase fault).
- i) Internal fault leading to pressure-relief in a medium-voltage circuit-breaker at 25 kA (single-phase fault).
- j) Internal fault leading to pressure-relief in a medium-voltage ring main unit at 16 kA (fault involving two phase-to-phase arcs).

#### D.4.5 Determination of concentrations due to leakage of SOF<sub>2</sub> from circuit-breakers

Leakage from circuit-breakers only is considered here because the degree of SF<sub>6</sub> decomposition in circuit-breakers is higher than that in other types of equipment.

The concentration of the reference gaseous by-product SOF<sub>2</sub> in the room of the electric power equipment is calculated for a circuit-breaker which has just interrupted a three-phase fault current three consecutive times (as required by IEC 62271-100, T100) and is consequently leaking SF<sub>6</sub> containing by-products. The quantity of SOF<sub>2</sub> leaked during a 24 h period is calculated and compared with the room volume to establish the concentration.

The procedure for calculating the concentrations of by-products is as follows. Data and intermediate calculation results are given in D.7 as indicated for each stage.

- Calculate the total arc energy in kilojoules (kJ) ( $E = I \times U \times t \times n \times m$ ) where  $n$  is the number of phases and  $m$  is the number of interruptions (see D.7.3.1 for data).
- Calculate the quantity of SOF<sub>2</sub> formed in litres (from production rate,  $r$ , in l/kJ, see D.7.4 and D.7.5).

NOTE 1 The arcing takes place between copper-tungsten contacts.

- Calculate the SOF<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub> volume ratio inside the breaker (taking into account the filling pressure, see D.7.7).
- Determine the leakage rate  $L$  in litres per day (from manufacturer's data, see D.7.6).
- Calculate the quantity of SOF<sub>2</sub> leaking into the equipment room (see D.7.7).
- Calculate the quantity of SOF<sub>2</sub> accumulated during a 24 h period (in litres, see D.7.7).
- Calculate the ratio of accumulated SOF<sub>2</sub> to the volume of air in the equipment room (in ppmv, see D.7.1 for data).
- Compare this concentration with the TLV (see D.8.1) and express the result as a ratio  $R = C/\text{TLV}$ . If  $R < 1$ , then no health risk is expected.

The equation for calculation of the concentration of SOF<sub>2</sub> in the equipment room  $C$ , in ppmv, for a 24 h period is thus:

$$C = \frac{r \times E \times L \times 10^6}{V \times v \times p_f}$$

where

$r$  is the production rate in l/kJ;

$E$  is the arc energy, in kJ;

$L$  is the leakage rate, in l/day;

$V$  is the room volume, in l;

$v$  is the volume of the compartment of the electric power equipment, in l;

$p_f$  is the ratio of the SF<sub>6</sub> filling pressure (MPa absolute) referred to the atmospheric pressure.

The results of the example calculations for leakage situations (see D.7 for data) is given in Table D.2.

**Table D.2 – Results of example calculations for leakage situations**

Circuit-breaker	$V_1$ SO <sub>F</sub> <sub>2</sub> leaked l	$V$ Room volume l	$C$ SO <sub>F</sub> <sub>2</sub> concentration ppmv	TLV (NOTE) of SO <sub>F</sub> <sub>2</sub> ppmv	$R$
MV	$1,3 \times 10^{-6}$	$120 \times 10^3$	$11 \times 10^{-6}$	1,6	$6,8 \times 10^{-6}$
HV	$108 \times 10^{-6}$	$700 \times 10^3$	$154 \times 10^{-6}$	1,6	$96 \times 10^{-6}$

NOTE TLV: Threshold Limit Value: exposure levels based on repetitive 8 h exposure [28] (see D.8.1).

$V_1$  is the quantity leaked into the atmosphere in 24 h (see D.7.5, D.7.6 and D.7.7). The concentrations  $C$  are very much smaller than the TLV, as shown by the values of ratio  $R$ .

NOTE Extrapolation to longer accumulation times requires detailed data concerning the rate of air replacement due to ventilation.

#### D.4.5.1 Additional calculation to take account of the effects of SO<sub>F</sub><sub>2</sub> hydrolysis

In C.1.1, equation (9) describes the hydrolysis of SO<sub>F</sub><sub>2</sub> whereby SO<sub>2</sub> and HF are formed. This can occur when SO<sub>F</sub><sub>2</sub> remains in the presence of moisture for long periods of time, either inside the gas-filled compartment of the electric power equipment or in the atmosphere contained in the equipment room. Adsorbers maintain a low moisture level inside the gas-filled compartment, limiting the degree to which hydrolysis can occur prior to leakage. Normal ventilation prevents the accumulation of SO<sub>F</sub><sub>2</sub> in the atmosphere.

Assuming that inadequate ventilation does allow SO<sub>F</sub><sub>2</sub> to accumulate, it is necessary to consider the final products in evaluating any risk to health.

Each molecule of SO<sub>F</sub><sub>2</sub> involved in the hydrolysis reaction gives rise to one molecule of SO<sub>2</sub> and two molecules of HF. Thus, every mole of SO<sub>F</sub><sub>2</sub> gives rise to one mole of SO<sub>2</sub> and two moles of HF, each mole occupying the molar volume. Therefore, a given volume of SO<sub>F</sub><sub>2</sub> produces an equal volume of SO<sub>2</sub> and twice that volume of HF and the concentrations in a given room volume are similarly related. HF, however, is highly reactive and is unlikely to remain in the atmosphere for long enough for high concentrations to be reached.

HF and SO<sub>2</sub> are considered to have a similar effect on the human organism and for such a multi-component mixture; the sum  $R_{tot}$  of the individual ratios of concentration to TLV should not exceed unity.

$$R_{\text{tot}} = \frac{\text{SO}_2 \text{ concentration}}{\text{TLV (SO}_2)} + \frac{\text{HF concentration}}{\text{TLV (HF)}} \leq 1$$

NOTE This is a cautious assumption which results in the maximum permitted concentration of each component being lower than its TLV. It is adopted here in order to maintain a worst-case approach.

Assuming that all the SOF<sub>2</sub> undergoes hydrolysis and that all of the resultant SO<sub>2</sub> and HF remain in the atmosphere, the results of D.4.5 give the following values of R<sub>tot</sub>. The very low values of R<sub>tot</sub> (and of the individual ratios of concentration referred to the TLVs) indicate negligible risk.

**Table D.3 – Results for leakage situations taking account of SOF<sub>2</sub> hydrolysis**

Circuit-breaker	SOF <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>		HF		R <sub>tot</sub>
	Concentration ppmv	TLV ppmv (NOTE)	Concentration ppmv	TLV ppmv (NOTE)	Concentration ppmv	
MV	11 × 10 <sup>-6</sup>	2,0	11 × 10 <sup>-6</sup>	3,0	22 × 10 <sup>-6</sup>	12,6 × 10 <sup>-6</sup>
HV	154 × 10 <sup>-6</sup>	2,0	154 × 10 <sup>-6</sup>	3,0	308 × 10 <sup>-6</sup>	180 × 10 <sup>-6</sup>

NOTE The TLVs for SO<sub>2</sub> and HF are given in references [27] and [28].

#### D.4.6 Determination of concentrations due to leakage of S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>

The rates of decomposition of SF<sub>6</sub> in the presence of low-energy discharges are generally considered to be extremely low for normal service conditions, implying a negligible risk to health. For partial discharge (PD) and corona activity this is mainly due to the fact that the energies involved are extremely low; significant decomposition would only occur if the discharges were active during a prolonged period of time (weeks or months). Moreover:

- Partial discharge activity located inside solid insulators cannot affect the gas;
- SF<sub>6</sub> filled electric power equipment is generally corona free and any significant corona discharges detected usually originate outside the equipment, for example on bushings, etc;
- Standard PD testing procedures shields equipment for this type of discharge, as do radio interference measurements.

Arcing of high-voltage disconnectors has limited impact firstly because the overall energy per operation is low, secondly because the time between operations is very long in typical service conditions and thirdly because the peak arcing current is high.

However, regardless of the above, concern has been voiced as to the possible existence of S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> in electric power equipments because of its high relative toxicity [22], even though it is known to decay rapidly in practical situations [23].

In order to illustrate the extremely low health risk associated with S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> in practical situations, estimations are presented below for the three cases cited above. Severe scenarios have been adopted for each situation.

The precise values of discharge energy employed can be multiplied by many orders of magnitude without significantly modifying the conclusions. This provides a considerable margin of safety to allow for abnormally high discharge levels.

The approach to the calculations is similar for each case:

- It is assumed that the discharge activity forms unconditionally stable S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> which accumulates for 30 years inside the electric power equipment;

- This gas then leaks into the room containing the electric power equipment (700 m<sup>3</sup>) at the standard rate of 1 % per year ( $27 \times 10^{-6}$  per day);
- The quantity built up in 24 h is then estimated and the concentration  $C$  found is compared to the TLV, (0,01 ppmv) [28], to give the ratio  $R$ ;
- Ratios  $R$  much less than unity clearly imply that the risk to health would be negligible.

NOTE The decay rates reported in the references cited lead to S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> concentrations about 100 times smaller than those estimated here.

In the three cases studied, the calculated maximum concentrations built up are in the region of 5 orders of magnitude less than the TLV. This result implies that in practice there is no risk to health due to S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> produced in electric power equipments under low-energy discharge conditions of this nature. The decay of S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> in practical situations should greatly reduce the quantity accumulated, considerably reinforcing this conclusion. Furthermore, the calculations neglect any reduction in S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> production rates due to the presence of moisture.

#### D.4.6.1 Partial discharge situation

The following assumptions are made:

- The PD level in the gas is 5 pC;

NOTE 1 This is a typical maximum level used during acceptance testing of GIS.

- The number of discharges per cycle is high;

NOTE 2 All discharges have identical amplitudes and are assumed to be distributed uniformly over the voltage wave.

- The nominal voltage is 245 kV at a frequency of 50 Hz;
- The S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> production rate is  $0,2 \times 10^{-9}$  mol/J;

NOTE 3 S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> production rates for partial discharges under a.c. excitation are not available in the literature. This calculation is therefore based on an extrapolation of the results of spark discharge measurements.

- The discharges run continuously for 30 years and the S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> formed does not decay.

The results are shown in the following Table D.4. The quantity of S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> leaked during the 24 h period would be extremely small ( $88,3 \times 10^{-9}$  l), the concentration built up would be  $C = 126 \times 10^{-9}$  ppmv and the ratio  $R = C/TLV$  would be  $12,6 \times 10^{-6}$ .

**Table D.4 – Sample calculation of S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> concentration for partial discharges**

Charge transferred per discharge	$Q$	$5 \text{ to } 10^{-12} \text{ C}$
Number of discharges per cycle	$N$	20
Charge transferred per cycle	$Q = q \times n$	$0,1 \times 10^{-9} \text{ C}$
Rated voltage	$U_r$	245 kV
Energy dissipated per cycle	$E = Q \times U_r / \sqrt{3}$	$14,1 \times 10^{-6} \text{ J}$
Energy dissipated per second	$E_s = 50 \times E$	$0,707 \times 10^{-3} \text{ J}$
Energy dissipated per year	$E_y = 31,5 \times 10^6 \times E_s$	$22,3 \times 10^3 \text{ J}$
S <sub>2</sub> F <sub>10</sub> production rate	$R$	$0,2 \times 10^{-9} \text{ mole/J}$
S <sub>2</sub> F <sub>10</sub> produced per year	$P = r \times E_y$	$4,46 \times 10^{-6} \text{ mole}$
Volume S <sub>2</sub> F <sub>10</sub> in litres (per year)	$V = 24,45 \times P$	$109 \times 10^{-6} \text{ l}$
S <sub>2</sub> F <sub>10</sub> accumulated in 30 years	$U = 30 \times V$	$3,27 \times 10^{-3} \text{ l}$
S <sub>2</sub> F <sub>10</sub> leaked in 24 h	$v = 27 \times 10^{-6} \times U$	$88,3 \times 10^{-9} \text{ l}$
Concentration (700 m <sup>3</sup> room)	$C = v / (700 \times 10^3)$	$126 \times 10^{-9} \text{ ppmv}$
TLV for S <sub>2</sub> F <sub>10</sub>	TLV	0,01 ppmv

Ratio $R$	$R = C/TLV$	$12,6 \times 10^{-6}$
-----------	-------------	-----------------------

#### D.4.6.2 Corona situations

For discharge activity inside the electric power equipment, the following assumptions are made:

- The overall corona voltage (RIV) is 3  $\mu\text{V}$  measured across 300  $\Omega$ ;
- The rated voltage is 245 kV;
- The  $\text{S}_2\text{F}_{10}$  production rate is  $0,05 \times 10^{-9}$  mole/J.  $\text{S}_2\text{F}_{10}$  does not decay.

As shown by the following table, the  $\text{S}_2\text{F}_{10}$  leaked during the 24 h period would be about  $45 \times 10^{-9}$  l, the concentration  $C$  would be  $64 \times 10^{-9}$  ppmv and the ratio  $R = C/TLV$  would be  $6,4 \times 10^{-6}$ .

**Table D.5 – Sample calculation of  $\text{S}_2\text{F}_{10}$  concentration for corona discharges**

Corona voltage	$V_c$	$3 \times 10^{-6}$ V
Measurement impedance	$Z$	300 $\Omega$
Corona current	$I = V_c/Z$	$0,1 \times 10^{-9}$ C
GIS rated voltage	$U_r$	$245 \times 10^3$ V
Energy dissipated during one second	$E_s = I \times U_r / \sqrt{3}$	$14,1 \times 10^{-3}$ J
Energy dissipated per year	$E_y = 31,5 \times 10^6 E_s$	$44,5 \times 10^3$ J
$\text{S}_2\text{F}_{10}$ production rate	$R$	$0,05 \times 10^{-9}$ mole/J
$\text{S}_2\text{F}_{10}$ produced per year	$P_v = r \times E_y$	$2,2 \times 10^{-6}$ mole
$\text{S}_2\text{F}_{10}$ volume per year	$V = 24,45 \times P_y$	$54,4 \times 10^{-6}$ l
$\text{S}_2\text{F}_{10}$ accumulated in 30 years	$U = 30 V$	$1,63 \times 10^{-3}$ l
$\text{S}_2\text{F}_{10}$ leaked in 24 h	$v = 27 \times 10^{-6} \times U$	$44,7 \times 10^{-9}$ l
Concentration (700 m <sup>3</sup> room)	$C = V / (700 \times 10^3)$	$63,8 \times 10^{-9}$ ppmv
TLV for $\text{S}_2\text{F}_{10}$	TLV	0,01 ppmv
Ratio $R$	$R = C/TLV$	$6,4 \times 10^{-6}$

#### D.4.6.3 Disconnecter sparking

The following assumptions are made:

- The disconnector operates 200 times per year. The energy per operation is 0,25 kJ;

NOTE 1 The average values used are: arc voltage, 1 kV and capacitive current, 0,25 A. The arc duration is 1 s.

- The production rate is  $0,05 \times 10^{-9}$  mole/J and the  $\text{S}_2\text{F}_{10}$  formed does not decay.

NOTE 2 The individual arcs during disconnector sparking can have peak currents of up to 3 kA but last only a few tens of microseconds. In the absence of published data, the production rate chosen reflects this situation being at the lower end of the spark discharge range but more than 2 000 times greater than for high power arcs.

As shown by the following table, the  $\text{S}_2\text{F}_{10}$  leaked during the 24 h period would be  $50 \times 10^{-9}$  l, the concentration built up would be  $C = 72 \times 10^{-9}$  ppmv and the ratio  $R = C/TLV$  would be  $7,2 \times 10^{-6}$ . These theoretical estimates have been confirmed as being realistic by measurements on a real disconnector under highly accelerated operation conditions [23].

**Table D.6 – Sample calculation of S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> concentration for disconnecter sparking**

Energy per operation	$E_0 = I \times u \times t$	0,25 kJ
Energy dissipated per year	$E_y = 200 E_0$	50 kJ
Production rate S <sub>2</sub> F <sub>10</sub>	$R$	$0,05 \times 10^{-9}$ mole/J
S <sub>2</sub> F <sub>10</sub> produced per year	$P_y = r \times E_y$	$2,5 \times 10^{-6}$ mole
S <sub>2</sub> F <sub>10</sub> volume per year	$V = 24,45 \times P$	$61 \times 10^{-6}$ l
S <sub>2</sub> F <sub>10</sub> accumulated in 30 years	$U = 30 \times V$	$1,8 \times 10^{-3}$ l
S <sub>2</sub> F <sub>10</sub> leaked in 24 h (litres)	$V = 27,4 \times 10^{-6} \times U$	$50 \times 10^{-9}$ l
Concentration (700 m <sup>3</sup> room)	$C = V / (700 \times 10^3)$	$72 \times 10^{-9}$ ppmv
TLV for S <sub>2</sub> F <sub>10</sub>	TLV	0,01 ppmv
Ratio $R$	$R = C/TLV$	$7,2 \times 10^{-6}$

#### D.4.7 Determination of concentration due to internal fault

An internal fault does not necessarily cause SF<sub>6</sub> to be released. The only situations in which a release will occur are:

- Failures provoking over-pressure relief operation or gas-filled compartment opening;
- Internal fault situations provoking arc burn-through of the gas-filled compartment.

The assumptions made for these situations, in addition to those given in D.4.1, are as follows:

- The totality of gaseous by-products formed is rapidly exhausted into the surrounding air;
- The very strong convective and gas blast forces induce rapid mixing of the emitted gas with the air in the equipment room;
- The SOF<sub>2</sub> generated is assumed to be stable during the time period of interest.

The SOF<sub>2</sub> concentration in the equipment room air is calculated as follows for each situation. Data and intermediate results are given in D.7 as indicated for each step:

- Calculate the arc energy  $E$ , in kJ (see D.7.3.2);
- Calculate the quantity  $V_f$  of SOF<sub>2</sub> formed in l (from production rates,  $r$ , in l/kJ, see D.7.4 and D.7.5);
- Calculate the volume of the equipment room  $V$ , in l (see D.7.1).
- Calculate the ratio  $C$  of SOF<sub>2</sub> volume/equipment room volume, in ppmv.
- Compare this SOF<sub>2</sub> concentration to the momentary exposure limit  $C_m$  for SOF<sub>2</sub>. The basic equation for room concentration  $C$  of SOF<sub>2</sub> in volume ppmv is thus:

$$C = \frac{r \times E \times 10^6}{V}$$

Results of example calculations for internal fault situations (see D.7 for data) are given in Table D.7.

**Table D.7 – Sample calculation of SOF<sub>2</sub> concentrations for internal fault situations**

Internal fault	V <sub>f</sub>	V	C	C <sub>m</sub> (NOTE 1) for SOF <sub>2</sub> ppmv
	SOF <sub>2</sub> formed l	Room volume l	SOF <sub>2</sub> concentration ppmv	
245 kV GIS	60	2 000 x 10 <sup>3</sup>	30	500
145 kV GIS	95	700 x 10 <sup>3</sup>	135	500
MV GIS	11,3	120 x 10 <sup>3</sup>	94	500
MV CB	1.9	120 x 10 <sup>3</sup>	15	500
MV RMU (Note 2)	3,0	30 x 10 <sup>3</sup>	100	500
NOTE 1 For C <sub>m</sub> , see D.4.2.2.				
NOTE 2 In this case the room volume is small, see D.4.3.1.				

#### D.4.7.1 Estimate of the relative contributions of by-product

Arc decomposed SF<sub>6</sub> is a multi-component product. The relative contribution of each component to the risk of exposure should be evaluated by dividing the concentration C of that component by the corresponding permissible level (TLV, IDLH, etc.). The smaller the ratio found, the lower the contribution to overall toxicity. Comparing the ratios obtained for the different components indicates their relative importance. This is illustrated by considering the results obtained for the well-known by-products SOF<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> and S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> for which reliable data are available [22], [26], and [28].

NOTE 1 The production rates used are SOF<sub>2</sub>: 3,7 ml/kJ; SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>: 0,06 ml/kJ; S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>: 2,4 × 10<sup>-6</sup> ml/kJ. The TLVs are SOF<sub>2</sub>: 1,6 ppmv; SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>: 5 ppmv and S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>: 0,01 ppmv. For short-term exposure, C<sub>m</sub> for SOF<sub>2</sub> is 500 ppmv; the IDLH values are SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>: 1 000 ppmv and S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>: 1,0 ppmv [26].

NOTE 2 The experimental conditions used in obtaining the production rate data differ between researchers. The orders of magnitudes are nevertheless thought to be comparable for the purpose of these estimations.

Applying the method of D.4.7 to the medium-voltage circuit-breaker example yields the following C/TLV ratios:

$$\text{SOF}_2 = 9,3 \qquad \text{SO}_2\text{F}_2 = 0,05 \qquad \text{S}_2\text{F}_{10} = 0,001$$

For short-term exposures, the ratios shown below are calculated as C/C<sub>m</sub> for SOF<sub>2</sub> and as C/IDLH for the other by-products:

$$\text{SOF}_2 = 3,0 \times 10^{-2} \qquad \text{SO}_2\text{F}_2 = 2,5 \times 10^{-4} \qquad \text{S}_2\text{F}_{10} = 4,0 \times 10^{-5}$$

Both cases clearly show the negligible contribution of S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> and above all, the dominance of SOF<sub>2</sub>.

Even a variation of two orders of magnitude in the S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> production rate has no influence on this conclusion. Although S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> may exist in arc decomposed SF<sub>6</sub>, its high toxicity is greatly offset by the extremely small quantities formed. Its presence may thus be neglected in so far as overall toxicity is concerned.

#### D.4.7.2 Contribution of metallic vapours

During high power fault arcing in any medium, the energy dissipated at the electrodes by the arc roots melts and evaporates large quantities of metal. In the event of an internal fault leading to the opening of the gas-filled compartment, most of the fumes formed will be expelled into the equipment room and will constitute a contribution to the overall toxicity.

As a first approximation, the upper limit of this contribution can be estimated by assuming all the energy injected from the arc roots to go to heating, melting, and then evaporating the metal which is then exhausted into the room. The results can then be compared with experimental arc erosion data to check the orders of magnitude.

This treatment is however not valid for high-voltage burn-through situations due to the strong exothermic reactions which occur between aluminium vapour and SF<sub>6</sub> and which further increase vapour production. Overlooking this would give rise to a gross under-estimation of the amount of metal vapour produced for a given arc energy.

The following comments apply to the results of these calculations:

- For internal faults the contribution of arc decomposed SF<sub>6</sub> should not automatically be assumed to dominate the overall toxicity of the atmosphere. Regardless of the approximate nature of this calculation, it indicates that, for both medium-voltage situations of D.4.4, copper fumes may dominate the overall toxicity.
- This conclusion can be seen to remain valid even if only 10 % of the energy dissipated at the arc roots goes to vapour formation, or if 90 % of the vapour formed is condensed or transformed inside the electric power equipment.
- Similar safety precautions should therefore be applied to all electric power equipment, regardless of the insulation medium. It may well be advisable to build these safety precautions around a solid understanding of metal vapour generation rather than on SF<sub>6</sub> decomposition values.

This treatment ignores the presence of chemical reactions between the metal vapour and the insulating gas.

In the absence of more reliable methods, the following approximate treatment has the merit of highlighting a potential major contributor to overall toxicity in an internal arc situation involving any type of switchgear or controlgear.

The procedure followed for estimating the absolute maximum contribution of copper fumes to toxicity is as follows; it assumes all the energy dissipated by the arc roots to go to metal vapour formation:

- The total anode plus cathode voltage drop is taken as about 30 V. This gives an energy injected into the electrodes of 75 kJ and 96 kJ respectively for the medium-voltage circuit-breaker and RMU of D.4.4, cases i) and j).
- The energy required to transform one mole of copper, initially at room temperature, into vapour has been calculated to be 390 kJ.
- Comparing the above values gives upper limits for the quantities of vapour formed in each case as 0,19 moles for the medium-voltage circuit-breaker and 0,25 moles for the RMU.
- Based on a molecular weight of 64 g/mole for copper, these values correspond to 12 g and 15,8 g of evaporated metal respectively.
- This represents erosions of about 1,4 cm<sup>3</sup> and 1,8 cm<sup>3</sup> of metal which is reasonable given the arc energies involved.
- These values are about 40 % higher than those extrapolated from experimental data obtained for multiple-shot, 4 kA tests, which give erosion rates between 2,5 mg/A/s and 4,5 mg/A/s copper electrodes.
- Employing the equipment room volumes given in D.7.1 of 120 m<sup>3</sup> and 30 m<sup>3</sup> respectively, final concentrations of about 100 mg/m<sup>3</sup> and 520 mg/m<sup>3</sup> are obtained.
- This is compared to the TLV of copper of 0,2 mg/m<sup>3</sup> [28].

NOTE These results, using approximate data and methods, have been derived theoretically and have not been substantiated practically.

#### **D.4.7.3 Contribution due to the combustion of plastics**

This subject has not been treated as such, being outside the general scope of this report. However, the highly significant potential toxic contribution of these elements justifies their consideration. The combustion of plastic materials, such as wire insulation, following an internal fault, will produce a variety of toxic fumes, independent of the technology which the electric power equipment is based on.

As an example, the case of polyvinyl chloride (PVC) will be considered. The TLV for vinyl chloride is 1 ppmv = 2,6 mg/m<sup>3</sup> [28]. This means that the full vaporisation of only 8 g will raise the atmospheric concentration of a 30 m<sup>3</sup> room to 100 times the TLV. For a 120 m<sup>3</sup> room, 32 g of PVC will give the same result. This represents the insulation of 1,2 m of standard 1 mm diameter wire.

A normal medium-voltage equipment room can contain several km of wire of these dimensions, comprising about 7 kg of PVC per km.

These estimations can be carried out for each of the plastic materials susceptible to combustion during an internal fault. The preceding observations indicate that the contribution of fumes due to the combustion of plastics should not be ignored and that exposure to such fumes should be kept as low as is reasonably practicable.

The conclusion is that the presence of SF<sub>6</sub> in electric power equipment adds little to the toxicity of the atmosphere generated by an internal fault. This was indeed the conclusion drawn by a study carried out in 1987 [6].

Procedures and regulations should not thus single out electric power equipment using SF<sub>6</sub> as requiring separate treatment.

NOTE PVC vapours react with other products in the atmosphere to produce less toxic by-products. The above is hence a worst-case situation.

### **D.5 Assessment of results**

#### **D.5.1 Leakage situations**

The by-products, formed by arcing and by low-energy discharges, released due to leakage from SF<sub>6</sub>-filled electric power equipments, reach negligible concentrations in the workplace atmosphere. Under worst-case conditions the concentrations found for both medium-voltage and high-voltage cases are 4 orders of magnitude lower than the TLVs.

There is no cause for concern and no need for precautions other than the normal ventilation practices for low-lying areas. This conclusion is reinforced in consideration of the initial simplifying assumptions made in D.4.1.

Even in the case of abnormal leakage situations (a leakage rate for example 3 orders of magnitude higher than the normal rate), these conclusions are unchanged.

#### **D.5.2 Internal fault**

To illustrate these cases, five rare but plausible situations covering the medium- and high-voltage spectrum have been chosen. In the most severe of these situations, the equipment room concentrations of SOF<sub>2</sub> remain below the momentary exposure limit C<sub>m</sub> (see D.4.2).

In any situation of this sort, basic safety procedures include evacuation rules designed to ensure that personnel are not exposed to exhausted materials for more than a few minutes. Furthermore, forced ventilation and/or venting ensure the reduction of the concentration levels

to much lower values within minutes. The added safety margins inherent in the application of either or both of the above are considerable.

Therefore simple safety procedures will ensure that the practical exposure will be momentary and that the health of personnel will not be jeopardised.

### D.5.3 Outdoor installations

Both for leakage and failure cases the calculations are carried out in an identical manner as above, but in this case the volume of air into which the arc decomposed SF<sub>6</sub> escapes is large if not infinite. Prevailing winds and the high exhaust velocity also speed up dispersion. Clearly, for the cases of leakage, the concentrations obtained will be infinitesimal. For the internal fault cases, within seconds the concentrations will fall well below the TLV values.

In conclusion no health risk is to be expected due to the toxicity of by-product emission from outdoor electric power equipment.

## D.6 Conclusions

The results of the sample calculations, based on the state-of-the-art, show that, for leakage situations, there is no risk to health due to exposure to by-products.

The results also show that, in the unlikely event of an internal fault leading to a release of SF<sub>6</sub>, significant concentrations of by-products can occur in an equipment room. However, the calculated concentrations do not exceed a substantiated limit for short-term exposure.

It is thus concluded that, as long as safety procedures are followed, there is minimal risk specifically associated with the use of SF<sub>6</sub> in electric power equipment.

It has also been stressed that in any internal fault situation, corrosive and/or toxic fumes are produced whether or not SF<sub>6</sub> is present. In cases where these fumes enter the ambient atmosphere of the switchgear room, it has been shown that non-SF<sub>6</sub> related arc products are likely to be the dominant contributors to overall toxicity. This further strengthens the view that the use of SF<sub>6</sub> in electric power equipment does not significantly add to the risks associated with an internal fault.

## D.7 Data for calculations

### D.7.1 Typical volumes for the equipment rooms

245 kV GIS hall (7 bays): 25 m × 12 m × 6,5 m = 2 000 m<sup>3</sup>

145 kV GIS hall (7 bays): 12,5 m × 8 m × 7 m = 700 m<sup>3</sup>

MV distribution hall (used for CB and MV GIS cases) (15 circuit-breaker panels):  
10 m × 4 m × 3 m = 120 m<sup>3</sup>

MV RMU room (1 ring main unit) (see also D.4.3.1): 4 m × 3 m × 2,5 m = 30 m<sup>3</sup>

### D.7.2 Switchgear and controlgear volume and filling pressure

Table D.8 – Switchgear volume and filling pressure

	Volume l	Pressure MPa absolute
Medium-voltage circuit-breaker	45	0,3

	Volume l	Pressure MPa absolute
Medium-voltage RMU	200	0,1
Medium-voltage GIS	1 000	0,1
High-voltage circuit-breaker	500	0,5
GIS bus-bar	2 000	0,3

### D.7.3 Arcing characteristics

#### D.7.3.1 Fault current interruption/leakage situation

Arc energy figures are totals for three interruptions of three-phase fault current, i.e. nine times the value for one single-phase interruption.

**Table D.9 – Arc energies for interruptions**

	$I$ kA	$U_{arc}$ V	$T_{arc}$ ms	$9 \times E_{arc}$ kJ
Medium-voltage circuit-breaker	31,5	200	15	851
High-voltage circuit-breaker	31,5	500	15	2 126

#### D.7.3.2 Internal fault/exhaust situation

Arc energy figures are for  $N$  simultaneous arcs. The number of arcs has been chosen to represent the most likely internal fault situation.

**Table D.10 – Arc energies for internal faults**

	$I$ kA	$U_{arc}$ V	$T_{arc}$ ms	$N$	$E_{arc}$ kJ
245 kV GIS	40	1 000	100	1	4 000
145 kV GIS	31,5	1 000	100	2	6 300
Medium-voltage GIS	25	300	100	1	750
Medium-voltage circuit-breaker	25	200	100	1	500
Medium-voltage RMU	16	250	100	2	800

The values for arc time represent a compromise between real arcing times, rupture-disk operation, and burn-through, constancy of the arcing environment and validity domain of available production rate data. Linear extrapolation above about twice these values is thus expected to grossly overestimate the results (see D.4.3.2).

### D.7.4 SOF<sub>2</sub> production rates

The quantity of gas formed during an electrical discharge is quoted generally as a quantity generated per joule of energy dissipated (the production rate,  $r$ ).

Experimentally determined SOF<sub>2</sub> production rates depend on the electrode material used and the type of discharge considered. Exothermic reactions, which occur with aluminium electrodes, seem to enhance the production rate.

Experimental results are generally quoted in mol/J but in most practical cases it is more convenient to convert this to l/kJ. This conversion is effected using the fact that one mole of any gas occupies 24,45 l, at 25 °C and at atmospheric pressure.

The values used here have been averaged over the range of presently available data found in the literature [21] and [25].

**Table D.11 – SOF<sub>2</sub> production rates**

Electrode material	SOF <sub>2</sub> production rate(r)	
	mol/J	l/kJ
Cu, Fe, WCu	$150 \times 10^{-9}$	$3,7 \times 10^{-3}$
Al	$150 \times 10^{-9}$	$15 \times 10^{-3}$
NOTE Aluminium electrodes are assumed only for GIS bus-bar situations.		

#### D.7.5 Quantity of SOF<sub>2</sub> formed

This is found from arc energy and production rates.

**Table D.12 – Quantities of SOF<sub>2</sub> formed**

	Medium-voltage		High-voltage	
	mol	l at 0,1 MPa	mol	l at 0,1 MPa
Leakage	0,13	3,15	0,319	7,87
Internal fault				
245 kV GIS			2,4	60
145 kV GIS			3,8	95
MV GIS	0,45	11,25		
MV CB	0,075	1,9		
MV RMU	0,12	3,0		

#### D.7.6 Leakage rates

Leakage rates for sealed-for-life electric power equipments are given as SF<sub>6</sub> volume lost per second per bar gauge of filling pressure.

For refillable electric power equipments the leakage rate is given as a percentage of total gas loss per year.

Typical values for three-phase circuit-breakers are given below with conversion into total leaked SF<sub>6</sub> per day (24 h) and, for the medium-voltage case, per bar MPa of filling pressure.

**Table D.13 – SF<sub>6</sub> leakage rates**

	MV breaker	HV breaker
Basic rate	$3 \times 10^{-6}$ cm <sup>3</sup> /s/MPa gauge	0,5 % total SF <sub>6</sub> volume l/year
Daily rate	$27 \times 10^{-5}$ l/day/MPa gauge	$13,7 \times 10^{-6} \times (\text{SF}_6 \text{ vol})$ l/day

### D.7.7 SOF<sub>2</sub> leakage rates (using data from D.7.5 and D.7.6)

Table D.14 – SOF<sub>2</sub> leakage rates

	MV breaker	HV breaker
Volume SOF <sub>2</sub> formed (litres at 0,1 MPa absolute)	3,15	7,87
Total volume of SF <sub>6</sub> (litres at 0,1 MPa absolute)	135	2 500
SOF <sub>2</sub> /SF <sub>6</sub> ratio inside circuit-breaker	2,33 % by vol.	0,31 % by vol.
Filling pressure (MPa absolute)	0,3	0,5
Leakage SOF <sub>6</sub> (litres per day) (see NOTE)	$1,26 \times 10^{-6}$	$107,8 \times 10^{-6}$
NOTE This is the amount of SOF <sub>2</sub> accumulated after 24 h leakage in a non-ventilated room.		

## D.8 Exposure limits

Terms used to define tolerable exposure limits can be separated into two groups:

- those intended to specify conditions under which a person can work continuously with no protective equipment, for example, Threshold Limit Value (TLV);
- those used to specify exceptional or abnormal situations of momentary exposure under which a person should leave the room, for example, Immediately Dangerous to Life or Health (IDLH).

### D.8.1 TLV – Threshold limit value

The Threshold Limit Value (TLV) is a term instigated by the American Conference of Industrial Hygienists (ACGIH). It refers to the maximum concentration of an element or substance, considered physiologically and physically acceptable during a specified exposure period.

The threshold limit value, time weighted average (TLV-TWA) is the time weighted average concentration at which a person can work for 8 h a day, 40 h a week with no adverse health effects. The averaging allows for instantaneous concentration levels of several times the TLV-TWA. Throughout this report the TLV-TWA is referred to simply as TLV and all references to TLV should be taken to mean TLV-TWA.

#### D.8.1.1 TLV for SOF<sub>2</sub>

The official allowable workplace concentration of SOF<sub>2</sub> for full-time occupation (TLV) is expressed in terms of its fluoride content [27] and [28] as TLV = 2,5 mg of fluoride F/m<sup>3</sup> of air at 25 °C and atmospheric pressure.

This corresponds to 5,66 mg/m<sup>3</sup> of SOF<sub>2</sub> in air at 25 °C and atmospheric pressure.

Expressed as a volume-per-volume atmospheric concentration of SOF<sub>2</sub> as TLV = 1,6 ppmv.

NOTE 1 The TLV for SOF<sub>2</sub> has been quoted as 0,65 ppmv in certain publications. It appears that this value has been derived using the molecular weight of SOF<sub>2</sub> (86,1) rather than that of its fluoride content (2 x 19).

NOTE 2 The conversion is obtained by calculating the mass of SOF<sub>2</sub> (per 1 m<sup>3</sup> of air) which corresponds to the TLV, expressed as 2,5 mg of fluoride F/m<sup>3</sup> of air. The molecular weight ratio of SOF<sub>2</sub> to its fluoride content is  $86,1 / (2 \times 19) = 2,266$ ; the mass of SOF<sub>2</sub> in 1 m<sup>3</sup> of air at the TLV is thus  $2,5 \times 2,266 = 5,66$  mg SOF<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.

NOTE 3 The conversion from mg/m<sup>3</sup> to ppmv is carried out by multiplying by the molar volume (24,45 l at 25 °C) and dividing by the molecular weight (86,1 g/mol) [28].

**D.8.2 IDLH – Immediately dangerous to life or health**

This value of concentration is one from which a person can escape with no irreversible health effects, as long as the exposure does not exceed 30 min. [28].

## Bibliography

- [1] CIGRE WG B3.02 TF SF<sub>6</sub>, Guide for the preparation of customised “Practical SF<sub>6</sub> handling instructions”, CIGRE brochure N. 276, 2005
- [2] KEMA, SF<sub>6</sub> Safety Regulations, internal document for use in laboratories, 1982
- [3] The Electricity Association, Engineering Recommendation G69, UK, 1988
- [4] Standards Association of Australia, Recommendations for the handling of contaminated SF<sub>6</sub> gas and associated arc by-products in or from electrical equipment, AS-2791, 1989
- [5] G. Mauthe, K. Pettersson, et al., Handling of SF<sub>6</sub> and its by-products in gas insulated switchgear (GIS), *Electra* No. 136, June 1991, pp 69-89 and No. 137, August 1991, pp 81-108, 1991
- [6] KEMA, Het gebruik van middenspanning installaties met SF<sub>6</sub> als isolatie en/of blusmedium, report No. 00067-DZO 87-1002, 17 February 1987 (in English)
- [7] J.A.J. Pettinga, Gaslekzoekapparatuur toegepast voor het meten van SF<sub>6</sub> concentraties in lucht. *Electrotechniek* 68, 1990
- [8] J.A.J. Pettinga, Studie naar de mogelijkheid van ruimtebewaking in onderstations waarin SF<sub>6</sub> schakel-materiaal is opgesteld, n.v. KEMA report, 1986
- [9] Sulphur Hexafluoride brochure (Solvay Fluor, 2006)
- [10] R. J. Lewis Sr., *Sax's Dangerous Properties of Industrial Materials*, 11<sup>th</sup> edition, John Wiley and Sons Inc., Hoboken NJ, United States, 2004
- [11] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Third Assessment Report: Climate Change 2001, edited by R. T. Watson and the Core Writing Team (Eds.), <http://www.ipcc.ch/pub/reports.htm>, 2001
- [12] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>, 2006
- [13] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, edited by J. T. Houghton et al. (Cambridge University Press, Cambridge, 1996).
- [14] ISO 14040, Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework, 2006
- [15] S. Wartmann and J. Harnisch, Reductions of SF<sub>6</sub> emissions from high and medium voltage electrical equipment in Europe, Ecofys GmbH, Nurnberg, Germany, 2005
- [16] K. Yokotsu, Y. Ichikawa et al., Recent practice for huge reduction of SF<sub>6</sub> gas emission from GIS & GCB in Japan, CIGRE SC A3 & B3 Joint Colloquium and Tutorial in Japan, 26<sup>th</sup> – 28<sup>th</sup> Sep 2005, Tokyo, Japan, 2005
- [17] United States Environmental Protection Agency (EPA), Global Anthropogenic Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020, Washington DC, United States, 2006
- [18] United States Environmental Protection Agency (EPA), Global Mitigation of Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gases, Washington DC, United States, 2006
- [19] CIGRE WG B3-02, Template for Voluntary agreement on the use of SF<sub>6</sub> and on measures for SF<sub>6</sub> emission reduction in the national, regional electric industry, 2003

- [20] CRADA, Cooperative Research and Development Agreement, Investigation of  $S_2F_{10}$  production and mitigation in compressed  $SF_6$  insulated power system, Technical Note No. 1, 22, December 1992
- [21] F.Y. Chu,  $SF_6$  Decomposition in gas insulated equipment, IEEE Trans, on Elec. Insul., EL-21, No. 5, October 1986
- [22] R.J. Van Brunt, J.K. Olthoff, et al., Production of  $S_2F_{10}$  by electrical discharge in  $SF_6$ . I.H.S. 1992, Swansea, U.K., Vol. 1, p. 418, 1992
- [23] H.D. Morrison, V.P. Cronin, et al. Production and decay of  $S_2F_{10}$  in a disconnect switch, 7th Int. Sym. Gaseous Dielectrics, Knoxville, TE, USA, 1994
- [24] L. Niemeyer,  $S_2F_{10}$  in  $SF_6$  insulated equipment, 7th Intern. Sympos. on Gaseous Dielectrics, Knoxville TE, USA, 1994
- [25] B. Belmadani, et al.,  $SF_6$  decomposition under power arcs, physical aspects, IEEE Trans. on Elec. Ins., Vol. 26, No. 6, 1991
- [26] R. Truhault, C. Boudène, et al., Toxicité de quelques dérivés gazeux fluor et oxyfluors du soufre, Archives des maladies professionnelles de Médecine du Travail et de la Sécurité Sociale (Paris), T34, No. 10-11, October-November (pp 581-591), Translation available, 1973
- [27] Documentation of the threshold limit values and biological exposure indices, 5<sup>th</sup> ed. Cincinnati, OH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Inc., 1986, 5: 272, 1986
- [28] NIOSH pocket guide to chemical hazards, U.S. Department of Health and Human Services Publications Dissemination. DSDTT National Institute for Occupational Safety and Health, 4676 Colombia Parkway, Cincinnati, Ohio 45226, USA
- [29] IEC 60050-601, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 601: Generation, transmission and distribution of electricity – General*
- [30] IEC 60695-7-1, *Fire hazard testing – Part 7: Guidance on the minimization of toxic hazard due to fires involving electrotechnical products – Section 1: General*
- [31] IEC 62271-200, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV*
- [32] IEC 62271-201, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 201: AC insulation-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV*
- [33] IEC 62271-203, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 203: Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV*
-

## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	82
INTRODUCTION.....	84
1 Domaine d'application .....	85
2 Références normatives.....	85
3 Termes et définitions .....	85
4 Stockage et transport du SF <sub>6</sub> .....	88
4.1 Stockage des conteneurs remplis de SF <sub>6</sub> .....	89
4.2 Transport des conteneurs remplis de SF <sub>6</sub> .....	90
4.3 Stockage et transport de l'appareillage électrique contenant du SF <sub>6</sub> .....	91
4.4 Responsabilités.....	92
5 Sécurité et premiers soins.....	92
5.1 Règles générales de sécurité .....	92
5.1.1 Protection du personnel.....	93
5.1.2 Manipulation de matériels et d'outils de sécurité contaminés .....	94
5.1.3 Matériels et outils ou dispositifs de mesure sous pression .....	95
5.1.4 Equipement de sécurité et de protection individuelle .....	95
5.1.5 Equipements et services.....	96
5.2 Mesures de sécurité supplémentaires dans le cas d'un échappement anormal de SF <sub>6</sub> dû à un feu extérieur ou à un arc lié à un défaut interne .....	97
5.3 Equipements et traitement de premiers soins .....	98
5.3.1 Irritation de la peau .....	98
5.3.2 Irritation des yeux.....	98
5.3.3 Difficultés respiratoires.....	98
6 Formation et certification .....	98
6.1 Généralités.....	98
6.2 Modules de formation.....	99
6.2.1 Module A – Sensibilisation.....	99
6.2.2 Module B1: Maintenance n'impliquant pas de récupération du gaz .....	100
6.2.3 Module B2 – Installation et mise en service .....	100
6.2.4 Module C1 – Maintenance impliquant la récupération du gaz.....	101
6.2.5 Module C2 – Mise hors service de l'appareillage électrique en fin de vie .....	101
6.3 Certification.....	102
7 Manipulation du SF <sub>6</sub> au cours de l'installation et de la mise en service.....	102
7.1 Evacuation, remplissage et vérification de la qualité du SF <sub>6</sub> après remplissage.....	102
7.2 Remplissage des compartiments pré-remplis de SF <sub>6</sub> à la pression/densité assignée .....	104
7.3 Systèmes à pression scellés .....	106
8 Manipulation du SF <sub>6</sub> tout au long de la durée de vie normale.....	106
8.1 Nouvelle opération de remplissage du SF <sub>6</sub> à la pression/densité nominale.....	106
8.2 Vérification de la qualité du SF <sub>6</sub> .....	107
8.2.1 Evaluation de la qualité du SF <sub>6</sub> au moyen d'appareils mobiles.....	108
8.2.2 Echantillonnage et transport du SF <sub>6</sub> pour une analyse hors site .....	109
9 Récupération et régénération du SF <sub>6</sub> au cours des opérations de maintenance.....	110

9.1	Récupération et régénération du SF <sub>6</sub> contenu dans tout compartiment de systèmes à pression entretenue et/ou autonome contenant du SF <sub>6</sub> très faiblement ou faiblement décomposé.....	110
9.2	Récupération et régénération du SF <sub>6</sub> contenu dans tout compartiment de systèmes à pression entretenue et/ou autonome contenant du SF <sub>6</sub> fortement décomposé.....	112
10	Démontage de l'appareillage électrique contenant du SF <sub>6</sub> en fin de vie.....	114
10.1	Fin de vie des systèmes à pression entretenue et/ou autonome.....	115
10.2	Fin du cycle de vie des systèmes à pression scellés.....	115
10.3	Récupération et régénération du SF <sub>6</sub> en fin de vie des systèmes à pression scellés.....	116
10.4	Démontage de l'appareillage électrique en fin de vie.....	118
10.5	Produits de décomposition en fin de vie.....	119
11	Description des appareils de manipulation du SF <sub>6</sub> .....	120
11.1	Groupe de récupération.....	120
11.1.1	Pré-filtres externes et internes.....	121
11.1.2	Filtres.....	121
11.1.3	Pompe à vide.....	122
11.1.4	Compresseurs principal et auxiliaire.....	123
11.1.5	Conteneurs de stockage de gaz externes et internes.....	123
11.1.6	Évaporateur et appareil de chauffage des conteneurs de stockage de gaz.....	123
11.1.7	Conduites de gaz et raccord de tuyauteries.....	124
11.1.8	Instruments de contrôle.....	124
11.1.9	Soupapes de sûreté.....	124
11.2	Raccords de tuyaux flexibles.....	124
11.3	Dispositifs mobiles de mesure de gaz.....	124
11.3.1	Appareil de mesure du point de rosée.....	125
11.3.2	Dispositif de mesure du pourcentage de SF <sub>6</sub> .....	125
11.3.3	Tubes à réactions sensibles au SO <sub>2</sub> .....	125
11.3.4	Détecteurs de SF <sub>6</sub> mobiles.....	126
11.3.5	Systèmes de détecteurs de SF <sub>6</sub> à alarme.....	126
11.4	Bouteille pour échantillons de gaz.....	127
Annexe A (informative)	Hexafluorure de soufre.....	128
Annexe B (informative)	Effets du SF <sub>6</sub> sur l'environnement.....	132
Annexe C (informative)	Produits de décomposition du SF <sub>6</sub> .....	135
Annexe D (informative)	Effets potentiels sur la santé des produits de décomposition contenant du SF <sub>6</sub> .....	139
Bibliographie.....		159
Figure 1 – Mise en service ou nouvelle mise en service des compartiments sous SF <sub>6</sub> .....		103
Figure 2 – Remplissage des compartiments pré-remplis de SF <sub>6</sub> à la pression/densité assignée.....		105
Figure 3 – Nouvelle opération de remplissage du SF <sub>6</sub> à la pression/densité nominale.....		107
Figure 4 – Vérification de la qualité du SF <sub>6</sub> sur le site.....		108
Figure 5 – Échantillonnage et transport du SF <sub>6</sub> .....		109
Figure 6 – Récupération et régénération du SF <sub>6</sub> contenu dans tout compartiment de systèmes à pression entretenue et/ou autonome contenant du SF <sub>6</sub> très faiblement et/ou faiblement décomposé.....		111

Figure 7 – Récupération et régénération du SF <sub>6</sub> contenu dans tout compartiment de systèmes à pression entretenue et/ou autonome contenant du SF <sub>6</sub> fortement décomposé .....	113
Figure 8 – Fin du cycle de vie des systèmes à pression entretenue et/ou autonome .....	115
Figure 9 – Fin de vie des systèmes à pression scellés .....	116
Figure 10 – Récupération et régénération du SF <sub>6</sub> en fin vie des systèmes à pression scellés .....	117
Figure 11 – Démontage de l'appareillage électrique.....	119
Figure 12 – Groupe de récupération polyvalent.....	121
Figure A.1 – Caractéristiques pression/température/densité du SF <sub>6</sub> [9].....	129
Tableau 1 – Méthodes de stockage du SF <sub>6</sub> .....	89
Tableau 2 – Types de conteneurs et étiquetage requis pour le stockage et le transport du SF <sub>6</sub> .....	90
Tableau 3 – Règlements internationaux applicables au transport du SF <sub>6</sub> .....	91
Tableau 4 – Mesures à appliquer pour toute tâche exécutée sur un appareillage électrique contenant du SF <sub>6</sub> .....	92
Tableau 5 – Mesures de sécurité à appliquer lors de l'ouverture et/ou de l'accès dans les compartiments.....	94
Tableau 6 – Solutions neutralisantes .....	95
Tableau 7 – Mesures de sécurité supplémentaires.....	97
Tableau 8 – Mise en service ou nouvelle mise en service de compartiments sous SF <sub>6</sub> .....	104
Tableau 9 – Remplissage des compartiments pré-remplis de SF <sub>6</sub> à la pression/densité assignée .....	106
Tableau 10 – Nouvelle opération de remplissage du SF <sub>6</sub> à la pression/densité nominale.....	107
Tableau 11 – Vérification de la qualité du SF <sub>6</sub> sur le site .....	108
Tableau 12 – Echantillonnage et transport du SF <sub>6</sub> .....	110
Tableau 13 – Récupération et régénération du SF <sub>6</sub> contenu dans tout compartiment de systèmes à pression entretenue et/ou autonome contenant du SF <sub>6</sub> très faiblement et/ou faiblement décomposé .....	112
Tableau 14 – Récupération et régénération du SF <sub>6</sub> contenu dans tout compartiment de systèmes à pression entretenue et/ou autonome contenant du SF <sub>6</sub> fortement décomposé .....	114
Tableau 15 – Récupération du SF <sub>6</sub> en fin de vie des systèmes à pression scellés .....	118
Tableau 16 – Caractéristiques du SF <sub>6</sub> et quantité de produits de décomposition prévisibles .....	120
Tableau 17 – Modèles de filtres types utilisés lors de la régénération du SF <sub>6</sub> .....	122
Tableau 18 – Dispositifs de mesure de gaz.....	124
Tableau A.1 – Principales caractéristiques chimiques du SF <sub>6</sub> [9] .....	128
Tableau A.2 – Principales caractéristiques physiques du SF <sub>6</sub> [9] .....	130
Tableau A.3 – Principales caractéristiques électriques du SF <sub>6</sub> [9].....	130
Tableau D.1 – Valeurs TLV pour les gaz SOF <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , HF et S <sub>2</sub> F <sub>10</sub> .....	143
Tableau D.2 – Résultats des calculs donnés à titre d'exemple dans les cas d'échappement .....	146
Tableau D.3 – Résultats pour les cas d'échappement, en tenant compte de l'hydrolyse du SOF <sub>2</sub> .....	147

Tableau D.4 – Exemple de calcul de concentration de $S_2F_{10}$ en cas de décharges partielles.....	148
Tableau D.5 – Exemple de calcul de concentration de $S_2F_{10}$ pour les cas de décharges par l'effet couronne.....	149
Tableau D.6 – Exemple de calcul de concentration de $S_2F_{10}$ en cas de coupure capacitive de sectionneur .....	150
Tableau D.7 – Exemple de calcul de concentrations de $SO_2$ en cas de défaut interne.....	151
Tableau D.8 – Volume des appareillages et pression de remplissage .....	155
Tableau D.9 – Valeurs d'énergie d'arc en cas de coupure de courant .....	155
Tableau D.10 – Valeurs d'énergie d'arc en cas de défauts internes .....	156
Tableau D.11 – Taux de formation de $SO_2$ .....	156
Tableau D.12 – Quantités de $SO_2$ formé .....	157
Tableau D.13 –Taux d'échappement de $SF_6$ .....	157
Tableau D.14 –Taux d'échappement de $SO_2$ .....	157

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

### APPAREILLAGE À HAUTE TENSION –

### Partie 303: Utilisation et manipulation de l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>)

#### 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 n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 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 propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La tâche principale des comités d'études de la CEI est d'élaborer des normes internationales. Un comité d'études peut toutefois proposer la publication d'un rapport technique lorsqu'il a recueilli des données d'une nature différente de celles qui sont généralement publiées sous la forme de norme internationale, par exemple « état de la technique ».

La CEI 62271-303, qui est un rapport technique, a été établie par le sous-comité 17A: Appareillage à haute tension, du comité d'études 17 de la CEI: Appareillage.

Cette première édition de la CEI/TR 62271-303 annule et remplace la première édition de la CEI 61634 publiée en 1995. Cette édition constitue une révision technique.

La présente édition inclut les modifications techniques significatives suivantes par rapport à l'édition précédente.

La CEI 62271-303 est une révision majeure de la CEI 61634. Les anciennes sections de la CEI 61634 sont supprimées et remplacées par ceux de la brochure technique CIGRE N°276.

Dans la CEI 61634, publiée en 1995, l'accent était mis sur l'aspect sécurité. En 2008, l'aspect sécurité est bien connu et établi, l'accent est mis actuellement sur la comptabilité avec l'environnement. Le SF<sub>6</sub> doit être conservé dans un cycle fermé et tout rejet intentionnel doit être interdit. Le concept de réutilisation du SF<sub>6</sub> suggéré dans la brochure CIGRE a été mis à jour avec les informations les plus récentes. Aujourd'hui le SF<sub>6</sub> peut être récupéré et régénéré pour être soit réutilisé sur site ou retransmis au fabricant de gaz pour servir comme élément de base à la production du « SF<sub>6</sub> de qualité technique ». Les procédures détaillées pour la manipulation du SF<sub>6</sub> sont données ainsi que la description de l'état de l'art pour ce qui concerne les équipements et les moyens de mesure.

Détail des modifications, article par article:

- L'ancienne section 1 est supprimée et remplacée par l'Article 1 « Domaine d'application », l'Article 2 « Références normatives » et l'Article 3 « Termes et Définitions ».
- L'Article 4 « Stockage et transport du SF<sub>6</sub> », l'Article 5 « Sécurité et première aide », l'Article 6 « Formation et certification », et l'Article 11 « Description des équipements de manipulation du SF<sub>6</sub> » sont issus de la brochure CIGRE et leur contenu a été révisé.
- L'Article 7 « Manipulation du SF<sub>6</sub> pendant l'installation et la mise en service », l'Article 8 « Manipulation du SF<sub>6</sub> pendant le service normal », l'Article 9 « Récupération du SF<sub>6</sub> et régénération pendant la maintenance », et l'Article 10 « Démantèlement de l'équipement de puissance au SF<sub>6</sub> en fin de vie » sont issus de la brochure CIGRE, leur contenu a été révisé, ils remplacent les anciennes sections 2, 3, 4, 5, et 6.
- Les anciennes Annexes A, B, C et D ont été révisées tandis que les Annexes E et F ont été supprimées. La Bibliographie remplace l'ancienne Annexe G.

Le texte du présent rapport technique est issu des documents suivants:

Projet d'enquête	Rapport de vote
17A/813/DTR	17A/817/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.

La version française n'a pas été soumise au vote.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série CEI 62271, présentées sous le titre général *Appareillage à haute tension*, 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 maintenance 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

La technologie SF<sub>6</sub> est utilisée dans l'appareillage électrique depuis plus de 30 ans. Elle est principalement utilisée dans les appareillages électriques dont la tension assignée est supérieure à 1 kV jusqu'aux plus hautes tensions assignées pour lesquelles l'appareillage électrique est fabriqué. On estime à plusieurs millions le nombre de différents types d'appareillages électriques remplis au SF<sub>6</sub> en service actuellement.

Il existe trois méthodes techniques de confinement du gaz, conformément à la CEI 62271-1:

- système à pression entretenue;

NOTE 1 Les systèmes à pression entretenue ne sont plus utilisés pour les nouveaux appareillages électriques, en raison du taux d'échappement inacceptable qu'ils génèrent (voir CEI 62271-203).

- système à pression autonome: appareillage électrique moderne très haute tension. Les valeurs normalisées relatives aux taux d'échappement sont de 0,5 % et 1 % par an et par compartiment à remplissage de gaz;
- système à pression scellé: appareillage électrique moderne moyenne tension (désignés sous l'appellation commerciale « produits scellés à vie » ou « systèmes hermétiquement fermés »). L'étanchéité des systèmes à pression scellés est définie par leur durée de vie théorique. La durée de vie théorique eu égard à la performance aux échappements est spécifiée par le constructeur. Des durées de vie de 20, 30 et 40 ans constituent des valeurs préférentielles.

NOTE 2 Pour satisfaire à l'exigence relative à la durée de vie théorique, le taux d'échappement des systèmes à pression scellés contenant du SF<sub>6</sub> est considéré être inférieur à 0,1% par an.

La longue expérience d'utilisation du SF<sub>6</sub> dans les appareillages électriques montre qu'il convient d'adopter un certain nombre de mesures de sécurité et de procédures élémentaires pour que ladite utilisation se révèle positive au niveau du fonctionnement, de la sécurité et de l'environnement, et ce, sous la forme suivante:

- fonctionnement en toute sécurité des appareillages électriques;
- optimisation des ressources et des outils requis;
- réduction au minimum de la durée hors service des appareillages électriques;
- formation normalisée du personnel qui manipule le SF<sub>6</sub>;
- réduction de la quantité de gaz échappé au cours des opérations de manipulation jusqu'à la limite fonctionnelle des équipements de récupération;
- absence de tout échappement volontaire, par exemple rinçage à l'atmosphère;
- réduction au minimum des échappements de SF<sub>6</sub> au cours des mise en service, entretien, fonctionnement et traitement de fin de vie.

Les toutes dernières recommandations pratiques concernant l'utilisation de la technologie SF<sub>6</sub> appliquée aux appareillages électriques ont été publiées récemment par le GT B3.02 du Comité d'études B3 du CIGRE [1]<sup>1</sup>. Ces informations ont servi à la révision de la CEI 61634 dans le présent rapport technique.

---

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets font référence à la Bibliographie.

## APPAREILLAGE À HAUTE TENSION –

### Partie 303: Utilisation et manipulation de l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>)

#### 1 Domaine d'application

Le présent rapport technique a pour objectif de traiter des procédures de manipulation du SF<sub>6</sub>, en toute sécurité et en toute compatibilité avec l'environnement, au cours de l'installation, de la mise en service, d'un fonctionnement normal et anormal ou de l'élimination en fin de vie des appareillages électriques à haute tension. Le stockage et le transport du SF<sub>6</sub> sont également couverts.

Il convient de considérer ces procédures comme les exigences minimales nécessaires pour garantir la sécurité du personnel travaillant avec le SF<sub>6</sub> et pour réduire au minimum les émissions de SF<sub>6</sub> dans l'environnement.

De même, le présent rapport technique s'applique, généralement, aux mélanges gazeux contenant du SF<sub>6</sub>.

NOTE 1 Pour l'utilisation du présent rapport technique, le terme « haute tension » (référence VEI 601-01-27) désigne la tension assignée supérieure à 1 000 V. Toutefois, le terme « moyenne tension » (référence VEI 601-01-28) est utilisé couramment pour les systèmes de distribution dont les tensions sont supérieures à 1 kV et généralement appliquées jusques et y compris 52 kV.

NOTE 2 Dans l'ensemble du présent rapport technique, le terme « appareillage électrique » désigne les « appareillages haute et moyenne tension ».

#### 2 Références normatives

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

CEI 60050-441, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Partie 441: Appareillages et fusibles*

CEI 60376, *Spécifications de la qualité technique de l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) pour l'utilisation dans les appareils électriques*

CEI 60480, *Lignes directrices relatives au contrôle et au traitement de l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) prélevé sur l'équipement électrique et spécification en vue de sa réutilisation*

CEI 62271-1, *Appareillage à haute tension – Partie 1: Spécifications communes*

CEI 62271-100, *Appareillage à haute tension – Partie 100: Disjoncteurs à courant alternatif*

#### 3 Termes et définitions

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

NOTE Il existe de nombreux types différents d'appareillage électrique qui utilisent le SF<sub>6</sub> comme gaz diélectrique et/ou comme milieu d'extinction de l'arc.

### 3.1

#### **échappement anormal d'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>)**

échappement de gaz d'un matériel en fonctionnement en raison du défaut du système d'étanchéité

NOTE Un échappement anormal de SF<sub>6</sub> consiste habituellement en un échappement de gaz non sollicité et continu. Il convient, dès la détection d'un échappement de SF<sub>6</sub>, de prendre immédiatement les mesures appropriées permettant de le localiser et de l'éliminer.

### 3.2

#### **manipulation d'hexafluorure de soufre(SF<sub>6</sub>)**

tout processus susceptible d'impliquer le transfert de SF<sub>6</sub>

### 3.3

#### **évacuation**

transfert d'un gaz autre que du SF<sub>6</sub> (par exemple de l'air ou de l'azote) du compartiment sous gaz dans l'atmosphère. L'opération est effectuée au moyen d'une pompe à vide

### 3.4

#### **récupération d'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>)**

transfert de SF<sub>6</sub> du compartiment sous gaz dans un appareil de récupération ou un récipient de stockage. L'opération est effectuée généralement au moyen d'un compresseur de récupération

### 3.5

#### **remplissage avec de l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>)**

remplissage d'un compartiment pré-rempli avec du SF<sub>6</sub> à la pression de remplissage assignée

NOTE Les compartiments pré-remplis sont des systèmes à pression autonome qui sont remplis chez le constructeur avant leur expédition. Ces compartiments contiennent du SF<sub>6</sub> dont la pression type comprise entre 0,12 MPa et 0,15 MPa permet une mise en service sur site plus rapide et plus aisée.

### 3.6

#### **régénération d'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>)**

série de manipulation de SF<sub>6</sub> incluant la récupération et un processus de raffinage minimal du SF<sub>6</sub>, tel que filtrage des poussières, élimination ou réduction des produits de décomposition, de l'humidité, de l'huile, etc.

NOTE 1 Un appareil de récupération type est décrit en 11.1.

NOTE 2 Parfois, les termes « retraitement » ou « récupération » peuvent être employés avec la même signification que le terme « régénération ».

### 3.7

#### **appareillage sous enveloppe métallique**

ensemble d'appareillage avec une enveloppe métallique externe destinée à être mise à la terre, à l'exception des connexions extérieures

[VEI 441-12-04]

### 3.8

#### **appareillage sous enveloppe isolante**

ensemble d'appareillage, avec une enveloppe isolante externe, complètement assemblé à l'exception des connexions extérieures

NOTE L'enveloppe isolante externe peut être fournie avec une couche (semi-)conductrice.

[VEI 441-12-06, modifiée]

### 3.9

#### **appareillage sous enveloppe métallique à isolation gazeuse**

appareillage de connexion sous enveloppe métallique dans laquelle l'isolation est obtenue, au moins partiellement, par un gaz isolant autre que l'air à pression atmosphérique

NOTE Ce terme s'applique généralement à l'appareillage à haute tension.

[VEI 441-12-05]

### 3.10

#### **compartiment à remplissage de gaz**

compartiment d'un appareillage électrique dans lequel la pression de gaz est maintenue par l'un des systèmes suivants:

- système à pression entretenue;
- système à pression autonome;
- système à pression scellé.

NOTE 1 Plusieurs compartiments à remplissage de gaz peuvent être connectés en permanence pour former un système de gaz commun (ensemble étanche au gaz).

NOTE 2 La définition est identique à 3.6.6.1 de la CEI 62271-1.

### 3.11

#### **système à pression entretenue de gaz**

ensemble qui se remplit automatiquement à partir d'une alimentation en gaz comprimé externe ou d'une réserve interne

NOTE 1 Les disjoncteurs à air comprimé ou les mécanismes de commande pneumatique sont des exemples de systèmes à pression entretenue.

NOTE 2 Plusieurs compartiments à remplissage de gaz raccordés en permanence peuvent constituer un ensemble.

NOTE 3 La définition est identique à 3.6.6.2 de la CEI 62271-1.

### 3.12

#### **système à pression autonome de gaz**

ensemble qui ne reçoit que des apports périodiques de gaz par raccordement manuel à une réserve extérieure

NOTE 1 Les disjoncteurs à simple pression de SF<sub>6</sub> sont des exemples de systèmes à pression autonome.

NOTE 2 La définition est identique à 3.6.6.3 de la CEI 62271-1.

### 3.13

#### **système à pression scellé**

ensemble pour lequel aucune manipulation de gaz ou de vide n'est requise pendant la durée de service escomptée

NOTE 1 Les disjoncteurs à vide et certains disjoncteurs à SF<sub>6</sub> sont des exemples de systèmes à pression scellés.

NOTE 2 Les systèmes à pression scellés sont entièrement montés et contrôlés chez le constructeur.

NOTE 3 La définition est identique à 3.6.6.4 de la CEI 62271-1.

### 3.14

#### **hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) de qualité technique**

SF<sub>6</sub> ayant un faible niveau d'impuretés conformément à la CEI 60376

### 3.15

#### **hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) usagé**

gaz retiré d'un appareillage électrique, initialement rempli de SF<sub>6</sub> conformément à la CEI 60376 ou à la CEI 60480. Si, après remplissage, le gaz est retiré pour toute opération au cours de la durée de vie de l'appareillage électrique, par exemple réparation, fonctionnement, entretien, celui-ci sera transféré, étant alors considéré comme du gaz usagé

NOTE L'Annexe C fournit des informations sur les produits de décomposition du SF<sub>6</sub> usagé qui se présentent sous forme gazeuse ou solide.

**3.16****hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) usagé pouvant être réutilisé sur le site**

SF<sub>6</sub> usagé conforme au niveau d'impureté maximal acceptable défini dans la CEI 60480

NOTE Il convient, si nécessaire, d'utiliser des unités de service comprenant des filtres et des matériaux adsorbants appropriés.

**3.17****hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) usagé pouvant être réutilisé sur le site du constructeur d'appareillage électrique**

SF<sub>6</sub> usagé dont le niveau d'impureté dépasse le niveau maximal acceptable défini dans la CEI 60480, tout en satisfaisant toutefois la spécification en vue de sa réutilisation fournie par le constructeur d'appareillage électrique

NOTE Il convient, si cela est nécessaire pour satisfaire à la spécification, d'utiliser des unités de service comprenant des filtres et des matériaux adsorbants appropriés.

**3.18****hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) usagé non approprié à une réutilisation**

gaz conforme à 3.15 mais non conforme à 3.16 et/ou 3.17

NOTE L'hexafluorure de soufre usagé non approprié à une réutilisation est éliminé selon les règlements locaux ou internationaux portant sur la gestion des déchets.

**3.19****hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) très faiblement décomposé**

hexafluorure de soufre usagé (SF<sub>6</sub>) contenant moins de 0,1% par volume environ de produits de décomposition gazeux

NOTE La présence d'hexafluorure de soufre très faiblement décomposé est généralement constatée dans tout compartiment après remplissage et préalablement à la mise sous tension et/ou après les essais d'isolement et/ou dans les compartiments d'isolement qui n'ont jamais fait l'objet d'une décomposition.

**3.20****hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) faiblement décomposé**

hexafluorure de soufre usagé (SF<sub>6</sub>) contenant environ entre 0,1% par volume et 5% de produits de décomposition gazeux

NOTE 1 La présence d'hexafluorure de soufre faiblement décomposé est généralement constatée dans les disjoncteurs/sectionneurs de charge après des opérations habituelles (charge ou panne).

NOTE 2 Des produits de décomposition sous forme solide, principalement des fluorures métalliques et des oxyfluorures de tungstène peuvent également être présents en faibles quantités.

**3.21****hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) fortement décomposé**

hexafluorure de soufre usagé (SF<sub>6</sub>) contenant approximativement plus de 5 % par volume de produits de décomposition gazeux

NOTE 1 La présence d'hexafluorure de soufre fortement décomposé est généralement constatée dans les compartiments sous gaz après l'apparition d'un arc lié à un défaut interne et/ou dans les disjoncteurs/sectionneurs de charge après un défaut d'interruption et/ou dans les disjoncteurs après des interruptions satisfaisantes de plusieurs courts-circuits à une amplitude élevée en rapport aux caractéristiques assignées.

NOTE 2 Des produits de décomposition sous forme solide, principalement des fluorures métalliques et des oxyfluorures de tungstène sont également présents en grandes quantités.

**4 Stockage et transport du SF<sub>6</sub>**

Le stockage et le transport de SF<sub>6</sub>, dans des conteneurs ou dans l'appareillage électrique, s'effectuent toujours conformément aux règlements locaux et internationaux en vigueur.

NOTE Un conteneur de SF<sub>6</sub> vide peut tout de même contenir une quantité résiduelle de ce gaz. Il convient de le stocker et de le transporter de la même manière qu'un conteneur rempli.

#### 4.1 Stockage des conteneurs remplis de SF<sub>6</sub>

En règle générale, le SF<sub>6</sub> peut être stocké de deux manières différentes: soit sous forme gazeuse à une pression inférieure à 2 MPa, soit sous forme liquide à une pression pouvant atteindre 5 MPa. Le stockage sous forme gazeuse permet de réduire les temps de récupération et de remplissage mais requiert de grands volumes de stockage. Par conséquent, il est généralement limité aux appareillages électriques de faible volume ou est utilisé dans les installations de manipulation de gaz à emplacement fixe. Le stockage sous forme liquide offre la possibilité de réduire les volumes de stockage et de transporter, à des coûts moindres, de grandes quantités de SF<sub>6</sub>.

Les conteneurs sont manipulés avec précaution et conservés dans un endroit frais, sec et bien ventilé, à l'écart de tout matériel inflammable ou explosif. Il convient qu'ils soient protégés de toute exposition directe au soleil, surélevés si le sol est humide et attachés pour éviter leur chute. Il convient d'utiliser des capuchons de protection des vannes, afin de prévenir tout dommage potentiel desdites vannes.

Les conteneurs sont rechargeables (les conteneurs non rechargeables sont exclus) et portent une étiquette qui identifie clairement leur contenu. Il convient de séparer physiquement les conteneurs remplis de SF<sub>6</sub> de qualité technique et de SF<sub>6</sub> usagé pouvant être réutilisé sur site des conteneurs remplis de SF<sub>6</sub> usagé qui peuvent également être réutilisés sur le site du constructeur d'appareillage électrique, ou remplis de SF<sub>6</sub> usagé qui ne peuvent pas être réutilisés.

Le Tableau 1 fournit une vue d'ensemble de toutes les méthodes de stockage potentielles d'un conteneur de stockage.

**Tableau 1 – Méthodes de stockage du SF<sub>6</sub>**

Méthode	Exigences	Caractéristiques
Etat gazeux	Pression type inférieure à 2 MPa. Le SF <sub>6</sub> demeure à l'état gazeux	Requiert une différence de pression de récupération relativement faible (généralement 100:1), avec toutefois des volumes de stockage plus importants. Le gaz ne peut pas être stocké sous forme liquide dans des conteneurs de transport. Cette méthode se limite par conséquent à de petites quantités (généralement 200 kg) et à un usage fixe
A refroidissement liquide	Pression type égale à 3 MPa. Utilise un système de refroidissement supplémentaire pour refroidir le SF <sub>6</sub> après compression, qui permet de stocker ce dernier sous forme liquide	Requiert une différence de pression de récupération relativement faible (généralement 700:1), un agrégat de refroidissement étant toutefois nécessaire. La capacité de l'agrégat de refroidissement peut influencer la vitesse de traitement. Exigences de maintenance supplémentaires. Volume de stockage limité requis et généralement non adapté au transport
A pression liquide uniquement	Pression type égale à 5 MPa. Le SF <sub>6</sub> comprimé à une pression de 5 MPa se liquéfie sous l'action de la pression uniquement	Requiert une différence de pression de récupération type de 1 000:1, aucun agrégat supplémentaire ne se révélant toutefois nécessaire. Peut être utilisé avec tout récipient de stockage d'une pression assignée supérieure ou égale à 5 MPa

Lorsque du SF<sub>6</sub> usagé est stocké sur site, les conteneurs de stockage sont conformes aux règlements locaux et internationaux portant sur les appareils sous pression. Il convient que l'étiquetage des conteneurs soit également conforme aux règlements locaux et internationaux.

NOTE Les règlements internationaux sont publiés et révisés de manière régulière par le Comité des Experts sur le Transport de Marchandises Dangereuses (TMD) et sur le Système Général Harmonisé de classification et d'étiquetage (SGH) de la Commission Economique des Nations Unies pour l'Europe.

Le Tableau 2 fournit une vue d'ensemble des types de conteneurs et de l'étiquetage requis. Il est recommandé, pour des raisons pratiques, d'utiliser de préférence des conteneurs de stockage transportables, dans la mesure du possible.

**Tableau 2 – Types de conteneurs et étiquetage requis pour le stockage et le transport du SF<sub>6</sub>**

Gaz	Caractéristique	Type de conteneur	Étiquetage du conteneur
SF <sub>6</sub> de qualité technique	Gaz inerte liquéfié	<b>Adapté au gaz liquéfié jusqu'à une pression de 7 MPa.</b> NOTE Le coefficient de remplissage afférent au SF <sub>6</sub> de qualité technique peut atteindre 1,04 kg/l. <b>Recommandation:</b> Il convient que le marquage des conteneurs se présente sous la forme d'une étiquette verte ou d'appliquer une couche de peinture verte sur lesdits conteneurs conformément à la EN 1089-3	<b>Marqué au pochoir sur le conteneur: UN 1080, hexafluorure de soufre</b>  <b>Étiquette de danger 2.2</b>
SF <sub>6</sub> usagé adapté à une réutilisation sur site	Gaz inerte liquéfié	<b>Adapté au gaz liquéfié jusqu'à une pression de 7 MPa.</b> NOTE Le coefficient de remplissage est inférieur à 0,8 kg/l en raison de la teneur du gaz inerte (par exemple N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> ) (voir NOTE 1). <b>Recommandation:</b> Il convient que chaque conteneur puisse être identifié par une couleur spéciale afin d'éviter toute confusion entre le SF <sub>6</sub> usagé et le SF <sub>6</sub> de qualité technique (l'apposition d'une bande orange sur le tiers supérieur du conteneur est proposée)	<b>Marqué au pochoir sur le conteneur: UN 3163, hexafluorure de soufre, tétrafluorure de carbone ou air ou azote (voir NOTE 2)</b>  <b>Étiquette de danger 2.2</b>
SF <sub>6</sub> usagé adapté à une réutilisation sur le site du constructeur de produits gazeux et/ou SF <sub>6</sub> non adapté à une réutilisation	Gaz inerte liquéfié	Le type et l'étiquetage du conteneur sont identiques à ceux utilisés avec le SF <sub>6</sub> usagé adapté à une réutilisation sur le site	
	Gaz liquéfié contenant des produits de décomposition gazeux toxiques (voir NOTE 3)	Mêmes conditions que pour le SF <sub>6</sub> usagé adapté à une réutilisation sur site	<b>Marqué au pochoir sur le conteneur: UN 3162, hexafluorure de soufre, fluorure d'hydrogène, fluorure de thionyle (voir NOTE 2)</b>  <b>Étiquette de danger 2.3</b>
	Gaz liquéfié contenant à la fois des produits de décomposition corrosifs et gazeux toxiques (voir NOTE 4)	<b>Conteneurs spéciaux agréés pour le stockage et le transport des gaz corrosifs</b> (tels que l'acide fluorhydrique HF) comportant une vanne et un adaptateur résistant à la corrosion	<b>Marqué au pochoir sur le conteneur: UN 3308, hexafluorure de soufre, fluorure d'hydrogène, fluorure de thionyle</b>  <b>Étiquettes de danger 2.3 + 8</b>
<p>NOTE 1 Le coefficient de remplissage correspond au poids du SF<sub>6</sub> présent dans le conteneur divisé par le volume de ce dernier et est habituellement indiqué en kg/l.</p> <p>NOTE 2 Seuls les deux contaminants dont la teneur est la plus importante sont spécifiés.</p> <p>NOTE 3 Tout SF<sub>6</sub> usagé contenant des produits de décomposition gazeux toxiques peut être récupéré sur site afin d'éliminer les produits de décomposition gazeux toxiques et permettant un transport plus aisé des conteneurs.</p> <p>NOTE 4 Tout SF<sub>6</sub> usagé contenant des produits de décomposition gazeux toxiques et corrosifs peut être récupéré sur site afin d'éliminer les produits de décomposition gazeux toxiques et corrosifs, et permettant un transport plus aisé des conteneurs.</p>			

#### 4.2 Transport des conteneurs remplis de SF<sub>6</sub>

Les règlements internationaux relatifs à l'expédition de l'appareillage électrique contenant du SF<sub>6</sub> et/ou des conteneurs de SF<sub>6</sub> sont applicables au transport par route (ADR), par chemin de fer (RID), par bateau (code IMDG) et par avion (IATA – DGR). Ces règlements sont similaires en ce qui concerne la numérotation, la classification, l'étiquetage du danger, la

classification finale et les documents de transport des Nations Unies. Les langues officielles usitées sont toutefois différentes:

- ADR: allemand, français, anglais;
- RID: anglais;
- Code IMDG: anglais;
- IATA – DGR: anglais.

Les règlements internationaux applicables au transport du SF<sub>6</sub> sont présentés de façon résumée dans le Tableau 3.

**Tableau 3 – Règlements internationaux applicables au transport du SF<sub>6</sub>**

Gaz	Caractéristique	Classe	Classification finale	Document de transport
SF <sub>6</sub> de qualité technique (voir NOTE 1)	Gaz inerte liquéfié	2A	UN 1080, gaz liquéfié, n.s.a. 2.2	UN 1080, gaz liquéfié, n.s.a. (hexafluorure de soufre) 2.2
SF <sub>6</sub> usagé adapté à une réutilisation sur site	Gaz inerte liquéfié	La classe de transport et l'étiquette de danger sont identiques à celles utilisées avec le SF <sub>6</sub> de qualité technique	UN 3163, gaz liquéfié, n.s.a. 2.2	UN 3163, gaz liquéfié, n.s.a. (hexafluorure de soufre et air ou azote ou tétrafluorure de carbone) 2.2
SF <sub>6</sub> usagé adapté à une réutilisation sur le site du constructeur de produits gazeux et/ou SF <sub>6</sub> non adapté à une réutilisation	Gaz inerte liquéfié	Le numéro, la classe de transport, l'étiquette de danger, la classification finale et le document de transport sont identiques à ceux utilisés avec le SF <sub>6</sub> usagé adapté à une réutilisation sur site		
	Gaz toxique liquéfié (gaz contenant des produits de décomposition gazeux toxiques) (voir NOTE 2)	2T	UN 3162, gaz toxique liquéfié, n.s.a. 2.3	UN 3162, gaz toxique liquéfié, n.s.a. (hexafluorure de soufre, fluorure d'hydrogène et fluorure de thionyle) 2.3
	Gaz liquéfié toxique et corrosif (gaz contenant à la fois des produits de décomposition gazeux corrosifs et toxiques) (voir NOTE 3)	2TC	UN 3308, gaz toxique et corrosif liquéfié, n.s.a. 2.3 + 8	UN 3308, gaz liquéfié toxique et corrosif, n.s.a. (hexafluorure de soufre, fluorure d'hydrogène et fluorure de thionyle) 2.3 + 8
NOTE 1 Eviter toute contamination des conteneurs dédiés au SF <sub>6</sub> de qualité technique.				
NOTE 2 Tout SF <sub>6</sub> usagé contenant des produits de décomposition gazeux toxiques peut être récupéré sur site afin d'éliminer les produits de décomposition gazeux toxiques et permettant un transport plus aisé des conteneurs.				
NOTE 3 Tout SF <sub>6</sub> usagé contenant à la fois des produits de décomposition gazeux toxiques et corrosifs peut être récupéré sur site afin d'éliminer les produits de décomposition gazeux toxiques et corrosifs, et permettant un transport plus aisé des conteneurs.				

### 4.3 Stockage et transport de l'appareillage électrique contenant du SF<sub>6</sub>

Les appareillages électriques remplis de SF<sub>6</sub> sont stockés et transportés conformément aux règlements locaux et internationaux en vigueur.

#### 4.4 Responsabilités

Le propriétaire de l'appareillage électrique qui utilise du SF<sub>6</sub> est responsable de l'utilisation, du transport et de l'élimination des matériels et du gaz dans de bonnes conditions. Il est également responsable de la conservation des enregistrements afférents au SF<sub>6</sub> accumulé dans les matériels et/ou stocké dans les conteneurs, ainsi que des taux d'échappement sur une base annuelle. Cette responsabilité est soutenue par le constructeur de l'appareillage électrique et le fournisseur de gaz, sur la foi des informations de base relatives aux manuels, conformément à la CEI 62271-1.

### 5 Sécurité et premiers soins

#### 5.1 Règles générales de sécurité

Il convient, avant de commencer toute tâche de maintenance/entretien d'un appareillage électrique, d'examiner en détail l'état du matériel et de le consigner dans un rapport. Outre les règlements de sécurité locaux observés, il convient de suivre au moins les règles générales de sécurité suivantes:

- Mettre hors tension et isoler l'appareillage électrique concerné.
- Protéger l'appareillage électrique contre tout ré-enclenchement.
- Vérifier que le matériel est hors tension.
- Mettre le matériel à la terre.
- Protéger et placer une barrière de sécurité autour des parties sous tension à proximité immédiate.

Il convient que les documents écrits autorisant toute tâche sur l'appareillage électrique soient convenus et signés tant par le propriétaire/ exploitant du matériel que par le prestataire de service.

Le Tableau 4 donne la liste des principales questions à prendre en compte lors de toute tâche exécutée sur un appareillage électrique contenant du SF<sub>6</sub>.

**Tableau 4 – Mesures à appliquer pour toute tâche exécutée sur un appareillage électrique contenant du SF<sub>6</sub>**

Élément	Tâche au voisinage de l'appareillage électrique (fonctionnement de l'appareillage électrique, contrôle visuel, nettoyage des salles)	Remplissage, récupération, évacuation des compartiments sous gaz	Ouverture des compartiments, tâche sur des compartiments ouverts
Fiche signalétique/manuels d'utilisation	Non requis	Applicable	Applicable
Formation	Applicable (voir NOTE)	Applicable	Applicable
Matériel de manipulation du SF <sub>6</sub>	Non requis	Applicable	Applicable
Matériel de nettoyage/neutralisation	Non requis	Non requis	Applicable
Équipement de protection individuelle	Non requis	Non requis	Applicable
NOTE Il convient de spécifier les informations d'ordre général selon le type de tâche et l'installation selon les règles locales de sécurité.			

Il convient d'apposer une notification stipulant qu'avoir une flamme extérieur, fumer, utiliser un moteur thermique, avoir une source de chaleur à plus de 200 °C et effectuer une soudure sans prendre des mesures de sécurité spéciales est interdit, et fournissant par ailleurs des instructions de premiers soins (voir 5.3), lors de toute opération de manipulation de SF<sub>6</sub> en tout lieu.

Lorsqu'un compartiment est ouvert après la mise en service de l'appareillage électrique, il convient que le personnel porte des vêtements de protection appropriés de manière à éviter tout contact avec les produits de décomposition solides fins pouvant être présents. Il convient d'accorder une attention particulière à la protection des yeux et des voies respiratoires. Le personnel qui travaille à l'intérieur ou à proximité de compartiments ouverts, ayant contenu du SF<sub>6</sub> faiblement et/ou fortement décomposé:

- utilise des outils et matériel appropriés;
- se soumet à une hygiène individuelle minutieuse;
- se nettoie et nettoie son équipement avec des matériaux jetables avant de quitter le lieu de travail;
- retire ses vêtements de protection et se lave abondamment dès que possible après avoir quitté le lieu de travail;
- s'assure que les vêtements, outils et autres éléments ayant été en contact avec les produits de décomposition sont emballés en sûreté dans des sacs étanches ou autres conteneurs scellés, qui seront traités en conséquence, afin de neutraliser tout résidu.

#### **5.1.1 Protection du personnel**

Le SF<sub>6</sub> est manipulé uniquement par du personnel certifié. Différents modules de formation peuvent être adoptés selon la nature des tâches à exécuter sur l'appareillage électrique (voir Article 6).

Il est demandé au personnel dont la tâche consiste à ouvrir et/ou pénétrer dans le compartiment de suivre une formation spécifique couvrant la récupération du SF<sub>6</sub> usagé contenu dans un compartiment à remplissage de gaz. Il convient de respecter strictement le manuel d'utilisation fourni par le constructeur (OEM) de l'appareillage électrique.

Le Tableau 5 fournit une vue d'ensemble des risques potentiels et des mesures de sécurité, ainsi que l'équipement et des outils de sécurité à utiliser par le personnel dont la tâche consiste à ouvrir et/ou pénétrer dans un compartiment. Les conditions d'ouverture du compartiment par l'opérateur et/ou de pénétration de ce dernier dans ledit compartiment, que ce soit dans une salle ou à l'extérieur, ne présentent pas de différence significative.

**Tableau 5 – Mesures de sécurité à appliquer lors de l’ouverture et/ou de l’accès dans les compartiments**

Elément	Tout compartiment ayant contenu du SF <sub>6</sub> faiblement ou fortement décomposé	Tout compartiment ayant contenu du SF <sub>6</sub> très faiblement décomposé
Risque potentiel	Fumées de substances de nettoyage Asphyxie (manque d'oxygène) SF <sub>6</sub> usagé restant Produits de décomposition gazeux réactifs résiduels Produits de décomposition solides et matériaux adsorbants	Fumées de substances de nettoyage Asphyxie (manque d'oxygène) SF <sub>6</sub> usagé restant ou autre gaz généré par le procédé de production
Mesure de sécurité	Elimination des produits de décomposition solides et des matériaux adsorbants Ventilation Mesure de la concentration en O <sub>2</sub> lors de la pénétration dans le compartiment Port d'un équipement de protection individuelle Protection des produits de décomposition solides contre l'hydrolyse	Ventilation Mesure de la concentration en O <sub>2</sub> lors de la pénétration dans le compartiment
Matériels et outils de sécurité	Ventilateur aspirant ou aspirateur Dispositif de mesure de la concentration en O <sub>2</sub> Combinaisons de protection à usage unique, chaussures de protection, capuche Gants de sécurité résistant aux acides Masque couvrant tout le visage (de préférence) ou, au moins, masque de protection respiratoire Lunettes de protection Protection de l'environnement contre la pluie et/ou le vent (utilisation extérieure uniquement)	Ventilateur aspirant ou aspirateur Dispositif de mesure de la concentration en O <sub>2</sub>

Pour tout gaz, sauf l’oxygène, une concentration supérieure à 19 % en volume de SF<sub>6</sub> dans l’air est considérée présenter un risque potentiel d’asphyxie. Une concentration de ce niveau réduit effectivement la concentration en oxygène à 16 % en volume, qui est habituellement considérée comme le seuil d’asphyxie. Par conséquent, il est recommandé de mesurer la teneur en oxygène dans le compartiment avant d’y pénétrer. Par ailleurs, la teneur en oxygène dans l’atmosphère peut être vérifiée lors de toute opération effectuée dans des espaces clos.

Il n’est pas admis de manger, boire ou fumer lors de l’accès ou de l’ouverture d’un compartiment. Il est recommandé que le personnel change de vêtements et se lave la peau dès que possible une fois la tâche exécutée, et ce, afin de prévenir tout risque potentiel d’irritation ou de brûlures.

### 5.1.2 Manipulation de matériels et d’outils de sécurité contaminés

Les matériels et outils qui ont été en contact avec des produits de décomposition solides et/ou des matériaux adsorbants sont considérés comme contaminés. Ils sont recueillis après utilisation et placés dans des sacs en plastique. Ces sacs sont scellés avec du ruban adhésif et étiquetés. Leur élimination s’effectue selon les règlements locaux en vigueur.

Il convient de laver puis de neutraliser les matériels et/ou outils réutilisables dans une solution d'eau/soude comportant 10 % en poids de soude liquide ou équivalent, puis de les rincer avec de l'eau claire. Des exemples de solutions neutralisantes sont donnés dans le Tableau 6.

L'élimination de la solution d'eau/soude et de l'eau de rinçage s'effectue selon les règlements locaux en vigueur.

**Tableau 6 – Solutions neutralisantes**

Agent actif	Formule	Concentration Kg/100 l	T <sub>1</sub> (voir NOTE 1) Heures	T <sub>2</sub> (voir NOTE 2) Heures	Référence
Chaux	Ca (OH) <sub>2</sub>	Saturée	Non applicable	24	[2]
Carbonate de sodium (lessive de soude)	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1,1	Non applicable	24	[3]
		3	Rinçage	Non applicable	[2]
		10 (NOTE 3)	Non applicable	0,25	[4]
		10-14 (NOTE 3)	1	48	[5]
		3	Non applicable	Non applicable	[6]
Bicarbonate de sodium	NaHCO <sub>3</sub>	1 (NOTE 4)	Non applicable	Non applicable	[4]

NOTE 1 Il convient, lorsque la pratique le permet, de traiter les matériels, outils, compartiments et parties internes desdits compartiments, réutilisables et ayant contenu du SF<sub>6</sub> à décomposition normale, avec une solution neutralisante pendant une période T<sub>1</sub>. Il convient ensuite de les rincer avec de l'eau claire.

NOTE 2 Il convient, lorsque la pratique le permet, de traiter les matériels, outils, compartiments et parties internes desdits compartiments, réutilisables et ayant contenu du SF<sub>6</sub> fortement décomposé, avec une solution neutralisante pendant une période T<sub>2</sub>. Il convient ensuite de les rincer avec de l'eau claire.

NOTE 3 Lors de l'utilisation de solutions alcalines à des concentrations aussi élevées, il convient de veiller à éviter tout contact avec la peau et les yeux.

NOTE 4 Recommandé pour le lavage de la peau.

### 5.1.3 Matériels et outils ou dispositifs de mesure sous pression

Toute expansion soudaine d'un volume de gaz sous pression, quel qu'il soit, entraîne localement une chute de la température pouvant provoquer des gelures. Il convient de porter des gants et des lunettes de protection appropriés lors de tout travail effectué sur des conduits, vannes ou connecteurs sous haute pression, et ce, pendant des opérations de remplissage.

Tous les matériels et outils utilisés lors de la manipulation du SF<sub>6</sub> contiennent potentiellement ledit gaz, sous forme gazeuse ou liquide et sous pression élevée. Il convient de travailler sur ces appareils avec le plus grand soin.

### 5.1.4 Equipement de sécurité et de protection individuelle

L'utilisation d'un équipement de sécurité et de protection individuelle n'est pas liée à la présence de l'appareillage électrique contenant du SF<sub>6</sub> proprement dit. Le port de chaussures et d'un casque de sécurité, ainsi que de lunettes de protection normalisés, peut être exigé, selon les règlements locaux en vigueur pour approcher l'appareillage électrique.

Dans le cas d'un échappement anormal de SF<sub>6</sub> dû à un feu extérieur ou à un arc lié à un défaut interne, des règles de sécurité supplémentaires s'appliquent pour tout opérateur devant pénétrer dans la salle de l'appareillage électrique conformément à 5.2.

Selon la nature de la tâche à exécuter sur le site et conformément au Tableau 5, les équipements de sécurité et de protection individuelle suivants sont fournis aux opérateurs chargés de la manipulation du SF<sub>6</sub>:

- Gants de protection: gants résistant aux acides constitués, par exemple, de néoprène, PVC ou caoutchouc. Outre le port de gants de protection, l'utilisation de crèmes protectrices est recommandée;
- Lunettes de protection: lunettes industrielles de protection contre les produits chimiques conformément aux règlements locaux en vigueur (par exemple norme européenne EN 166);
- Masque de protection respiratoire: équipement à utiliser avec les lunettes de protection, le masque de protection respiratoire permet de protéger la bouche et le nez contre la poussière; il convient de l'utiliser uniquement dans le cas d'une exposition à des zones peu poussiéreuses;
- Masque couvrant tout le visage: un masque de protection du visage avec filtre à charbon actif remplaçable est utilisé conformément aux règlements locaux en vigueur (par exemple les normes européennes EN 140, EN 141 et EN 143 spécifient l'utilisation de masques, de filtres à gaz et de filtres à particules, respectivement) pour les inspections et les tâches de courte durée pour lesquelles une ventilation peut être prévue avec toutefois une concentration des produits de décomposition pouvant dépasser le niveau maximal approprié. Des filtres combinés de type A2/B2/E2/K2/P3, de fabrication conforme à ces normes, sont prévus pour la protection contre les produits de décomposition, y compris les particules d'un diamètre supérieur à 1 µm);
- Combinaison de protection jetable: vêtements de protection étanches à la poussière destinés à être portés par-dessus les vêtements normaux, couvre-chaussures, capuche. Des combinaisons industrielles sans poches, à capuche, imperméables (en polypropylène par exemple) jetables, resserrées par élastiques aux chevilles et aux poignets, et recouvrant les chaussures et les gants;
- Appareil respiratoire: un appareil respiratoire est utilisé conformément aux règlements locaux (par exemple norme européenne EN 136) lors de toute pénétration dans des installations intérieures après un échappement important ou à la suite d'un arc interne lorsque la concentration de O<sub>2</sub> ou la quantité de produits de décomposition atteignent des niveaux dangereux;
- Dispositif de mesure de la concentration en O<sub>2</sub> qui permet un contrôle permanent de la teneur en O<sub>2</sub> de l'environnement;
- Dispositif de protection de l'environnement pour toute utilisation en extérieure: un abri provisoire destiné à empêcher la pluie de pénétrer et le vent de disperser des produits de décomposition solides (le cas échéant) lorsque le compartiment sous gaz est ouvert.
- Aspirateur: un aspirateur dédié à hautes performances, équipé d'un filtre capable de piéger les particules de taille inférieure ou égale à 1 µm et d'un suceur à extrémité ouverte non métallique, conforme aux règlements locaux en vigueur (par exemple une machine de type H conformément à la BS 5415, supplément n° 1, 1986).
- Ventilateur aspirant: matériel destiné à la ventilation forcée des espaces clos et autres zones inaccessibles. Ce type de matériel peut être mobile ou fixe, selon la taille de l'installation.

#### 5.1.5 Equipements et services

Lorsque les compartiments sous gaz SF<sub>6</sub> usagé doivent être vidés, puis ouverts, il est recommandé de prévoir des dispositifs de lavage appropriés pour les opérateurs, une source d'approvisionnement en eau destinée à préparer les solutions de nettoyage pouvant par ailleurs être requise.

## 5.2 Mesures de sécurité supplémentaires dans le cas d'un échappement anormal de SF<sub>6</sub> dû à un feu extérieur ou à un arc lié à un défaut interne

Des recommandations générales de sécurité à appliquer pour tout travail effectué avec du SF<sub>6</sub> sur site sont données en 5.1. Le présent paragraphe décrit les mesures de sécurité supplémentaires dans le cas d'un échappement anormal de SF<sub>6</sub> dû à un feu extérieur ou à un arc lié à un défaut interne.

Dans ces circonstances, le personnel formé aux modules C1 ou C2 (voir 6.2.4 et 6.2.5, respectivement) est autorisé à pénétrer dans la salle de l'appareillage électrique pour le nettoyer ou à accéder à l'appareillage électrique. Le Tableau 7 fournit une vue d'ensemble des risques potentiels, des mesures de sécurité, ainsi que du matériel et des outils de sécurité requis.

NOTE Les équipes de lutte contre l'incendie sont autorisées à pénétrer dans la salle de l'appareillage électrique selon les modalités décrites dans les règlements locaux en vigueur.

**Tableau 7 – Mesures de sécurité supplémentaires**

Élément	Echappement anormal d'hexafluorure de soufre (SF <sub>6</sub> ) fortement décomposé	Echappement anormal d'hexafluorure de soufre (SF <sub>6</sub> ) très faiblement ou faiblement décomposé
Risque potentiel	Fumées de substances de nettoyage Asphyxie (manque d'oxygène) Echappement anormal de SF <sub>6</sub> Produits de décomposition gazeux réactifs résiduels Produits de décomposition solides	Fumées de substances de nettoyage Asphyxie (manque d'oxygène) Echappement anormal de SF <sub>6</sub>
Mesure de sécurité	Élimination des produits de décomposition solides Ventilation Mesure de la concentration en O <sub>2</sub> lors de la pénétration dans le compartiment Port d'un équipement de protection individuelle	Ventilation Mesure de la concentration en O <sub>2</sub> lors de la pénétration dans le compartiment
Matériels et outils de sécurité	Ventilateur aspirant ou aspirateur Dispositif de mesure de la concentration en O <sub>2</sub> Chaussures de protection, couvre-chaussures et capuche monoservice Gants de sécurité résistant aux acides Masque couvrant tout le visage (de préférence) ou, au moins, masque de protection respiratoire et lunettes de protection	Ventilateur aspirant ou aspirateur Dispositif de mesure de la concentration en O <sub>2</sub>

Les mêmes règles s'appliquent aux zones en dessous du niveau auquel l'échappement s'est produit, ou aux zones mal ventilées ou non ventilées (par exemple tranchées à câbles, fosses de visite, réseaux d'évacuation). Les matériels sur site doivent faire l'objet de mesures normalisées pour que les conditions d'utilisation en extérieur puissent s'appliquer (par exemple protection contre la pluie ou le vent). La ventilation naturelle permet généralement de prévenir le risque potentiel d'asphyxie par manque d'oxygène.

Il convient qu'une deuxième personne, en contact visuel et acoustique continu, soit présente lorsque l'opérateur pénètre dans des zones où la concentration en oxygène pourrait être faible.

### 5.3 Equipements et traitement de premiers soins

Les équipements de premiers soins sont les suivants:

- Un équipement de premiers soins industriel standard y compris un dispositif de rinçage oculaire contenant une solution saline
- Un dispositif d'alerte des services d'urgence
- Un guide à l'usage des médecins.

Il convient que l'application des règles générales de sécurité (voir 5.1) réduise au minimum la possibilité d'accidents. Dans le cas d'un accident, il convient d'appliquer le traitement de premiers soins comme indiqué de 5.3.1 à 5.3.3.

#### 5.3.1 Irritation de la peau

Dans le cas où des signes d'irritation de la peau apparaissent, le personnel doit évacuer la zone. Les vêtements contaminés doivent être retirés et la partie affectée doit être rincée avec de l'eau courante fraîche. Un avis médical doit être obtenu.

#### 5.3.2 Irritation des yeux

Dans le cas où des signes d'irritation des yeux apparaissent, le personnel doit évacuer la zone. Un rinçage de l'œil ou des yeux doit être effectué immédiatement et poursuivi jusqu'à ce que le personnel médical dise au patient de l'interrompre.

#### 5.3.3 Difficultés respiratoires

Il convient que le personnel évacue immédiatement la zone concernée et gagne l'air libre. Il convient de retirer les vêtements contaminés et de recouvrir le patient d'une couverture, ce dernier devant par ailleurs rester immobile et sous surveillance. Il doit être fait immédiatement appel à une assistance médicale urgente. En cas d'interruption de la respiration, il convient que du personnel formé et qualifié pratique la respiration artificielle.

## 6 Formation et certification

### 6.1 Généralités

Du fait de la nature des technologies appliquées pour l'appareillage électrique utilisant du SF<sub>6</sub>, les aspects relatifs à la sécurité de fonctionnement et à l'environnement sont intrinsèquement et étroitement liés. Il convient par conséquent de les traiter conjointement.

Les paragraphes suivants sont consacrés aux formations dispensées afin d'assurer que les exigences relatives à la sécurité de fonctionnement et les aspects liés à l'environnement sont satisfaits, en ce qui concerne les appareillages électriques qui utilisent du SF<sub>6</sub>.

Les tâches exécutées sur l'appareillage électrique et impliquant la manipulation d'un ou de plusieurs gaz (par exemple développement, fabrication, vérification par essais, montage, mise en service, maintenance, entretien et démontage en fin de vie) sont réalisées par du personnel certifié ou sous le contrôle de ce dernier. Le personnel concerné par ces activités doit obligatoirement suivre une formation. La formation peut être suivie en différents lieux (par exemple dans le centre de formation spécifique de l'utilisateur, chez le constructeur ou sur le site lors du montage, de la mise en service ou de la maintenance des appareillages électriques installés).

La sécurité et la continuité du service sont très importantes étant donné la nature spécifique de l'industrie de l'appareillage électrique. A l'exception du module de formation générale (module A – sensibilisation, voir 6.2.1), le champ d'application de la formation est associé à un type d'appareillage électrique spécifique (par exemple disjoncteur haute tension, appareillage moyenne tension, appareillage haute tension isolé au gaz ) et les différents

types d'appareillages électriques requièrent différentes formations conduisant à l'obtention d'un certifiant.

NOTE Il convient que l'achèvement avec succès de la formation fasse l'objet d'un contrôle "interne" et soit consigné sur des certificats de compétence ou tout autre document de confirmation écrit afférent au module de formation publié par l'organisme de formation "interne".

Il convient, dans tous les cas, que la formation soit basée sur les règlements locaux, les manuels d'utilisation des appareils, les fiches techniques des instruments, les normes internationales, le rapport technique actuel et les brochures CIGRE.

## 6.2 Modules de formation

Il convient, eu égard aux différents systèmes à pression conformes aux définitions données en 3.12 et 3.13, de choisir le programme de formation individuelle et la composition de ses modules en conséquence, compte tenu du fait que les systèmes à pression scellés, par définition, ne requièrent aucune manipulation de gaz pour les opérations de maintenance intervenant tout au long de leur durée de vie.

Il convient que les opérateurs qui manipulent du SF<sub>6</sub> aient connaissance des aspects liés à la sécurité, au contexte légal et à l'environnement, des propriétés du gaz, des outils et matériels utilisés pour la manipulation du gaz, ainsi que des procédures visant à assurer la continuité du service et à réduire au minimum les échappements de SF<sub>6</sub>.

Les formations sont organisées en modules dans le but de satisfaire les besoins suscités par le type de tâche à exécuter sur les appareillages électriques. Ces formations sont les suivantes:

- Module A: Sensibilisation
- Module B1: Maintenance n'impliquant pas de récupération du gaz
- Module B2: Installation et mise en service
- Module C1: Maintenance impliquant la récupération du gaz (par exemple extension au cours de la durée de vie incluse)
- Module C2: Mise hors service de l'appareillage électrique à la fin de leur durée de vie.

Les modules sont décrits en détail dans les paragraphes qui suivent.

### 6.2.1 Module A – Sensibilisation

Ce module fournit le niveau de formation de base requis et s'applique à toutes les fonctions concernées, notamment pour:

- Les employés des entreprises chargés par leur direction d'exécuter les processus et le personnel associé de ces mêmes entreprises ou de tierces parties qui travaillent sur l'appareillage électrique remplis de SF<sub>6</sub>, que ce dernier par ailleurs fasse ou non l'objet d'une manipulation de gaz;
- Tous les employés travaillant avec des appareils remplis de SF<sub>6</sub>, que ce dernier par ailleurs fasse ou non l'objet d'une manipulation.

Le suivi de la formation ne requiert aucune connaissance préalable.

NOTE Il convient que tous les employés qui travaillent à proximité immédiate d'appareils remplis de SF<sub>6</sub> en soient informés selon les règles générales de sécurité définies en 5.1.

La formation couvre les aspects suivants:

- Connaissances de base relatives aux questions environnementales pertinentes (par exemple changement climatique, protocole de Kyoto, potentiel de réchauffement de la planète, voir Annexe B);

- Importance des échappements de SF<sub>6</sub> pour l'environnement et méthodes d'atténuation [12];
- Caractéristiques physiques, chimiques et environnementales du SF<sub>6</sub> (voir Annexe A);
- Utilisation du SF<sub>6</sub> dans les appareillages électriques;
- Existence des règlements locaux et des normes internationales;
- Sécurité des personnels et premiers soins (par exemple règlements locaux, plans d'urgence et instructions dans le cas, par exemple, d'une asphyxie, d'un arc lié à un défaut interne), (voir l'Article 5);
- Conception de l'appareillage électrique (propriétés et application/fonctionnalité).

### **6.2.2 Module B1: Maintenance n'impliquant pas de récupération du gaz**

Ce module fournit le premier niveau intermédiaire de formation requis pour le personnel, auquel il est demandé de:

- Vérifier la qualité du SF<sub>6</sub> sur le site;
- Effectuer une opération de remplissage de SF<sub>6</sub>;

La certification relative au module A est nécessaire pour suivre la formation. Comme alternative, une session de formation combinée couvrant les deux modules A et B1 peut être organisée.

La formation couvre les aspects suivants:

- Existence des règlements locaux et des normes internationales en rapport avec les tâches;
- Qualité du SF<sub>6</sub> conformément à la CEI 60376 (SF<sub>6</sub> de qualité technique) et à la CEI 60480 (SF<sub>6</sub> pour une réutilisation);
- Les manuels d'instruction fournis par le constructeur des appareillages électriques en rapport avec les tâches;
- Sécurité du personnel et premiers soins (par exemple équipements de sécurité nécessaires pour la protection individuelle), (voir l'Article 5);
- Types de compartiments à remplissage de SF<sub>6</sub> (voir 3.10, 3.11, 3.12 et 3.13);
- Instruments et procédures de vérification de la qualité du SF<sub>6</sub> (voir 8.2 et 11.3);
- Procédures de remplissage des systèmes à pression autonomes (voir 8.1);
- Méthodes de détection des échappements et techniques de réparation;
- Catégories de récupération et de réutilisation du SF<sub>6</sub> (voir 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19, 3.20 et 3.21);
- Stockage et transport du SF<sub>6</sub> (voir l'Article 4);
- Contrôle du SF<sub>6</sub> et enregistrement approprié des données relatives aux obligations environnementales locales.

### **6.2.3 Module B2 – Installation et mise en service**

Ce module fournit le deuxième niveau intermédiaire de formation requis pour le personnel, auquel il est demandé d'installer et de mettre en service les appareillages électriques sur le site.

La certification relative au module B1 est nécessaire pour suivre la formation. Comme alternative, une session de formation combinée couvrant les modules A, B1 et B2 peut être organisée.

La formation couvre les aspects suivants:

- Existence des règlements locaux et des normes internationales en rapport avec les tâches;
- Les manuels d'instruction fournis par le constructeur des appareils en rapport avec les tâches;
- Sécurité du personnel et premiers soins (par exemple travail sur des compartiments en rapport avec la tâche) (voir l'Article 5);
- Procédures d'évacuation dans l'air et de remplissage de SF<sub>6</sub> (voir 7.1);
- Procédures de remplissage avec du SF<sub>6</sub> (voir 7.2);
- Procédures de récupération et de régénération du SF<sub>6</sub> très faiblement décomposé (voir 9.1);
- Appareils de manipulation du SF<sub>6</sub> en rapport avec les tâches (voir l'Article 11).

#### **6.2.4 Module C1 – Maintenance impliquant la récupération du gaz**

Ce module fournit le premier niveau avancé de formation requis pour le personnel, auquel il est demandé:

- De procéder à la maintenance de l'appareillage électrique qui utilisent du SF<sub>6</sub>, y compris la récupération et la régénération du gaz, ainsi qu'une manipulation appropriée des produits de décomposition;
- De prévoir l'extension future de l'appareillage électrique au cours de leur durée de vie utile.

La certification relative au module B1 est nécessaire pour suivre la formation. Comme alternative, une session de formation combinée couvrant les modules A, B1 et C1 peut être organisée. Le module B2 peut être ajouté comme module optionnel.

La formation couvre les aspects suivants:

- Existence des règlements locaux et des normes internationales en rapport avec les tâches;
- Les manuels d'instruction fournis par le constructeur de l'appareillage électrique en rapport avec les tâches;
- Sécurité du personnel et premiers soins (par exemple équipements de sécurité requis pour la protection individuelle, travail sur des compartiments ouverts en rapport avec la tâche, neutralisation et manipulation des produits de décomposition);
- Procédures d'accès à la salle de l'appareillage électrique dans le cas d'un échappement anormal de SF<sub>6</sub> dû à un incendie ou à un défaut lié à un arc interne (voir 5.2);
- Procédures de récupération et de régénération du SF<sub>6</sub> faiblement et fortement décomposé (voir 9.1 et 9.2);
- Appareils de manipulation du SF<sub>6</sub> en rapport avec la tâche (voir l'Article 11);
- Procédures de nettoyage des produits de décomposition et de neutralisation (voir 5.1.2);
- Manipulation des matériels et des outils de sécurité qui ont été en contact avec des produits de décomposition solides (voir 5.1.2).

#### **6.2.5 Module C2 – Mise hors service de l'appareillage électrique en fin de vie**

Ce module fournit le deuxième niveau avancé de formation requis pour le personnel, auquel il est demandé de mettre hors service les appareillages électriques à la fin de leur durée de vie.

La certification relative au module C1 est nécessaire pour suivre la formation. Comme alternative, une session de formation combinée couvrant les modules A, B1, C1 et C2 peut être organisée. Le module B2 peut être ajouté comme module optionnel.

La formation couvre les aspects suivants:

- Existence des règlements locaux et des normes internationales en rapport avec les tâches;
- Les manuels d'instruction fournis par le constructeur de l'appareillage électrique en rapport avec les tâches;
- Transport de l'appareillage électrique jusqu'au site de démontage, le cas échéant (voir 4.3);
- Démontage de l'appareillage électrique et tri des pièces constitutives (voir l'Article 10);
- Instructions fournies par le constructeur de l'appareillage électrique concernant l'utilisation de systèmes de perçage étanche pour la récupération du SF<sub>6</sub> à partir de l'appareillage électrique, le cas échéant.

### 6.3 Certification

Une formation achevée avec succès entraîne une certification interne, le terme « certification interne » désignant un certificat de compétence ou toute autre confirmation écrite délivrés par un employeur à ses propres employés ou à des personnes extérieures ayant suivi de manière satisfaisante un cours de formation afférent aux tâches appropriées. Des sessions d'examen théoriques et/ou pratiques permettent d'attester des compétences et des aptitudes acquises.

Des dossiers de formation doivent être conservés de manière à:

- Identifier le contenu de la formation;
- Identifier les tâches et les appareils pour lesquels le personnel de conception a obtenu une certification (par exemple récupération du SF<sub>6</sub>);
- Restreindre l'exécution des tâches (par exemple récupération du SF<sub>6</sub> pour un certain type de conception), au personnel ayant obtenu la certification (par exemple modules C1 et C2);
- Maintenir un niveau de compétence élevé.

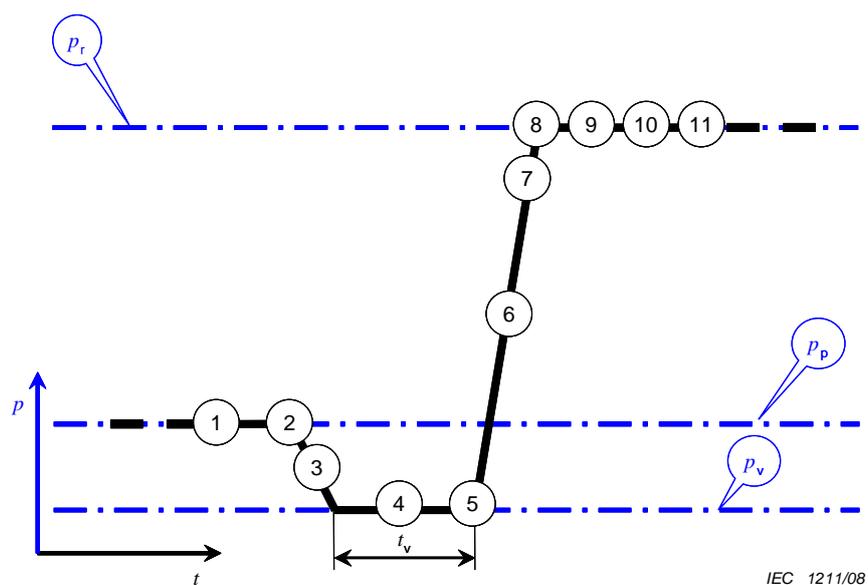
## 7 Manipulation du SF<sub>6</sub> au cours de l'installation et de la mise en service

Le présent article fournit des recommandations pour toute tâche exécutée avec du SF<sub>6</sub> de qualité technique, conformément à la CEI 60376 ou avec du SF<sub>6</sub> usagé pouvant être réutilisé sur site, conformément à la CEI 60480, c'est-à-dire lorsqu'un compartiment est rempli, après installation de l'appareillage électrique sur le site.

### 7.1 Evacuation, remplissage et vérification de la qualité du SF<sub>6</sub> après remplissage

Le présent paragraphe s'applique aux compartiments des appareillages électriques des systèmes à pression qui contiennent actuellement un gaz différent du SF<sub>6</sub> (généralement de l'air ou de l'azote) à la pression ambiante ou à une légère surpression (généralement de 0,1 MPa à 0,15 MPa).

Sauf spécification contraire par le constructeur de l'appareillage électrique dans le manuel d'utilisation, la séquence détaillée suivante des différentes opérations nécessaires à l'évacuation de l'air/N<sub>2</sub> et au remplissage de SF<sub>6</sub> dans chaque compartiment est exécutée selon la Figure 1. Le Tableau 8 fournit des détails supplémentaires.



### Légende

1	Préparation du matériel de manipulation du SF <sub>6</sub>	9	Vérification de l'étanchéité
2	Installation de l'adsorbent	10	Vérification de la qualité du SF <sub>6</sub>
3	Evacuation	11	Documentation
4	Teneur en air résiduel et/ou humidité	$p_r$	Pression de remplissage assignée du SF <sub>6</sub>
5	Documentation	$p_p$	Pression initiale dans le compartiment sous gaz
6	Remplissage avec du SF <sub>6</sub>	$p_v$	Pression d'évacuation < 2 kPa
7	Documentation	$t_v$	Temps d'évacuation ≥ 30 min
8	Inspection du capteur de pression/densité		

**Figure 1 – Mise en service ou nouvelle mise en service des compartiments sous SF<sub>6</sub>**

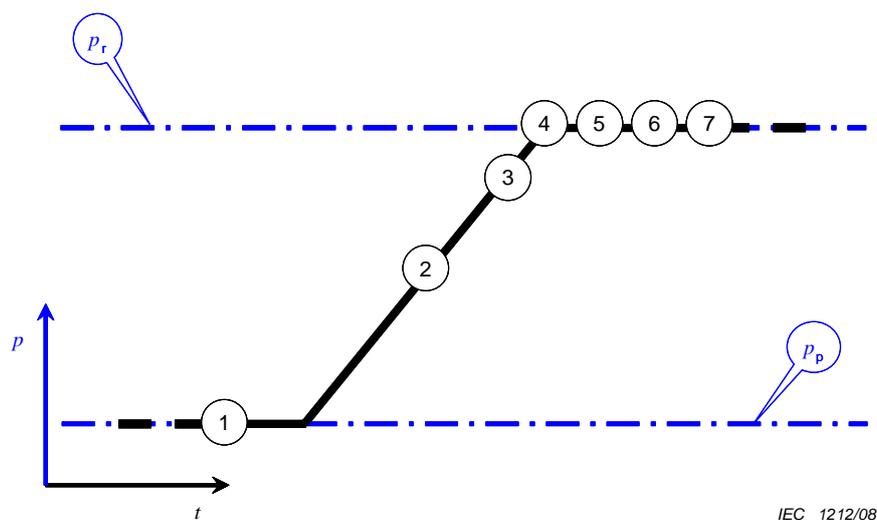
**Tableau 8 – Mise en service ou nouvelle mise en service de compartiments sous SF<sub>6</sub>**

Etape		Mode opératoire
1	Préparation du matériel de manipulation du SF <sub>6</sub>	Vérifier que le groupe de récupération de SF <sub>6</sub> fonctionne correctement et que les raccords de gaz sont propres et secs de manière à éviter toute contamination. Vérifier la validité de l'étalonnage des instruments soumis à cette opération
2	Installation de l'adsorbeur	Insérer rapidement les matériaux adsorbants dans le compartiment. Commencer l'évacuation immédiatement après l'opération précédente
3	Evacuation	Connecter la pompe à vide et la laisser fonctionner pendant au moins 30 min. après qu'une pression d'évacuation inférieure à 2 kPa ait été atteinte dans le compartiment sous gaz
4	Teneur en air résiduel et/ou humidité	Déconnecter la pompe à vide et relever la pression affichée sur le manomètre. Il convient que la pression d'évacuation reste inférieure à 2 kPa
5	Documentation	Consigner au moins le numéro de fabrication et de série et/ou l'identification du compartiment sous gaz, la pression d'évacuation (c'est-à-dire la teneur en air résiduel), la température ambiante et la date pour une référence ultérieure
6	Remplissage avec du SF <sub>6</sub>	Connecter le conteneur de SF <sub>6</sub> et remplir le compartiment jusqu'à l'obtention de la pression de remplissage assignée du SF <sub>6</sub> . Utiliser une soupape de sûreté et un manomètre étalonné afin d'éviter tout remplissage excessif (voir NOTES 1 et 2)
7	Documentation	Consigner au moins le numéro de fabrication et de série et/ou l'identification du compartiment sous gaz, la pression de remplissage finale, la température ambiante et la date pour une référence ultérieure
8	Inspection du capteur de pression/densité	Vérifier le fonctionnement du capteur de pression/densité. L'opération peut avoir lieu au cours du remplissage
9	Vérification de l'étanchéité	Vérifier l'étanchéité d'au moins toutes les connexions permanentes effectuées sur le site comme demandé par le constructeur des appareillages électriques dans le manuel d'utilisation
10	Vérification de la qualité du SF <sub>6</sub>	Attendre le temps nécessaire spécifié par le constructeur des appareillages électriques dans le manuel d'utilisation avant de mesurer la teneur en humidité et le pourcentage de SF <sub>6</sub> (voir NOTE 3)
11	Documentation	Consigner au moins le numéro de fabrication et de série et/ou l'identification du compartiment sous gaz, le fonctionnement du capteur de pression/densité, la teneur en humidité, la teneur en SF <sub>6</sub> , la température ambiante et la date pour une référence ultérieure
<p>NOTE 1 Il convient que le SF<sub>6</sub> à remplir dans le compartiment sous gaz soit de qualité technique ou soit du gaz usagé pouvant être réutilisé sur le site.</p> <p>NOTE 2 Il n'est pas nécessaire de vérifier le SF<sub>6</sub> si le gaz provient du fournisseur dans des conteneurs étanches, ou s'il est stocké également dans des conteneurs étanches comportant une étiquette ou un certificat appropriés assurant que le gaz peut être réutilisé. Dans tous les autres cas, il convient de vérifier la qualité du SF<sub>6</sub> préalablement au remplissage. Le contrôle de la qualité du SF<sub>6</sub> comprend une vérification de la teneur en humidité, du pourcentage du SF<sub>6</sub> et de la teneur en acidité résiduelle.</p> <p>NOTE 3 Un remplissage peut se révéler nécessaire après le contrôle de la qualité du SF<sub>6</sub> si le volume du compartiment sous gaz est petit.</p>		

## 7.2 Remplissage des compartiments pré-remplis de SF<sub>6</sub> à la pression/densité assignée

Le présent paragraphe s'applique aux compartiments de systèmes à pression qui sont pré-remplis chez le constructeur avant leur expédition. Ces compartiments sous gaz contiennent du SF<sub>6</sub> à la pression atmosphérique décrite ci-dessus (généralement comprise entre 0,12 MPa et 0,15 MPa), permettant une mise en service sur site plus rapide et plus aisée.

Sauf spécification contraire par le constructeur de l'appareillage électrique dans le manuel d'utilisation, la séquence détaillée suivante des différentes opérations nécessaires au remplissage de SF<sub>6</sub> dans chaque compartiment pré-rempli est exécutée selon la Figure 2. Le Tableau 9 fournit des détails supplémentaires.

**Légende**

1	Préparation du matériel de manipulation du SF <sub>6</sub>	6	Vérification de la qualité du SF <sub>6</sub>
2	Remplissage du SF <sub>6</sub>	7	Documentation
3	Documentation	$p_r$	Pression de remplissage assignée du SF <sub>6</sub>
4	Inspection du capteur de pression/densité	$p_p$	Pression initiale du SF <sub>6</sub> dans le compartiment à remplissage de gaz
5	Vérification de l'étanchéité		

**Figure 2 – Remplissage des compartiments pré-remplis de SF<sub>6</sub> à la pression/densité assignée**

**Tableau 9 – Remplissage des compartiments pré-remplis de SF<sub>6</sub> à la pression/densité assignée**

Etape		Mode opératoire
1	Préparation du matériel de manipulation du SF <sub>6</sub>	Vérifier que les raccords de gaz sont propres et secs, que les flexibles sont évacués et que les accessoires de connexion ne présentent aucun échappement, de manière à éviter toute contamination. Vérifier la validité de l'étalonnage des instruments soumis à cette opération
2	Remplissage du SF <sub>6</sub>	Connecter le conteneur de SF <sub>6</sub> et remplir le compartiment jusqu'à l'obtention de la pression de remplissage assignée du SF <sub>6</sub> . Utiliser une soupape de sûreté et un manomètre étalonné afin d'éviter tout remplissage excessif (voir NOTES 1 et 2)
3	Documentation	Consigner au moins le numéro de fabrication et de série et/ou l'identification du compartiment sous gaz, la pression de remplissage finale, la température ambiante et la date pour une référence ultérieure
4	Inspection du capteur de pression/densité	Vérifier le fonctionnement du capteur de pression/densité. L'opération peut avoir lieu au cours du remplissage
5	Vérification de l'étanchéité	Vérifier l'étanchéité d'au moins toutes les connexions permanentes effectuées sur le site comme demandé par le constructeur des appareillages électriques dans le manuel d'utilisation
6	Vérification de la qualité du SF <sub>6</sub>	Attendre le temps nécessaire spécifié par le constructeur des appareillages électriques dans le manuel d'utilisation avant de mesurer la teneur en humidité et le pourcentage de SF <sub>6</sub> (voir NOTE 3)
7	Documentation	Consigner au moins le numéro de fabrication et de série et/ou l'identification du compartiment sous gaz, le fonctionnement du capteur de pression/densité, la teneur en humidité, la teneur en SF <sub>6</sub> , la température ambiante et la date pour une référence ultérieure
<p>NOTE 1 Il convient que le SF<sub>6</sub> à injecter dans le compartiment sous gaz soit de qualité technique ou soit du gaz usagé pouvant être réutilisé sur le site.</p> <p>NOTE 2 Aucun contrôle du SF<sub>6</sub> ne se révèle nécessaire si le gaz provient du fournisseur dans des conteneurs étanches. Dans tous les autres cas, la qualité du SF<sub>6</sub> est vérifiée avant l'opération de remplissage, ou si le gaz est stocké dans des conteneurs étanches comportant une étiquette ou un certificat approprié assurant que le gaz peut être réutilisé. Le contrôle de la qualité du SF<sub>6</sub> comprend une vérification de la teneur en humidité, du pourcentage de SF<sub>6</sub> et de la teneur en acidité résiduelle.</p> <p>NOTE 3 Un remplissage peut se révéler nécessaire après le contrôle de la qualité du SF<sub>6</sub> si le volume du compartiment sous gaz est petit.</p>		

### 7.3 Systèmes à pression scellés

La grande majorité des appareillages électriques moyenne tension sont des systèmes à pression scellés, définis en 3.13. Généralement, ce type d'appareillage électrique est rempli de SF<sub>6</sub> chez le constructeur, et aucune autre manipulation de SF<sub>6</sub> n'est requise tout au long de la durée de vie.

NOTE Dans certaines circonstances anormales (par exemple dans le cas d'un endommagement), un nouveau remplissage ou une nouvelle mise en service de l'appareillage électrique sur site peut se révéler nécessaire. Il convient à cette fin de contacter le constructeur de l'appareillage électrique.

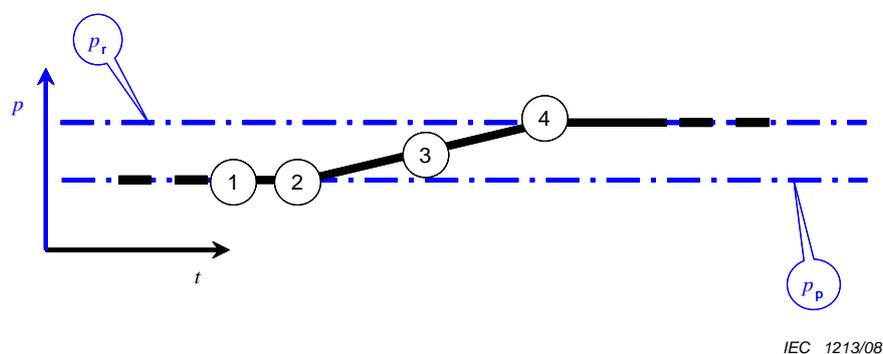
## 8 Manipulation du SF<sub>6</sub> tout au long de la durée de vie normale

### 8.1 Nouvelle opération de remplissage du SF<sub>6</sub> à la pression/densité nominale

Le présent paragraphe s'applique aux compartiments (généralement indiqués par le seuil d'alarme du capteur de pression/densité) des systèmes à pression autonomes afin d'assurer la continuité de service. Dans le cas d'un échappement anormal, des mesures correctives appropriées visant à localiser et à éliminer l'échappement sont prises de manière immédiate.

Sauf spécification contraire par le constructeur de l'appareillage électrique dans le manuel d'utilisation, la séquence détaillée suivante les différentes opérations nécessaires à toute

nouvelle opération de remplissage de SF<sub>6</sub> dans chaque compartiment sous gaz est exécutée selon la Figure 3. Le Tableau 10 fournit des détails supplémentaires.



#### Légende

1	Identification de la nature de l'échappement	4	Documentation
2	Préparation du matériel de manipulation du SF <sub>6</sub>	$p_r$	Pression de remplissage assignée du SF <sub>6</sub>
3	Nouveau remplissage avec du SF <sub>6</sub>	$p_p$	Pression initiale du SF <sub>6</sub> dans le compartiment à remplissage de gaz

**Figure 3 – Nouvelle opération de remplissage du SF<sub>6</sub> à la pression/densité nominale**

**Tableau 10 – Nouvelle opération de remplissage du SF<sub>6</sub> à la pression/densité nominale**

Etape		Mode opératoire
1	Identifier la nature de l'échappement	Vérifier la date de la dernière opération de nouveau remplissage du compartiment sous gaz afin de déterminer si l'échappement est anormal
2	Préparation du matériel de manipulation du SF <sub>6</sub>	Vérifier que les raccords de gaz sont propres et secs, que les flexibles sont évacués et que les accessoires de connexion ne présentent aucun échappement, de manière à éviter toute contamination. Vérifier la validité de l'étalonnage des instruments soumis à cette opération
3	Nouveau remplissage avec du SF <sub>6</sub>	Connecter le conteneur de SF <sub>6</sub> et remplir le compartiment jusqu'à l'obtention de la pression de remplissage assignée du SF <sub>6</sub> . Utiliser une soupape de sûreté et un manomètre étalonné afin d'éviter tout remplissage excessif (voir NOTES 1 et 2)
4	Documentation	Consigner au moins le numéro de fabrication et de série et/ou l'identification du compartiment sous gaz, la pression de remplissage finale, la température ambiante et la date pour une référence ultérieure

NOTE 1 Il convient que le SF<sub>6</sub> à remplir dans le compartiment sous gaz soit de qualité technique ou soit du gaz usagé pouvant être réutilisé sur le site.

NOTE 2 Dans la mesure où la quantité de SF<sub>6</sub> utilisée pour la nouvelle opération de remplissage est très faible par rapport à la quantité de SF<sub>6</sub> dans le compartiment associé, un contrôle de la qualité du SF<sub>6</sub> après ladite opération ne se révèle pas nécessaire.

## 8.2 Vérification de la qualité du SF<sub>6</sub>

L'évaluation de la qualité du SF<sub>6</sub> s'effectue habituellement sur le site, au moyen d'appareils mobiles. Une analyse hors site peut exceptionnellement être effectuée afin de procéder à une contre-vérification des résultats sur site non satisfaisants, en procédant à un échantillonnage du gaz et en transmettant l'échantillon prélevé à un laboratoire qualifié.

Les contrôles types de la qualité du SF<sub>6</sub>, conformément à la CEI 60480, concernent la teneur en humidité (par exemple teneur en eau en mg/kg), le pourcentage de SF<sub>6</sub> (par exemple air et/ou CF<sub>4</sub> en % de volume) et la quantité totale de produits de décomposition gazeux réactifs (par exemple quantité totale de gaz réactifs en µl/l).

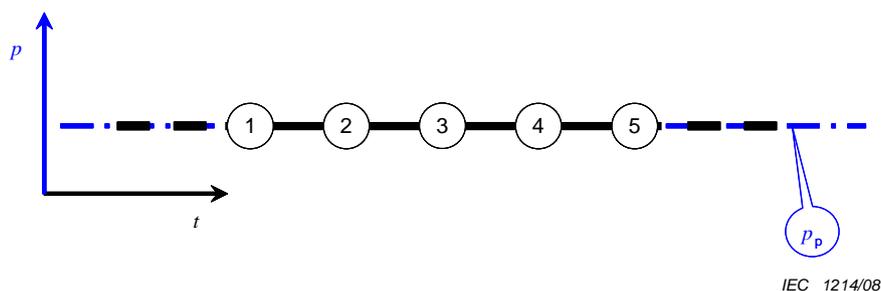
Le contrôle s'intéresse en premier lieu à la quantité totale de produits de décomposition gazeux réactifs afin de prévenir tout endommagement des autres appareils mobiles, si les antécédents du compartiment sous gaz ne sont pas connus ou si ledit compartiment contient du SF<sub>6</sub> fortement décomposé.

### 8.2.1 Evaluation de la qualité du SF<sub>6</sub> au moyen d'appareils mobiles

Le présent paragraphe s'applique aux compartiments remplis de SF<sub>6</sub> des systèmes à pression entretenue et/ou autonome ou aux conteneurs remplis de SF<sub>6</sub> afin de vérifier la qualité du gaz au moyen d'appareils mobiles.

Sauf spécification contraire par le constructeur de l'appareillage électrique dans le manuel d'utilisation, la séquence détaillée suivante des différentes opérations nécessaires à un contrôle sur site de la qualité du SF<sub>6</sub> est exécutée selon la Figure 4. Le Tableau 11 fournit des détails supplémentaires.

Les caractéristiques des appareils mobiles sont décrites à l'Article 11.



#### Légende

- |   |   |       |   |
|---|---|-------|---|
| 1 | Préparation des appareils mobiles                         | 4     | Déconnexion des appareils mobiles                                     |
| 2 | Connexion des appareils mobiles                           | 5     | Documentation   |
| 3 | Lecture de la pression affichée par les appareils mobiles | $p_p$ | Pression du SF <sub>6</sub> dans le compartiment à remplissage de gaz |

**Figure 4 – Vérification de la qualité du SF<sub>6</sub> sur le site**

**Tableau 11 – Vérification de la qualité du SF<sub>6</sub> sur le site**

Etape		Mode opératoire
1	Préparation des appareils mobiles	Vérifier que les appareils mobiles fonctionnent correctement, que les raccords de gaz sont propres et secs, que les flexibles sont évacués et que les accessoires de connexion ne présentent aucun échappement, de manière à éviter toutes mesures erronées. Vérifier la validité de l'étalonnage des instruments soumis à cette opération. Utiliser des connexions courtes afin de réduire au minimum l'échappement de SF <sub>6</sub>
2	Connexion des appareils mobiles	Connecter les appareils mobiles. Rendre les connexions étanches et établir l'écoulement gazeux
3	Lecture de la pression affichée par les appareils mobiles	Se reporter au manuel d'utilisation fourni par le constructeur des appareils de contrôle mobiles
4	Déconnexion des appareils mobiles	Interrompre l'écoulement gazeux et déconnecter les appareils mobiles (voir NOTE)

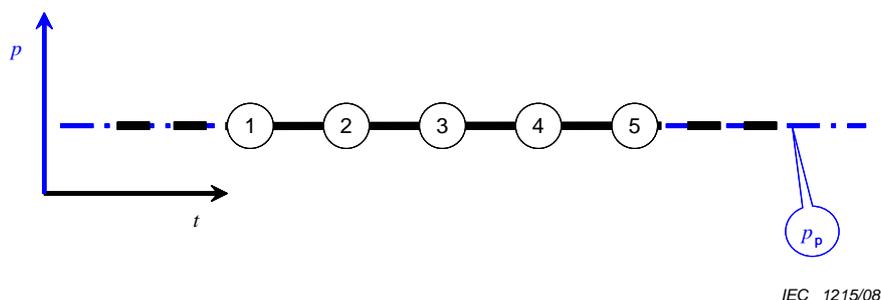
Etape		Mode opératoire
5	Documentation	Consigner au moins le numéro de fabrication et de série et/ou l'identification du compartiment sous gaz, le relevé de la pression et la date pour une référence ultérieure
NOTE Un remplissage peut se révéler nécessaire après le contrôle de la qualité du SF <sub>6</sub> si le volume du compartiment sous gaz est petit.		

### 8.2.2 Echantillonnage et transport du SF<sub>6</sub> pour une analyse hors site

Le présent paragraphe s'applique aux compartiments remplis de SF<sub>6</sub> des systèmes à pression entretenue et/ou autonome ou aux conteneurs remplis de SF<sub>6</sub> afin de procéder à une contre-vérification des mesures non satisfaisantes de la qualité du gaz sur le site.

Sauf spécification contraire par le constructeur des appareils dans le manuel d'utilisation, la séquence détaillée suivante des différentes opérations nécessaires à l'échantillonnage et au transport du SF<sub>6</sub> est exécutée selon la Figure 5. Le Tableau 12 fournit des détails supplémentaires.

Les caractéristiques des bouteilles destinées aux échantillons de SF<sub>6</sub> sont décrites en 11.4.



#### Légende

1	Préparation de l'appareil de manipulation du SF <sub>6</sub>	4	Déconnexion de la bouteille d'échantillonnage
2	Documentation	5	Transport
3	Connexion de la bouteille d'échantillonnage	$p_p$	Pression du SF <sub>6</sub> dans le compartiment à remplissage de gaz

**Figure 5 – Echantillonnage et transport du SF<sub>6</sub>**

**Tableau 12 – Echantillonnage et transport du SF<sub>6</sub>**

Etape		Mode opératoire
1	Préparation de l'appareil de manipulation du SF <sub>6</sub>	Evacuer la bouteille d'échantillonnage (voir NOTE 1). Vérifier que les raccords de gaz sont propres et secs, que les flexibles sont évacués et que les accessoires de connexion ne présentent aucun échappement, de manière à éviter toute contamination de l'échantillon, et utiliser des connexions courtes afin de réduire au minimum l'échappement de SF <sub>6</sub>
2	Documentation	Apposer une étiquette sur la bouteille d'échantillonnage comportant au moins les informations suivantes: le numéro de fabrication et de série et/ou l'identification du compartiment sous gaz, la date, la pression et la température ambiante
3	Connexion de la bouteille d'échantillonnage	Connecter la bouteille d'échantillonnage. Rendre les connexions étanches et établir l'écoulement gazeux
4	Déconnexion de la bouteille d'échantillonnage	Interrompre l'écoulement gazeux et déconnecter la bouteille d'échantillonnage (voir NOTE 2)
5	Transport	Le transport à destination du laboratoire est effectué conformément aux règlements locaux et internationaux, tel que décrit en 4.2
<p>NOTE 1 Voir 11.4 pour les bouteilles d'échantillonnage.</p> <p>NOTE 2 Un remplissage peut se révéler nécessaire après le contrôle de la qualité du SF<sub>6</sub> si le volume du compartiment sous gaz est petit.</p>		

## 9 Récupération et régénération du SF<sub>6</sub> au cours des opérations de maintenance

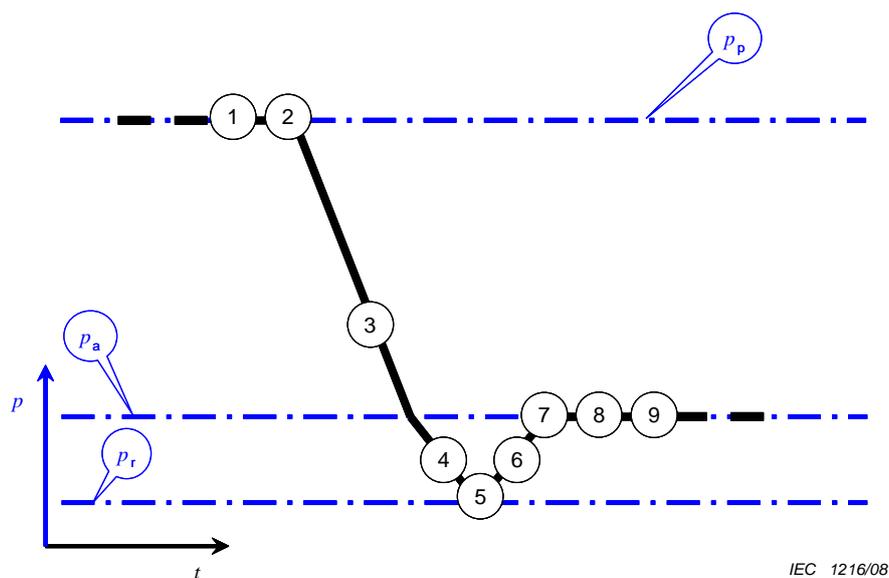
Le présent article comporte les procédures de récupération et de régénération du SF<sub>6</sub> contenu dans tout compartiment à remplissage de gaz au cours des opérations de maintenance.

### 9.1 Récupération et régénération du SF<sub>6</sub> contenu dans tout compartiment de systèmes à pression entretenue et/ou autonome contenant du SF<sub>6</sub> très faiblement ou faiblement décomposé

Le présent paragraphe s'applique à tout compartiment de systèmes à pression entretenue et/ou autonome contenant du SF<sub>6</sub> très faiblement et/ou faiblement décomposé, qui est récupéré à des fins de maintenance.

Sauf spécification contraire par le constructeur de l'appareillage électrique dans le manuel d'utilisation, la séquence détaillée suivante des différentes opérations nécessaires à la récupération du SF<sub>6</sub> dans chaque compartiment est exécutée selon la Figure 6. Le Tableau 13 fournit des détails supplémentaires.

Les règles de sécurité fournies en 5.1 sont observées de manière stricte.



IEC 1216/08

**Légende**

1	Préparation de l'appareil de manipulation du SF <sub>6</sub>	7	Ouverture du compartiment
2	Connexion des filtres	8	Retrait des produits de décomposition solides et des matériaux adsorbants lorsqu'ils sont présents
3	Récupération du SF <sub>6</sub>	9	Neutralisation, le cas échéant
4	Réduction au minimum de la teneur résiduelle en SF <sub>6</sub>	$p_p$	Pression du SF <sub>6</sub> dans le compartiment à remplissage de gaz
5	Documentation	$p_a$	Pression atmosphérique
6	Immersion dans l'air	$p_r$	Pression résiduelle du SF <sub>6</sub> < 2 kPa

**Figure 6 – Récupération et régénération du SF<sub>6</sub> contenu dans tout compartiment de systèmes à pression entretenue et/ou autonome contenant du SF<sub>6</sub> très faiblement et/ou faiblement décomposé**

**Tableau 13 – Récupération et régénération du SF<sub>6</sub> contenu dans tout compartiment de systèmes à pression entretenue et/ou autonome contenant du SF<sub>6</sub> très faiblement et/ou faiblement décomposé**

Etape		Mode opératoire
1	Préparation de l'appareil de manipulation du SF <sub>6</sub>	Vérifier que le groupe de récupération de SF <sub>6</sub> fonctionne correctement, que les filtres et les pré-filtres sont toujours actifs et que les raccords de gaz sont propres et secs, que les flexibles sont évacués et que les accessoires de connexion ne présentent aucun échappement, de manière à éviter toute contamination. Vérifier la validité de l'étalonnage des instruments soumis à cette opération
2	Connexion des filtres	Connecter le pré-filtre entre le compartiment à remplissage de gaz et le compresseur, ainsi que le filtre entre le compresseur et le conteneur de stockage
3	Récupération du SF <sub>6</sub>	Connecter le compartiment à remplissage de gaz. Utiliser l'étage du compresseur principal dès que la pression résiduelle du SF <sub>6</sub> dans le compartiment avoisine la pression dans le conteneur de stockage. Utiliser une soupape de sûreté et un manomètre étalonné afin d'éviter tout remplissage excessif du conteneur de stockage (voir NOTE)
4	Réduction au minimum de la teneur résiduelle en SF <sub>6</sub>	Connecter l'étage du compresseur auxiliaire lorsque la pression résiduelle du SF <sub>6</sub> dans le compartiment avoisine 100 kPa et le laisser fonctionner jusqu'à l'obtention d'une pression inférieure à 2 kPa
5	Documentation	Consigner au moins le numéro de fabrication et de série et/ou l'identification du compartiment sous gaz, le relevé de la pression et la date pour une référence ultérieure
6	Immersion dans l'air	Déconnecter le compresseur et laisser l'air pénétrer lentement dans le compartiment sous gaz
7	Ouverture du compartiment	Ouvrir le compartiment sous gaz avec la plus grande attention. Appliquer les règles de sécurité selon 5.1
8	Retrait des produits de décomposition solides et des matériaux adsorbants lorsqu'ils sont présents	Utiliser immédiatement l'aspirateur ou essuyer au moyen d'un chiffon non pelucheux propre afin de recueillir les produits de décomposition solides, le cas échéant. Disposer les matériaux adsorbants dans un sac en plastique. Fermer le sac en plastique à l'aide d'un ruban et y apposer une étiquette
9	Neutralisation, le cas échéant	Si des produits de décomposition solides devaient être recueillis, utiliser une solution de soude diluée à 10 % en poids ou une solution équivalente pour laver et neutraliser toutes les pièces, puis rincer avec de l'eau propre, selon le Tableau 6

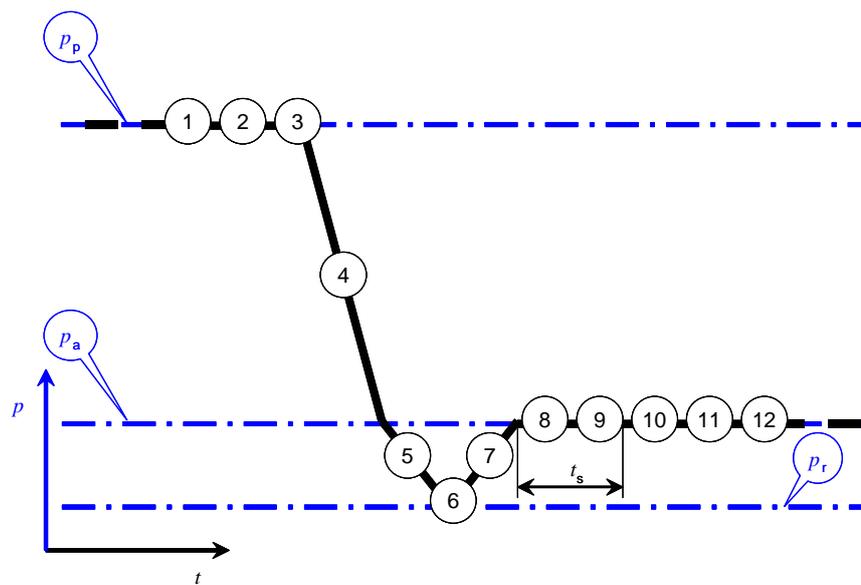
NOTE Dans le cas du stockage de produits liquides, le poids du conteneur de stockage fait l'objet d'un contrôle afin d'éviter tout remplissage excessif. Le coefficient de remplissage est inférieur à 0,8 kg/l pour des raisons de sécurité.

**9.2 Récupération et régénération du SF<sub>6</sub> contenu dans tout compartiment de systèmes à pression entretenue et/ou autonome contenant du SF<sub>6</sub> fortement décomposé**

Le présent paragraphe s'applique à tout compartiment de systèmes à pression entretenue et/ou autonome contenant du SF<sub>6</sub> fortement décomposé, qui est récupéré à des fins de maintenance.

Sauf spécification contraire par le constructeur de l'appareillage électrique dans le manuel d'utilisation, la séquence détaillée suivante des différentes opérations nécessaires à la récupération du SF<sub>6</sub> dans chaque compartiment est exécutée selon la Figure 7. Le Tableau 14 fournit des détails supplémentaires.

Les règles de sécurité fournies à l'Article 5 sont observées de manière stricte.



IEC 1217/08

**Légende**

1	Préparation de l'appareil de manipulation du SF <sub>6</sub>	9	Ouverture du compartiment
2	Connexion des filtres	10	Retrait des produits de décomposition solides, des matériaux adsorbants et des pièces amovibles
3	Connexion du pré-filtre supplémentaire	11	Neutralisation
4	Récupération du SF <sub>6</sub>	12	Documentation
5	Réduction au minimum de la teneur résiduelle en SF <sub>6</sub>	$p_p$	Pression initiale du SF <sub>6</sub> dans le compartiment à remplissage de gaz
6	Documentation	$p_a$	Pression atmosphérique
7	Immersion dans l'air	$p_r$	Pression résiduelle du SF <sub>6</sub> < 2 kPa
8	Décantation des produits de décomposition solides	$t_s$	Temps de décantation ≥ 1 h

**Figure 7 – Récupération et régénération du SF<sub>6</sub> contenu dans tout compartiment de systèmes à pression entretenue et/ou autonome contenant du SF<sub>6</sub> fortement décomposé**

**Tableau 14 – Récupération et régénération du SF<sub>6</sub> contenu dans tout compartiment de systèmes à pression entretenue et/ou autonome contenant du SF<sub>6</sub> fortement décomposé**

Etape		Mode opératoire
1	Préparation de l'appareil de manipulation du SF <sub>6</sub>	Vérifier que le groupe de récupération de SF <sub>6</sub> fonctionne correctement, que les filtres et les pré-filtres sont toujours actifs et que les raccords de gaz sont propres et secs, que les flexibles sont évacués et que les accessoires de connexion ne présentent aucun échappement, de manière à éviter toute contamination. Vérifier la validité de l'étalonnage des instruments soumis à cette opération
2	Connexion des filtres	Connecter le pré-filtre entre le compartiment à remplissage de gaz et le compresseur, ainsi que le filtre entre le compresseur et le conteneur de stockage
3	Connexion du pré-filtre supplémentaire	Connecter un pré-filtre supplémentaire sur l'orifice d'entrée du groupe de récupération de SF <sub>6</sub>
4	Récupération du SF <sub>6</sub>	Connecter le compartiment à remplissage de gaz. Utiliser l'étage principal du compresseur dès que la pression résiduelle du SF <sub>6</sub> dans le compartiment avoisine la pression dans le conteneur de stockage. Utiliser une soupape de sûreté et un manomètre étalonné. Utiliser un conteneur de stockage externe tout en évitant de le remplir de manière excessive (voir NOTE 1)
5	Réduction au minimum de la teneur résiduelle en SF <sub>6</sub>	Connecter l'étage du compresseur auxiliaire lorsque la pression résiduelle du SF <sub>6</sub> dans le compartiment avoisine 100 kPa et le laisser fonctionner jusqu'à l'obtention d'une pression inférieure à 2 kPa
6	Documentation	Consigner au moins le numéro de fabrication et de série et/ou l'identification du compartiment sous gaz, le relevé de la pression et la date pour une référence ultérieure
7	Immersion dans l'air	Déconnecter le compresseur et laisser l'air pénétrer lentement dans le compartiment sous gaz
8	Décantation des produits de décomposition solides	Attendre au moins 1 h afin de laisser un temps de décantation suffisant des produits de décomposition solides restants dans le compartiment sous gaz.
9	Ouverture du compartiment	Ouvrir le compartiment avec la plus grande attention. Appliquer les règles de sécurité selon l'Article 5
10	Retirer les produits de décomposition solides, les matériaux adsorbants et les pièces amovibles	Utiliser immédiatement un aspirateur afin de recueillir les produits de décomposition solides. Disposer les matériaux adsorbants et les pièces amovibles dans des sacs en plastique. Fermer les sacs en plastique à l'aide d'un ruban et y apposer une étiquette
11	Neutralisation	Utiliser une solution de soude diluée à 10 % en poids ou une solution équivalente pour laver et neutraliser toutes les pièces, puis rincer avec de l'eau propre, selon le Tableau 6
12	Documentation	Consigner toutes les informations pertinentes relatives au défaut lié à un arc interne. Intégrer quelques photographies
<p>NOTE 1 Dans le cas du stockage de produits liquides, le poids du conteneur de stockage fait l'objet d'un contrôle afin d'éviter tout remplissage excessif. Le coefficient de remplissage est inférieur à 0,8 kg/l pour des raisons de sécurité.</p> <p>NOTE 2 Dans le cas où le compartiment est ouvert à l'air libre, il convient de suivre le mode opératoire en commençant à l'étape 9.</p>		

## 10 Démontage de l'appareillage électrique contenant du SF<sub>6</sub> en fin de vie

Le présent article couvre les différentes phases de démontage de l'appareillage électrique à la fin de leur durée de vie. D'un point de vue environnemental, il s'agit d'une phase importante dans le cycle de vie d'un produit.

Le démontage à la fin du cycle de vie s'effectue selon les règlements locaux sous la responsabilité du maître d'œuvre/opérateur et avec le soutien du constructeur de l'appareillage électrique dans la mesure où ses connaissances et son expérience constituent

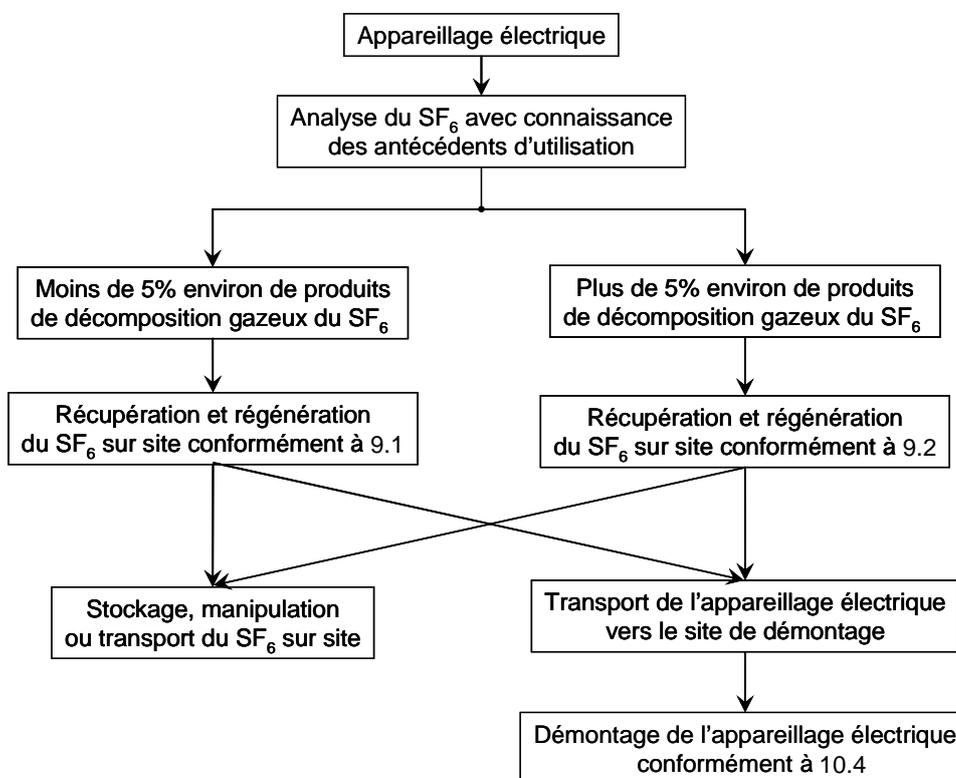
des éléments essentiels. Des tiers, tels que des entreprises de services qualifiées, peuvent également effectuer le démontage en fin de vie. La fin du cycle de vie de l'appareillage électrique est prise en considération dès la phase de conception de l'appareillage électrique en fonction de l'état de la technique.

NOTE Les modes opératoires décrits dans le présent article peuvent également être applicables lors des opérations de maintenance et de révision.

Le démontage de l'appareillage électrique et le traitement associé des compartiments sous gaz, contenant du SF<sub>6</sub> usagé, des poudres, des matériaux adsorbants et des effluents sont effectués en prenant en considération le personnel et le respect de l'environnement, tel que décrit à l'Article 5.

### 10.1 Fin de vie des systèmes à pression entretenue et/ou autonome

La Figure 8 décrit le mode opératoire type à suivre en fin de vie des systèmes à pression entretenue et/ou autonome.



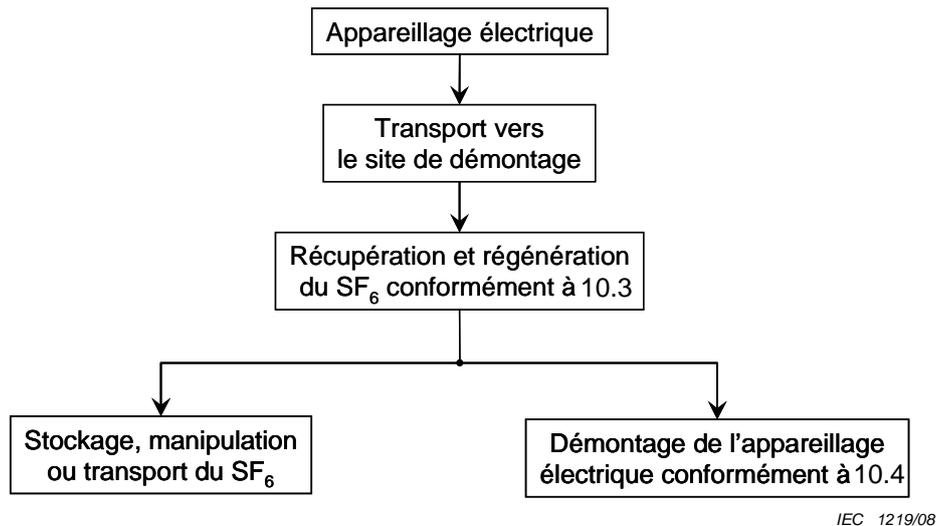
IEC 1218/08

**Figure 8 – Fin du cycle de vie des systèmes à pression entretenue et/ou autonome**

Si les antécédents d'utilisation d'un compartiment à remplissage de gaz ne sont pas connus, le gaz est analysé et manipulé dans des conditions de sécurité selon l'Article 9. Une fois que le SF<sub>6</sub> a été récupéré et régénéré, il peut être réutilisé sur le site, stocké ou transporté hors du site pour toute réutilisation ultérieure, selon l'Article 4. L'appareillage électrique peut être démontés sur le site ou transférés vers un site de démontage.

### 10.2 Fin du cycle de vie des systèmes à pression scellés

Le transport de systèmes à pression scellés vers le site de démontage s'effectue généralement comme illustré à la Figure 9. Le cas échéant, la récupération du SF<sub>6</sub> et le démontage ultérieur de l'appareillage électrique peuvent être effectués sur le site. La procédure de récupération du SF<sub>6</sub>, identique aux autres procédures utilisées, est consignée en 10.3.



**Figure 9 – Fin de vie des systèmes à pression scellés**

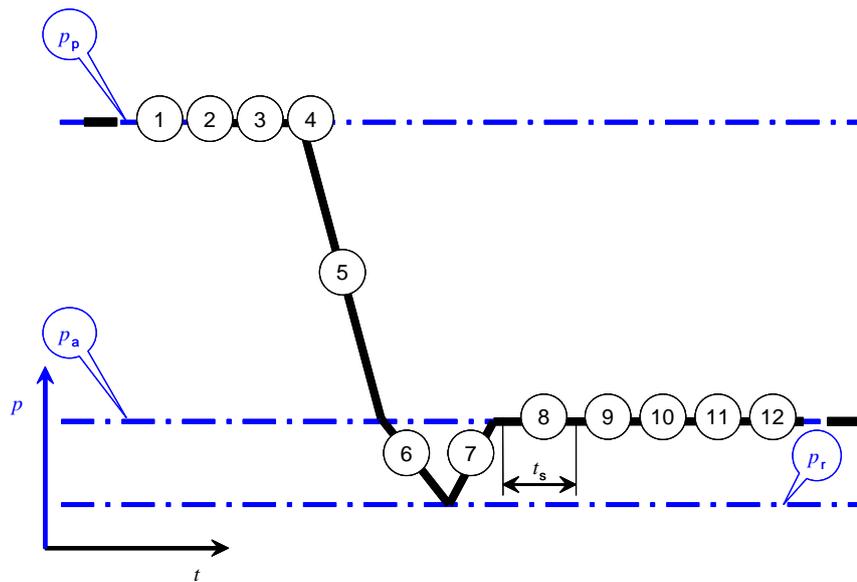
Il convient de transférer les systèmes à pression scellés vers le site de démontage avant de retirer le SF<sub>6</sub>, cette opération étant généralement effectuée par des entreprises de service. Ces entreprises mettent en œuvre les moyens de manipulation et de stockage nécessaires, de manière à éviter tous chocs susceptibles de fissurer ou de rompre l'enceinte, notamment les enceintes à base de résine. L'expérience montre que le respect des instructions de transport du constructeur des appareillages électriques génère un risque extrêmement faible de dispersion du SF<sub>6</sub> dans l'environnement au cours des opérations de manipulation et de transport.

### **10.3 Récupération et régénération du SF<sub>6</sub> en fin de vie des systèmes à pression scellés**

Il convient que la récupération et la régénération du SF<sub>6</sub> en fin de vie de systèmes à pression scellés aient lieu sur le site de démontage. Lorsque les systèmes à pression scellés comportent un dispositif de vidange du SF<sub>6</sub>, il convient d'utiliser des outils dédiés à la récupération du SF<sub>6</sub>, conformément aux instructions du constructeur. A défaut, il convient d'utiliser des systèmes de perçage étanche.

Sauf spécification contraire du constructeur de l'appareillage électrique dans le manuel d'utilisation, la séquence détaillée suivante des différentes opérations nécessaires à la récupération et à la régénération du SF<sub>6</sub> en fin de vie du système à pression scellé est exécutée selon la Figure 10. Le Tableau 15 fournit des détails supplémentaires.

Les règles de sécurité fournies à l'Article 5 sont observées de manière stricte.



IEC 1220/08

**Légende**

1	Préparation de l'appareil de manipulation du SF <sub>6</sub>	9	Ouverture du compartiment
2	Connexion des filtres	10	Retrait des produits de décomposition solides, des pièces amovibles et des matériaux adsorbants lorsqu'ils sont présents
3	Connexion du pré-filtre supplémentaire, le cas échéant	11	Neutralisation, le cas échéant
4	Connexion du compartiment à remplissage de gaz.	12	Documentation
5	Récupération du SF <sub>6</sub>	$p_p$	Pression initiale du SF <sub>6</sub> dans le compartiment à remplissage de gaz
6	Réduction au minimum de la teneur résiduelle en SF <sub>6</sub>	$p_a$	Pression atmosphérique
7	Immersion dans l'air	$p_r$	Pression résiduelle du SF <sub>6</sub> < 2 kPa
8	Décantation des produits de décomposition solides, le cas échéant	$t_s$	Temps de décantation $\geq 1$ h, le cas échéant

**Figure 10 – Récupération et régénération du SF<sub>6</sub> en fin vie des systèmes à pression scellés**

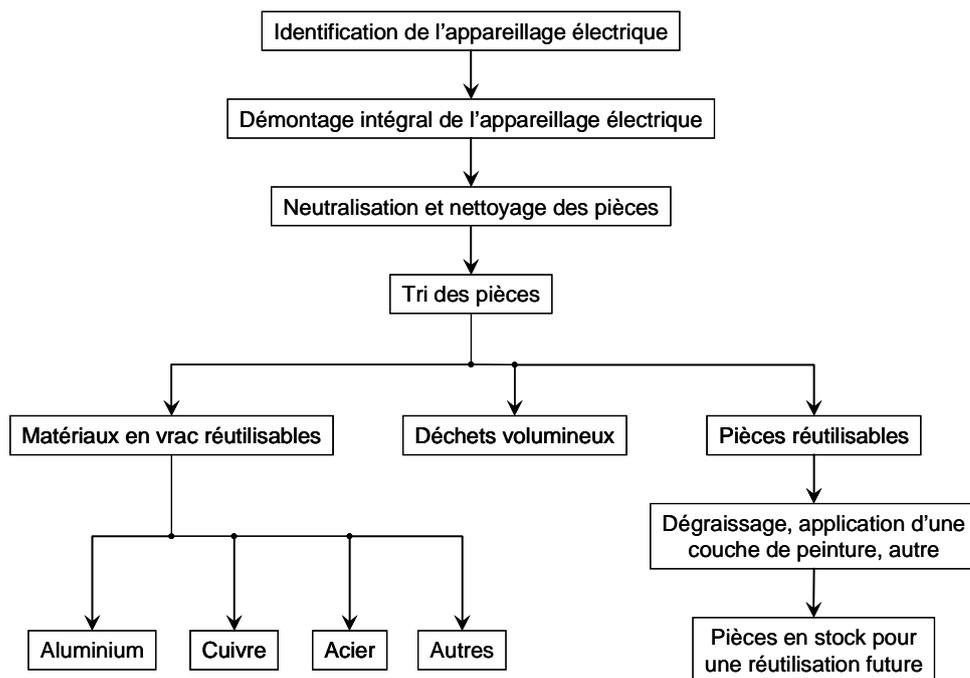
**Tableau 15 – Récupération du SF<sub>6</sub> en fin de vie des systèmes à pression scellés**

Etape		Mode opératoire
1	Préparation de l'appareil de manipulation du SF <sub>6</sub>	Vérifier que le groupe de récupération de SF <sub>6</sub> fonctionne correctement, que les filtres et les pré-filtres sont toujours actifs et que les raccords de gaz sont propres et secs, que les flexibles sont évacués et que les accessoires de connexion ne présentent aucun échappement, de manière à éviter toute contamination. Vérifier la validité de l'étalonnage des instruments soumis à cette opération
2	Connexion des filtres	Connecter le pré-filtre entre le compartiment à remplissage de gaz et le compresseur, ainsi que le filtre entre le compresseur et le conteneur de stockage
3	Connexion du pré-filtre supplémentaire, le cas échéant	Connecter un pré-filtre supplémentaire sur l'orifice d'entrée du groupe de récupération de SF <sub>6</sub>
4	Connexion du compartiment rempli de SF <sub>6</sub>	Utiliser les outils dédiés et suivre les instructions du constructeur des appareils pour connecter le compartiment rempli de SF <sub>6</sub> . Dans les autres cas, les systèmes de forage étanche sont utilisés
5	Récupération du SF <sub>6</sub>	Utiliser l'étage du compresseur principal pour transférer le gaz vers le conteneur de stockage. Utiliser une soupape de sûreté et un manomètre étalonné. Utiliser un conteneur de stockage externe approprié tout en évitant de le remplir de manière excessive (voir NOTE)
6	Réduction au minimum de la teneur résiduelle en SF <sub>6</sub>	Connecter l'étage du compresseur auxiliaire et le laisser fonctionner jusqu'à l'obtention d'une pression inférieure à 2 kPa
7	Immersion dans l'air	Déconnecter le compresseur et laisser l'air pénétrer lentement dans le compartiment sous gaz
8	Décantation des produits de décomposition solides, le cas échéant	Attendre au moins 1 h afin de laisser un temps de décantation suffisant des produits de décomposition solides restants dans le compartiment sous gaz
9	Ouverture du compartiment	Ouvrir le compartiment sous gaz avec la plus grande attention. Appliquer les règles de sécurité selon l'Article 5
10	Retrait des produits de décomposition solides, des pièces amovibles et des matériaux adsorbants lorsqu'ils sont présents	Utiliser immédiatement l'aspirateur ou essuyer au moyen d'un chiffon non pelucheux propre afin de recueillir les produits de décomposition solides, le cas échéant. Disposer les matériaux adsorbants et les pièces amovibles dans des sacs en plastique. Fermer les sacs en plastique à l'aide d'un ruban et y apposer une étiquette
11	Neutralisation, si nécessaire	Si des produits de décomposition solides devaient être recueillis, utiliser une solution de soude diluée à 10% en poids ou une solution équivalente pour laver et neutraliser toutes les pièces, puis rincer avec de l'eau propre, selon le Tableau 6
12	Documentation	Consigner au moins le numéro de fabrication et de série et/ou l'identification des appareils, la date de démontage et la quantité de SF <sub>6</sub> récupérée en kg

NOTE Dans le cas du stockage de produits liquides, le poids du conteneur de stockage fait l'objet d'un contrôle afin d'éviter tout remplissage excessif. Le coefficient de remplissage est inférieur à 0,8 kg/l pour des raisons de sécurité.

#### 10.4 Démontage de l'appareillage électrique en fin de vie

La Figure 11 décrit la procédure type de démontage de l'appareillage électrique en fin de vie.



IEC 1221/08

**Figure 11 – Démontage de l'appareillage électrique**

La première opération consiste à identifier chaque ensemble ou sous-ensemble qui arrive sur le site de démontage. Il est nécessaire d'élaborer une fiche d'identification contenant toutes les informations nécessaires pour le produit.

Les compartiments et les pièces internes peuvent contenir des produits de décomposition solides, qui sont neutralisés et nettoyés de manière à pouvoir être manipulés, recyclés ou éliminés selon les règlements locaux ou les normes internationales en vigueur. Les procédures de neutralisation et de nettoyage sont simples à mettre en œuvre, et ne requièrent que du matériel facilement disponible, comme indiqué dans le Tableau 6.

Il convient, pour la phase de démontage, que les opérateurs connaissent les produits. Il convient que les opérateurs disposent d'outils et de plans.

Un élément type d'appareillage électrique est composé approximativement des masses de matériaux suivants:

- Métaux, ferreux et non ferreux: 75 % à 90 %
- Matériaux diélectriques: 10 % à 25 %.

La présence de SF<sub>6</sub> ne constitue qu'une très faible part du poids total et ne nécessite que peu d'efforts supplémentaires pour préparer les appareillages électriques à la récupération, à la réutilisation ou à l'élimination. La plus grande partie de la masse de matériaux diélectriques provient des isolants solides (par exemple résine moulée, plastiques, céramiques). Les métaux représentent la valeur récupérable la plus importante.

### 10.5 Produits de décomposition en fin de vie

La quantité de produits de décomposition contenus dans un appareillage électrique dépend de la quantité d'énergie d'arc cumulée par rapport à la quantité de SF<sub>6</sub> qui a été fournie, ainsi que du type et de la quantité de matériaux adsorbants. Cela dépend de l'historique de fonctionnement et de service de l'appareillage électrique concerné. Un interrupteur de charge est susceptible de contenir de bien plus faibles quantités de produits de décomposition qu'un disjoncteur à fort pouvoir de coupure, ayant coupé fréquemment le courant de défaut.

L'Annexe D fournit des exemples pratiques de calcul de la quantité de produits de décomposition. Dans la grande majorité des cas, y compris celui des disjoncteurs, le degré de décomposition est faible.

Les raisons à cela sont les suivantes:

- En moyenne, les coupures à haute intensité en service normal sont très rares.
- Les matériaux adsorbants sont installés dans les compartiments sous gaz.

Les caractéristiques du SF<sub>6</sub> et la quantité de produits de décomposition prévisibles pour les différents types d'appareillages électriques sont indiquées dans le Tableau 16.

**Tableau 16 – Caractéristiques du SF<sub>6</sub> et quantité de produits de décomposition prévisibles**

Configuration	Caractéristiques du SF <sub>6</sub>	Quantité prévisible de produits de décomposition
Jeux de barres d'un poste à isolation gazeuse, boîte à câbles, disjoncteur sous vide (le SF <sub>6</sub> est utilisé comme milieu isolant), ...	SF <sub>6</sub> très faiblement décomposé	De zéro à quelques dixièmes de pourcent par volume
Sectionneur de mise à la terre et sectionneur d'un poste à isolation gazeuse	SF <sub>6</sub> faiblement décomposé	Léger dépôt de poudre
Interrupteur de charge moyenne tension et artères		Léger dépôt de poudre
Disjoncteur moyenne et haute tension		Jusqu'à quelques pourcent par volume, légers dépôts de poudre
Tout compartiment à remplissage de gaz après la formation d'un arc lié à un défaut interne	SF <sub>6</sub> fortement décomposé	Pourrait dépasser 5 % par volume, Moyens à forts dépôts de poudre

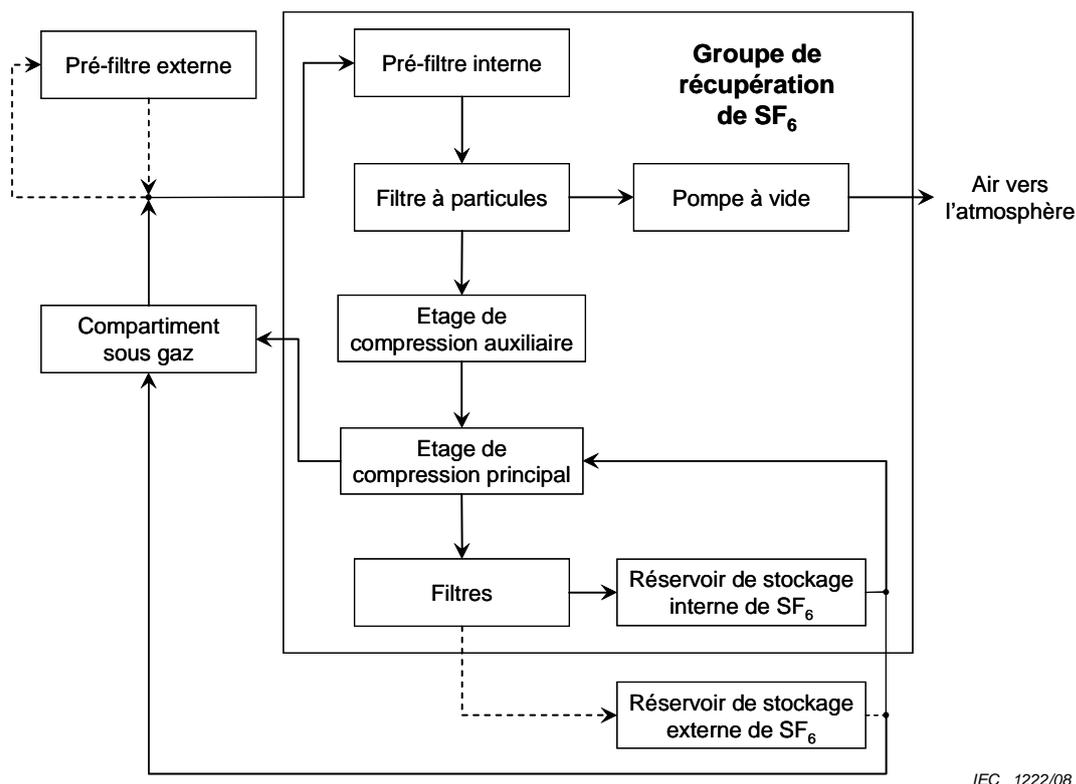
## 11 Description des appareils de manipulation du SF<sub>6</sub>

Le présent article fournit les recommandations relatives aux spécifications et aux critères minimum de fonctionnalité et de performance nécessaires pour les appareils de manipulation du SF<sub>6</sub> et les composants spécifiques y afférents.

### 11.1 Groupe de récupération

Il convient de choisir le type et la dimension appropriés du groupe de récupération selon la quantité de SF<sub>6</sub> à manipuler. La Figure 12 montre le mécanisme de fonctionnement de base d'un groupe de récupération polyvalent. Les fonctions types d'un groupe de récupération étalon sont les suivantes:

- Evacuation de l'air du compartiment sous gaz
- Remplissage du SF<sub>6</sub> dans le compartiment sous gaz
- Récupération du SF<sub>6</sub> contenu dans le compartiment sous gaz
- Stockage et filtrage du SF<sub>6</sub>
- Mise à l'atmosphère du compartiment sous gaz avec de l'air ambiant.



IEC 1222/08

**Figure 12 – Groupe de récupération polyvalent**

### 11.1.1 Pré-filtres externes et internes

La récupération du SF<sub>6</sub> usagé nécessite l'utilisation d'un pré-filtre, externe ou interne. Les produits de décomposition gazeux réactifs sont des composés acides susceptibles d'endommager le groupe de récupération ou le conteneur de stockage de gaz. Les exigences relatives à l'unité de pré-filtration sont fondamentalement les mêmes que celles relatives aux unités de filtration installées sur le groupe de récupération polyvalent, la capacité de pré-filtration pouvant toutefois être bien plus grande.

Les principales caractéristiques recommandées sont les suivantes:

- Dimension des pores inférieure à 10 µm (faible résistance à l'écoulement d'air)
- Humidité résiduelle inférieure à 200 ppmv
- Humidité des produits de décomposition gazeux réactifs résiduelle inférieure à 200 ppmv.

### 11.1.2 Filtres

L'utilisation de filtres est nécessaire pour retirer les produits de décomposition gazeux réactifs avant leur stockage – permettant ainsi de réutiliser le SF<sub>6</sub>. Ces filtres sont installés dans le groupe de récupération.

Le Tableau 17 présente des modèles de filtres types utilisés lors de la régénération du SF<sub>6</sub>.

**Tableau 17 – Modèles de filtres types utilisés lors de la régénération du SF<sub>6</sub>**

Modèle de filtre	Tâches	Principales caractéristiques
Filtre à particules	Retrait des produits de décomposition solides et autres particules à l'orifice d'entrée du groupe de récupération	Dimension des pores inférieure à 1 µm
Filtre sec	Retrait des produits de décomposition gazeux réactifs et élimination de l'humidité	Humidité résiduelle inférieure à 100 ppmv Combinaison SO <sub>2</sub> +SO <sub>F</sub> <sub>2</sub> inférieure à 12 ppmv Capacité de rétention de particules
Filtre à huile	Retrait de l'huile le cas échéant	Filtre spécial utilisant du charbon actif

### 11.1.2.1 Filtre à particules

Certains produits de décomposition, générés lors des opérations de coupure, sont constitués de fines particules solides (par exemple particules métalliques, produits de décomposition solides). Le côté intérieur du filtre à particules est constitué de papier ou d'un tissu contrecollé adapté, capable de retenir les particules d'une dimension supérieure à 1µm. Le filtre à particules est normalement installé à l'entrée et en amont de la sortie du groupe de récupération, afin de protéger les parties de ce dernier ainsi que le conteneur de stockage de gaz.

### 11.1.2.2 Filtre sec

Des filtres appropriés peuvent adsorber l'humidité et les produits de décomposition gazeux réactifs. Ils sont utilisés principalement combinés avec le filtre à particules. Des filtres moléculaires d'une dimension de pores inférieure à 0,5 nm sont utilisés. Une dimension de pores plus grande peut générer, dans certaines conditions, des réactions exothermiques thermodynamiques entraînant elles-mêmes une surchauffe importante des filtres.

Il convient de ne pas utiliser de chaux sodée (NaCO<sub>3</sub>) comme matériau filtrant du SF<sub>6</sub> dans la mesure où celle-ci, lorsqu'elle est en contact avec certains produits de décomposition gazeux réactifs, produit du CO<sub>2</sub>, difficile à dissocier du SF<sub>6</sub>.

### 11.1.2.3 Filtre à huile

Il convient d'intégrer un séparateur d'huile dans le système de traitement du SF<sub>6</sub> si une machine lubrifiée à l'huile est utilisée ou si un composant électrique à huile est intégré à l'appareillage électrique utilisant du SF<sub>6</sub>. Le retrait de l'huile s'effectue en plusieurs étapes afin d'éviter toute diffusion de cette dernière.

NOTE Afin de réduire le risque de contamination par l'huile au minimum, l'utilisation d'appareils lubrifiés à l'huile n'est pas recommandée. L'expérience montre que la maintenance et l'inefficacité des filtres de séparation de l'huile installés sur ces appareils contribuent à accroître le risque de contamination par l'huile à un niveau inacceptable.

### 11.1.3 Pompe à vide

La pompe à vide est utilisée pour évacuer les gaz différents du SF<sub>6</sub>, généralement l'air ou de l'azote, contenus dans le compartiment sous gaz/conteneur/bouteilles d'échantillons, et ce, afin d'éviter tout mélange du SF<sub>6</sub> avec d'autres gaz.

Il convient que la pression résiduelle à l'entrée de la pompe à vide soit inférieure à 100 Pa. Il est recommandé d'employer des pompes à vide avec une pression résiduelle à l'entrée inférieure à 10 Pa, afin d'accélérer l'évacuation des gaz des compartiments sous gaz.

La pompe à vide est équipée d'un manomètre à vide. Il convient que la résolution du manomètre à vide soit au moins inférieure à 1 kPa (la valeur recommandée est inférieure à 10

Pa). Des manomètres à vide indépendants du type de gaz sont généralement recommandés. Les capteurs thermiques à vide dépendent du type de gaz et ne sont de ce fait pas recommandés dans la mesure où ils réagissent avec le SF<sub>6</sub> et les vapeurs de différentes manières, conduisant à une lecture erronée des manomètres.

L'utilisation d'un robinet est recommandée pour isoler la connexion entre le compartiment sous gaz et la pompe à vide. Il convient que le robinet puisse se fermer au moins de manière manuelle (une fermeture automatique étant recommandée) après l'arrêt de la pompe à vide, de manière à éviter que l'huile ne se diffuse dans le compartiment sous gaz.

Il convient que la capacité de la pompe à vide soit adaptée au volume du compartiment sous gaz et au temps d'évacuation. Le diamètre de connexion est également très important. Un diamètre de connexion de 20 mm ou de ¾ de pouce est recommandé pour un compartiment sous gaz dont le volume est de 1 000 l. En cas d'utilisation de diamètres plus petits, le processus d'évaluation dure bien plus longtemps et le recours à une pompe à vide de plus grande capacité n'est pas utile.

#### 11.1.4 Compresseurs principal et auxiliaire

Lorsque la pression du SF<sub>6</sub> dans le compartiment à remplissage de gaz est supérieure à la pression du conteneur de stockage, il est plus rapide de permettre une détente directe du gaz. Dans tous les autres cas, l'utilisation d'un compresseur est nécessaire pour récupérer le gaz. Dans la mesure où la pression dans le compartiment à remplissage de gaz peut varier dans une large plage, il convient d'utiliser un système à double compresseur:

- Le compresseur principal, utilisant habituellement un système à piston, qui fonctionne entre une pression d'entrée du gaz proche de 100 kPa (généralement supérieure à 50 kPa) et la pression à l'intérieur du conteneur de stockage de gaz.
- Le compresseur auxiliaire, relié en série si nécessaire, fonctionne entre la pression à l'intérieur du compartiment sous gaz et la pression à l'entrée du compresseur principal.

NOTE 1 La quasi-totalité des compresseurs à piston peuvent être utilisés. Il est toutefois préférable d'utiliser des compresseurs qui fonctionnent à sec et à fermeture hermétique, afin de réduire toute possibilité d'échappement de SF<sub>6</sub> et de contamination par l'huile. La pression à l'entrée des compresseurs en l'état de la technique peut atteindre 100 Pa.

NOTE 2 Une pression de sortie assignée du compresseur de 2,5 MPa est suffisante pour stocker le SF<sub>6</sub> sous une forme gazeuse (une pression de 5 MPa est recommandée). Un dispositif de refroidissement supplémentaire peut être utilisé pour accélérer la récupération du SF<sub>6</sub>.

#### 11.1.5 Conteneurs de stockage de gaz externes et internes

Les appareils sous pression disponibles dans le commerce ou les conteneurs de stockage spéciaux destinés au SF<sub>6</sub> usagé peuvent être utilisés comme conteneurs de stockage de gaz. Ces appareils sont mobiles, fixes ou installés dans le groupe de récupération. Seuls les conteneurs spécialement agréés pour le stockage et/ou transport du SF<sub>6</sub> usagé sont autorisés. Il convient que la pression maximale du conteneur de stockage soit adaptée à la pression finale du compresseur. Les règlements locaux applicables au fonctionnement des appareils sous pression sont respectés. Une pression nominale de 5 MPa est utilisée pour les conteneurs de stockage comportant du SF<sub>6</sub> liquide.

#### 11.1.6 Evaporateur et appareil de chauffage des conteneurs de stockage de gaz

Si du SF<sub>6</sub> est stocké sous forme liquide et utilisé sous forme de gaz, la formation de glace ou le givrage des conteneurs de stockage du gaz se produit lorsque de grandes quantités de gaz sont manipulées pendant une période de courte durée. L'évaporateur, qui réceptionne le SF<sub>6</sub> liquide provenant du conteneur de stockage de gaz, est conçu de manière à ce qu'aucun liquide n'atteigne le compartiment sous gaz.

Les appareils de chauffage des conteneurs de stockage de gaz sont conçus de manière à éviter toute surchauffe accidentelle et à ne pas dépasser une température de gaz de 60 °C.

### 11.1.7 Conduites de gaz et raccord de tuyauteries

Il convient que les conduites de gaz et les raccords de tuyauteries soient conçus de manière à éviter les échappements et toute corrosion. Du cuivre et du laiton ou de l'acier inoxydable peuvent être utilisés à cette fin. Il convient que la conception des conduites et les raccords tiennent compte des vibrations de sorte qu'il ne soit pas nécessaire d'effectuer des opérations périodiques telles que le resserrage des raccords.

### 11.1.8 Instruments de contrôle

Il convient de prévoir des manomètres de contrôle destinés à indiquer la pression de gaz dans le compartiment sous gaz, le niveau de vide, la température du gaz, etc. Il convient de placer les manomètres de sorte que l'opérateur puisse les voir lorsqu'il utilise le groupe de récupération polyvalent. Il convient que la précision et la résolution des manomètres permettent de conserver des conditions de fonctionnement en toute sécurité.

### 11.1.9 Soupapes de sûreté

Les soupapes de sûreté sont utilisées dans le cycle de traitement du SF<sub>6</sub> pour la décharge de la pression. Les règlements locaux de sécurité sont appliqués. Il convient d'utiliser des soupapes de sûreté qui ne libèrent pas directement le SF<sub>6</sub> dans l'atmosphère.

### 11.2 Raccords de tuyaux flexibles

Des raccords de tuyaux flexibles permettent de connecter le groupe de récupération, le conteneur de stockage de gaz et le compartiment sous gaz. Il convient de veiller à éviter toute présence d'air ou d'autres composés à l'intérieur des tuyaux flexibles de manière à réduire toute possibilité de contamination du gaz. Pour cette raison, des raccords de tuyaux souples comportant à la fois des manchons d'accouplement à fermeture automatique et à étanchéité sous vide doivent être utilisés. Des tuyaux flexibles appropriés, généralement en PTFE (polytétrafluoréthylène ou Téflon) ou en acier inoxydable flexible, capables de résister au vide et aux infiltrations, doivent être utilisés.

### 11.3 Dispositifs mobiles de mesure de gaz

Le Tableau 18 fournit une étude sur les dispositifs de mesure de gaz, y compris l'étendue de mesure et l'exactitude minimale recommandées.

**Tableau 18 – Dispositifs de mesure de gaz**

Dispositif	Mesure	Etendue/plage	Exactitude minimale
Appareil de mesure du point de rosée	Humidité	Point de rosée: -50 à 0 °C	±2 °C
Mesure du pourcentage de SF <sub>6</sub>	SF <sub>6</sub> pourcentage SF <sub>6</sub> /N <sub>2</sub> ou SF <sub>6</sub> /air	0 à 100 % par vol.	±1 % par volume
Analyseurs de produits de décomposition gazeux réactifs	Produits de décomposition tels que par exemple SO <sub>2</sub> Brouillard d'huile	1 à 25 ppmv 0,16 à 1,6 ppmv	±15 % de l'étendue complète
Manomètre de mesure de la pression du SF <sub>6</sub>	Pression	0 à 1 MPa	±10 kPa
Thermomètre	Température	-25 à 70 °C	±1 °C

Il convient de tenir compte de la température du gaz pour une comparaison à la température de référence de 20 °C.

Les mesures de la qualité du gaz peuvent être effectuées dans des conditions de laboratoire et sur site. Les paragraphes suivants décrivent les instruments mobiles les plus couramment utilisés sur site pour la mesure:

- De la teneur en humidité du gaz;
- Du pourcentage/de la quantité de SF<sub>6</sub> présent(e) dans les gaz inertes;
- De la quantité résiduelle de produits de décomposition gazeux réactifs/teneur d'acidité résiduelle.

Toutefois, certains autres instruments reposant sur les nouvelles technologies sont disponibles sur le marché et permettent une détermination combinée des caractéristiques de gaz multiples.

### 11.3.1 Appareil de mesure du point de rosée

La teneur en humidité peut être mesurée avec différents principes et instruments de mesure. Un appareil de mesure du point de rosée constitue toutefois l'instrument mobile le plus courant utilisé à cette fin. L'instrument mesure le point de rosée du gaz, exprimé en °C, et peut le convertir en concentration massique relative, exprimée en mg/kg.

Les caractéristiques souhaitables sont les suivantes:

- Présence d'un capteur résistant aux indices d'huile et aux gaz corrosifs;
- Présence de tuyaux de raccordement résistant à l'infiltration, utilisant des raccords de robinets auto-étanches;
- Présence de dispositifs étalonnés ou pouvant être étalonnés sur site;
- Aucun échappement de SF<sub>6</sub> dans l'environnement (par exemple utilisation d'un compresseur de petite capacité pour le remplissage de gaz ou d'une bouteille vide);
- Quantité de gaz utilisée par mesure inférieure à 6 g;
- Temps moyen pour obtenir l'affichage inférieur à 5 min.

### 11.3.2 Dispositif de mesure du pourcentage de SF<sub>6</sub>

Des dispositifs permettant de comparer la vitesse du son ou la conductivité thermique du mélange de SF<sub>6</sub> par rapport à du SF<sub>6</sub> pur sont utilisés pour déterminer le pourcentage de SF<sub>6</sub>. Les systèmes basés sur la vitesse du son sont rapides (temps de réponse inférieur à 1 min), ont une précision de ± 1 % par vol., ne nécessitent pas de nouvel étalonnage et utilisent uniquement une quantité de gaz minimale. Ces systèmes affichent la concentration de SF<sub>6</sub> exprimée en % par volume. Ces systèmes font l'objet d'un étalonnage principalement pour des mélanges de SF<sub>6</sub> et d'azote et/ou air.

Les caractéristiques souhaitables sont les suivantes:

- Aucun échappement de SF<sub>6</sub> dans l'environnement (par exemple utilisation d'un compresseur de petite capacité pour le remplissage de gaz ou d'une bouteille vide);
- Quantité de gaz utilisée par mesure inférieure à 3 g.

Il convient de ne pas utiliser de dispositifs qui permettent de mesurer la concentration des gaz non réactifs (tels que des détecteurs d'oxygène), puis de calculer le pourcentage par volume de SF<sub>6</sub>, dans la mesure où des gaz non réactifs différents tels que de l'azote ou du CF<sub>4</sub> peuvent être présents.

### 11.3.3 Tubes à réactions sensibles au SO<sub>2</sub>

L'apport de SF<sub>6</sub> contenant du SO<sub>2</sub> dans les tubes à réactions entraîne une variation de leur couleur initiale. Les tubes à réactions contenant du SO<sub>2</sub> sont également sensibles au SOF<sub>2</sub>. Une petite quantité de SF<sub>6</sub> (~6 g) en provenance des appareils se révèle nécessaire. Cet

échantillon de gaz s'écoule dans le tube à réactions afin d'effectuer la mesure. Il est exprimé en  $\mu\text{l/l}$ . Une étendue de mesure comprise entre 0 et 25 ppmv est recommandée.

Les caractéristiques souhaitables sont les suivantes:

- Etalonnage pour les gaz  $\text{SO}_2$  et  $\text{SOF}_2$ ;
- Présence de tuyaux de raccordement résistant aux produits de décomposition gazeux réactifs et utilisant des raccords de robinets auto-étanches;
- Aucun échappement de  $\text{SF}_6$  dans l'environnement (par exemple utilisation d'un compresseur de petite capacité pour le remplissage de gaz ou d'une bouteille vide);
- Quantité de gaz utilisée par mesure inférieure à  $\sim 6$  g.

Il convient de ne pas utiliser de tubes à réactions sensibles au HF, dans la mesure où ce gaz réagit rapidement au contact de tous les métaux pour former des fluorures métalliques.

#### 11.3.4 Détecteurs de $\text{SF}_6$ mobiles

Les détecteurs de  $\text{SF}_6$  mobiles relèvent généralement de deux catégories:

- a) Les détecteurs à capture d'électrons, utilisant une source à particules Bêta pour ioniser un échantillon aspiré. Le courant ionique entre les électrodes est mesuré. Un gaz porteur inerte est habituellement utilisé. Ce type de détecteur est bien plus coûteux et nettement moins mobile que celui de la catégorie b). Des sensibilités de l'ordre de 0,1 ppmv de  $\text{SF}_6$  dans l'air peuvent être atteintes.
- b) Une cellule de décharge par effet couronne à haute tension (1 kV à 2 kV), appliquée à une configuration d'électrodes pointe plan. Le courant de décharge est mesuré. Ce type de détecteur est utilisé dans une gamme d'appareils à grande mobilité, alimentés par batteries, et de coût relativement faible. Des sensibilités inférieures à 10 ppmv peuvent être obtenues, toutefois pas avec toutes les unités disponibles [7].

Les détecteurs du premier type sont généralement utilisés pour la localisation et pour la quantification des échappements.

Les détecteurs du second type, s'ils sont suffisamment sensibles, pourraient être utilisés pour déterminer la présence éventuelle de  $\text{SF}_6$  dans une zone, et peuvent être utiles pour détecter des échappements.

#### 11.3.5 Systèmes de détecteurs de $\text{SF}_6$ à alarme

Les systèmes à alarme nécessitent l'utilisation de détecteurs de très grande stabilité à long terme. La caractéristique d'absorption des rayons infrarouges du  $\text{SF}_6$  sert de base pour la plupart des détecteurs de ce type [8]. Une source infrarouge est utilisée pour chauffer un échantillon de gaz dans un appareil de mesure à pression différentielle utilisant un transducteur à capacité sensible. L'augmentation de pression est mesurée.

Des sensibilités de l'ordre de 10 ppmv peuvent être atteintes. Un dispositif d'étalonnage automatique peut être incorporé. Dans certaines installations, des échantillons d'air sont prélevés en divers endroits et envoyés à un détecteur central. Le point de prélèvement actif peut être choisi automatiquement ou manuellement.

Les systèmes à alarme comportant des détecteurs de  $\text{SF}_6$  sont généralement utilisés uniquement lorsque de grandes quantités de  $\text{SF}_6$  sont contenues dans des appareillages électriques situés à l'intérieur, tels que les installations à isolation gazeuse haute tension.

#### **11.4 Bouteille pour échantillons de gaz**

L'utilisation de bouteilles en acier inoxydable d'un volume inférieur à 1 l est recommandée. Il convient que la quantité de gaz utilisée ne soit pas inférieure à 6 g. Il convient de prélever le gaz directement dans le conteneur (par exemple compartiment à remplissage de gaz, conteneur de stockage de gaz du groupe de récupération) au moyen d'accessoires adaptés. Une pression du conteneur de gaz supérieure à la pression maximale admissible de la bouteille entraîne l'utilisation d'un régulateur de pression et d'un manomètre.

## Annexe A (informative)

### Hexafluorure de soufre

#### A.1 Introduction

L'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) est un gaz synthétique formé de 6 atomes de fluor rassemblés autour d'un atome de soufre central. La liaison chimique entre le fluor et le soufre est identifiée comme l'une des liaisons atomiques existantes les plus stables. Six de ces liaisons confèrent à la molécule une stabilité chimique et thermique élevée.

Le SF<sub>6</sub> présente une électronégativité élevée (c'est-à-dire qu'il a tendance à attirer des électrons libres). Ce même gaz présente par ailleurs une combinaison unique de propriétés physiques: rigidité diélectrique élevée (environ 3 fois celle de l'air), capacités d'interruption thermique élevées (environ 10 fois celles de l'air) et capacité de transfert de chaleur élevée (environ le double de celle de l'air).

De ce fait, l'industrie électrique utilise avec succès le SF<sub>6</sub>, et ce depuis le début des années 1960, dans les appareillages électriques destinés au transport et à la distribution haute tension de l'électricité (par exemple appareillage haute et moyenne tension, postes isolés au gaz, disjoncteurs, transformateurs, câbles).

Les autres applications industrielles non électriques incluent: la production d'aluminium, les pièces coulées en magnésium, la production de semi-conducteurs, la production de dispositifs à écran plat, les cycles de combustibles nucléaires, les fenêtres à isolation phonique, les pneumatiques, les radars à hautes performances, les gaz traceurs pour les mesures météorologiques, les tuyauteries de centrales électriques, ainsi que les applications militaires.

#### A.2 Propriétés chimiques

Le SF<sub>6</sub> pur est inodore, sans saveur, incolore, non toxique, non inflammable, particulièrement stable et inerte. Sa solubilité dans l'eau est 4 fois inférieure à celle de l'air. Sa compatibilité avec les matériaux utilisés dans les constructions électriques est similaire à celle de l'azote, jusqu'à des températures voisines de 180 °C.

Le Tableau A.1 présente les principales caractéristiques chimiques.

**Tableau A.1 – Principales caractéristiques chimiques du SF<sub>6</sub> [9]**

Formule	SF <sub>6</sub>
Numéro CAS	2551-62-4
Masse moléculaire	146,05 g/mol
Teneur en soufre	21,95 %
Teneur en fluor	78,05 %
Structure moléculaire	Octaédrique avec des atomes de fluor aux six arêtes
Liaisons	Covalentes
Section efficace d'impact	0,477 nm
Température de décomposition dans le conteneur de quartz	500 °C

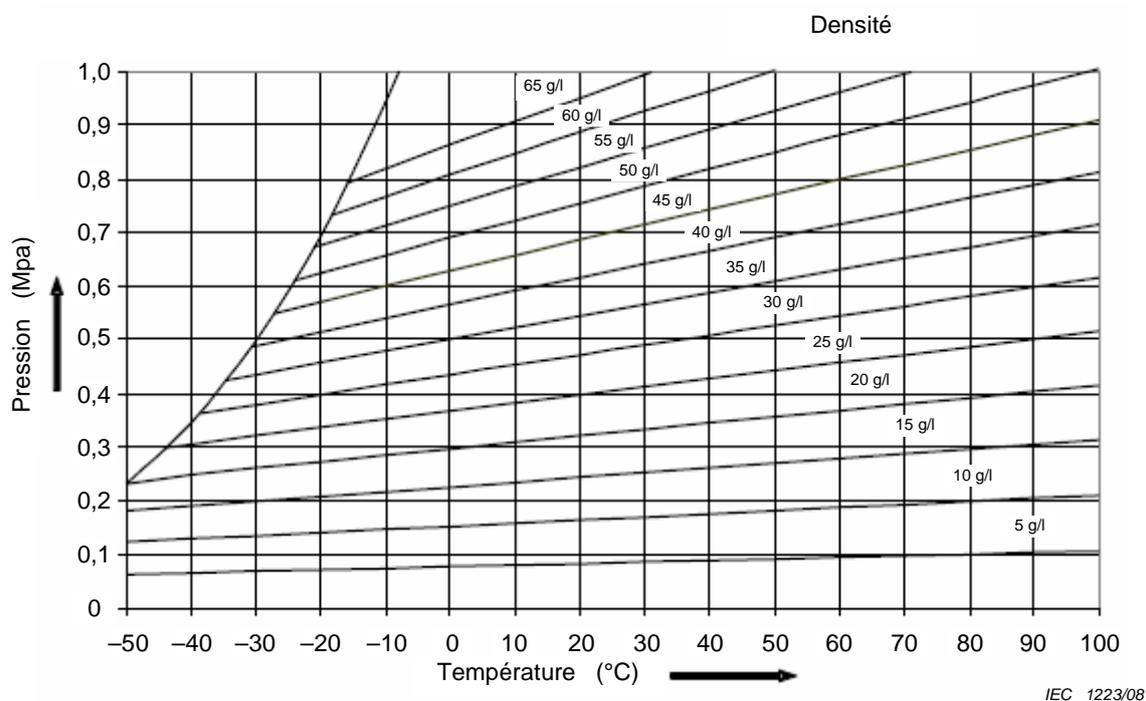
### A.3 Propriétés physiques

Le SF<sub>6</sub> est l'un des plus lourds parmi les gaz connus: dans des conditions atmosphériques normales, il est environ cinq fois plus lourd que l'air.

Son mélange avec l'air, que ce soit par convection ou par diffusion, est lent. Une fois mélangé, il ne se sépare pas une nouvelle fois.

Bien que la conductivité thermique du SF<sub>6</sub> soit inférieure à celle de l'air, ses propriétés de transfert de chaleur sont globalement deux à cinq fois supérieures grâce à sa plus faible viscosité et à sa plus forte densité.

Dans les appareillages électriques, la plage de pression normale du SF<sub>6</sub> est comprise entre 0,1 MPa et 0,9 MPa absolu. Ses caractéristiques pression/température/densité sont décrites à la Figure A.1.



**Figure A.1 – Caractéristiques pression/température/densité du SF<sub>6</sub> [9]**

Le Tableau A.2 présente les principales caractéristiques physiques.

**Tableau A.2 – Principales caractéristiques physiques du SF<sub>6</sub> [9]**

Densité à 20 °C et 100 kPa	6,07 kg/m <sup>3</sup>
Conductivité thermique à 25 °C et 100 kPa	0,013 W/(m.K)
Température critique	45,58 °C
Pression critique	3,759 MPa
Densité critique	740 kg/m <sup>3</sup>
Solubilité dans l'eau à 20 °C	6,31 cm <sup>3</sup> SF <sub>6</sub> /kg H <sub>2</sub> O
Vitesse du son à 0 °C et 100 kPa	129,06 m/s
Indice de réfraction	1,000783
Chaleur de formation	-1221,58±1,0 kJ/mol
Entropie de réaction	-349,01 J/(mol.K)
Chaleur massique à pression constante à 20 °C 100 kPa	96,60 J/(mol.K)
Equation d'état	Voir Figure A.1

#### A.4 Propriétés électriques

Les excellentes propriétés diélectriques du SF<sub>6</sub> sont dues au caractère électronégatif de sa molécule. Celle-ci a une forte tendance à capter les électrons libres, formant ainsi des ions lourds à faible mobilité, rendant très difficile la formation d'avalanches électroniques.

La rigidité diélectrique du SF<sub>6</sub> est environ 3 fois supérieure à celle de l'air dans les mêmes conditions.

Du fait de sa basse température de dissociation et de son énergie élevée de dissociation, le SF<sub>6</sub> est un excellent gaz d'extinction d'arcs.

Quand un arc électrique est refroidi dans du SF<sub>6</sub>, il reste conducteur jusqu'à une température relativement basse, minimisant ainsi le courant arraché avant le zéro de courant, et évitant ainsi des surtensions élevées.

Le Tableau A.3 présente les principales caractéristiques électriques du SF<sub>6</sub>.

**Tableau A.3 – Principales caractéristiques électriques du SF<sub>6</sub> [9]**

Champ d'amorçage critique relatif à la pression	89 V/(m.Pa)
Constante diélectrique relative à 25 °C et à 0,1 MPa absolu	1,00204
Facteur de perte (tan δ) à 25 °C et à 0,1 MPa absolu	<2,0 × 10 <sup>-7</sup>
Coefficient d'ionisation effectif	$\frac{\alpha}{p} = A \frac{E}{p} - B$ <p> <math>\alpha</math>: m<sup>-1</sup>  <math>E</math>: V/m  <math>p</math>: Pa  <math>A</math>: 2,8 × 10<sup>-2</sup>/V  <math>B</math>: 89 V/(m.Pa)                 </p>

## **A.5 Manipulation, phénomènes dangereux et caractéristiques de santé**

Le SF<sub>6</sub> ne supporte pas la combustion. Dans la mesure où ce gaz est bien plus lourd que l'air, il a tendance, dans des conditions de mélange insuffisant avec l'air, à s'accumuler à des niveaux peu élevés. Il se peut que des zones souterraines, mal ventilées ou non ventilées (par exemple gaines de câbles, tranchées, fosses de visite, systèmes d'évacuation), contiennent encore du SF<sub>6</sub>. Il convient que le personnel soit informé du danger d'asphyxie dans ce type de zones. Il convient de ne pas pénétrer dans des appareillages électriques contenant du SF<sub>6</sub> sans une ventilation et sans l'utilisation de protections individuelles adéquates.

Le SF<sub>6</sub> est non toxique et biologiquement inerte. Selon l'American Conférence of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), la concentration maximale admissible TLV (Threshold Limit Value) en termes de moyenne pondérée dans le temps (TWA) est de 1 000 ppmv (6 100 mg/m<sup>3</sup>). Cette valeur s'applique aux postes de travail dans lesquels le personnel exerce ses activités 8 h par jour, 5 jours par semaine [10]. Ce TLV est normalement adoptée pour tous les gaz non dangereux non présents dans l'atmosphère.

Le SF<sub>6</sub> ne nuit pas à la vie humaine ou à l'écosystème, mais constitue en revanche un gaz à effet de serre puissant et persistant, comme décrit dans l'Annexe B.

La manipulation du SF<sub>6</sub> nécessite par conséquent d'adopter des procédures visant à maintenir le gaz dans un cycle fermé, en évitant ainsi tout échappement volontaire dans l'environnement.

Du SF<sub>6</sub> de qualité technique est disponible dans le commerce, conformément à la CEI 60376.

Le SF<sub>6</sub> usagé peut être réutilisé sur site, conformément à la CEI 60480.

Le SF<sub>6</sub> usagé peut être réutilisé sur le site du fabricant de produits gazeux, selon la spécification de ce dernier. Dans le cas où le gaz n'est pas conforme à la spécification, il est éliminé selon les règlements locaux ou internationaux en matière de gestion des déchets.

## **Annexe B** (informative)

### **Effets du SF<sub>6</sub> sur l'environnement**

#### **B.1 Introduction**

Toute activité humaine a un effet sur l'environnement; l'impact d'une activité particulière dépend de son étendue et des matériaux impliqués. Les activités de production ou d'utilisation de gaz peuvent générer des échappements de ces mêmes gaz dans l'atmosphère. Trois aspects principaux sont pris en considération:

- Ecotoxicologie: matériaux et gaz toxiques avec effets sur l'environnement et toutes les formes de vie.
- Destruction de la couche d'ozone: Accroissement des trous dans la couche d'ozone stratosphérique.
- Réchauffement de la planète/changement climatique: Accroissement de l'effet de serre.

#### **B.2 Ecotoxicologie**

Le SF<sub>6</sub> n'est pas toxique et ne présente pas de potentiel avéré d'activité ou d'écotoxicité chronique. Sa solubilité dans l'eau étant très faible, il ne présente aucun danger pour les eaux de surface et souterraines ou pour le sol. Il ne se produit aucune accumulation biologique dans le cycle de nutrition. Le SF<sub>6</sub> ne nuit par conséquent pas à l'écosystème. Le SF<sub>6</sub>:

- n'est pas cancérogène: n'induit pas le cancer;
- n'est pas mutagène: ne provoque pas de dommage à la constitution génétique;
- n'est pas nitrifiant: n'induit aucun enrichissement dans la chaîne alimentaire;
- est faiblement soluble dans l'eau.

#### **B.3 Destruction de la couche d'ozone**

Le SF<sub>6</sub> et ses produits de décomposition issus de leur application dans les appareillages électriques ne contribuent pas à la destruction de la couche d'ozone stratosphérique [9] dans la mesure où ils ne contiennent ni chlore et ni brome.

#### **B.4 Réchauffement de la planète/changement climatique (effet de serre)**

La température globale moyenne de la terre est le résultat d'un équilibre entre les effets chauffants des rayons solaires et le refroidissement associé au rayonnement infrarouge venant de la terre. Une partie du rayonnement infrarouge est réfléchi vers la surface de la terre et l'effet de serre constitue un phénomène naturel qui participe à la présence de la vie sur terre.

Cela est dû aux gaz naturels à effet de serre (principalement l'humidité, le dioxyde de carbone, le méthane) qui sont transparents aux rayons solaires, mais absorbent toutefois le rayonnement infrarouge réfléchi par la surface terrestre.

En l'absence des gaz à effet de serre, la chaleur émise par le soleil serait rayonnée dans l'espace et la température de la terre serait bien moins élevée.

La présence des gaz à effet de serre bloque une partie de l'énergie solaire dans l'atmosphère. Il en résulte une augmentation de la température moyenne de la planète par

rapport à la température qui aurait prévalu en l'absence de tout effet de serre. Les estimations scientifiques évaluent l'augmentation à 33 °C (d'une température de -18 °C à la température réelle de 15 °C) [11].

Le phénomène naturel d'effet de serre est actuellement largement prédominant, les activités humaines ne contribuant pour leur part que faiblement à l'effet de serre total. La contribution de ces activités étant toutefois de plus en plus importante, elles constituent aujourd'hui une source de préoccupation principale. Selon plusieurs études, la tendance réelle, si elle n'est pas inversée, entraînera une augmentation significative de la température moyenne de la planète et le climat mondial en sera modifié.

Les gaz à effet de serre anthropiques et naturels contribuent tous deux à l'effet de serre. Le protocole de Kyoto [13] est un accord international visant à réduire l'émission des gaz à effet de serre anthropiques.

L'éventail des gaz à effet de serre, qui doivent être contrôlés selon le protocole de Kyoto, est constitué du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), du méthane (CH<sub>4</sub>), de l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O), des hydrocarbures fluorés (HFC), des hydrocarbures perfluorés (PFC) et de l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>). Les trois dernières substances sont des gaz à effet de serre fluorés (ou gaz F).

Plusieurs entités scientifiques contrôlent de manière régulière les concentrations des différents gaz importants pour l'environnement, y compris les gaz définis dans le protocole de Kyoto. Le Groupe d'experts environnemental sur l'évolution du climat (GIEC), notamment, élabore des rapports d'évaluation périodiques, en actualisant les informations existantes sur les émissions et en évaluant leur impact futur potentiel sur l'environnement selon différentes hypothèses portant sur leurs tendances d'émissions. Le tout dernier rapport publié est le troisième rapport d'évaluation (TAR) qui date d'octobre 2001 [11].

Le quatrième rapport d'évaluation doit être publié fin 2007. Le GIEC a été créé en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). Les gaz F sont connus pour avoir un impact important sur le réchauffement de la planète par comparaison au CO<sub>2</sub>, principal gaz à l'origine de l'effet du réchauffement de la planète, et contribuent environ à concurrence de 1,5% à l'effet de gaz à effet de serre mondial. L'absorption élevée de rayonnement infrarouge par le SF<sub>6</sub>, associée à la longue durée de vie de ce gaz, explique son Potentiel de Réchauffement Global élevé (PRG) qui est 22 200 supérieur à celui du CO<sub>2</sub>, selon le troisième rapport d'évaluation. Le PRG est calculé sur une période de 100 ans pour un 1 kg de SF<sub>6</sub> associé à 1 kg de CO<sub>2</sub>. Sa contribution totale à l'effet de serre mondial dû à toutes les applications quelles qu'elles soient, s'élève environ à 0,2%.

Le PRG du seul SF<sub>6</sub> ne permet toutefois pas de mesurer l'impact sur l'environnement de l'appareillage électrique fondé sur la technologie SF<sub>6</sub>. Il convient d'évaluer l'impact sur l'environnement de toute application spécifique et/ou de le comparer au moyen de l'évaluation du cycle de vie – approche en termes d'évaluation du cycle de vie tel que réglementé par l'ISO 14040 [14].

L'industrie électrique utilise le SF<sub>6</sub> en cycle fermé, en l'introduisant par exemple dans des postes à isolation gazeuse (GIS), des disjoncteurs de gaz moyenne et haute tension (GCB), des conduites à isolation gazeuse (GIL) haute tension et des transformateurs de tension isolés au gaz (GVT). En Asie, des quantités importantes de SF<sub>6</sub> sont accumulées également dans des transformateurs d'énergie isolés au gaz (GIT).

L'industrie électrique, n'étant pas considérée comme l'utilisateur le plus important de SF<sub>6</sub> dans le monde, contribue dans une faible mesure à l'émission mondiale de SF<sub>6</sub>, bien en-deçà d'autres industries ou utilisateurs ayant une "application ouverte" du gaz. Son importance comme source de contribution varie toutefois considérablement d'une région à une autre et d'un pays à l'autre, selon les procédures de manipulation du SF<sub>6</sub> adoptées, l'étanchéité de l'appareillage électrique et la quantité de gaz accumulée dans les appareillages électriques.

Les taux d'émission moyens au niveau régional varient actuellement entre une valeur bien inférieure à 1% et une valeur supérieure à 10 %. En règle générale, les taux d'émission baissent de manière significative depuis 1995. Les actions ciblées du secteur industriel ont réduit leurs émissions de 50 % à 90% en Europe [15], Asie [16] et Amérique du Nord [17] et [18]. Ces actions comprennent:

- la conception d'appareillages électriques nécessitant une plus faible quantité de SF<sub>6</sub> et ayant un niveau d'étanchéité élevé;
- l'amélioration des processus et des appareils de manipulation dans toutes les étapes du cycle de vie selon le rapport technique actuel.

## **B.5 Produits de décomposition**

Les principales défaillances générant des échappements de gaz sont extrêmement rares comme l'indiquent les enregistrements de 40 ans d'expérience. Les quantités de gaz échappées dans ces cas extrêmes sont une fois encore très limitées compte tenu du caractère compartimenté des produits normalisés, limitant le défaut à son lieu d'origine. Les quantités de gaz concernées représentent ainsi de faibles pourcentages de la quantité totale de gaz accumulée dans un poste.

L'Annexe C montre que les produits de décomposition peuvent être convertis sans difficulté en produits neutres disponibles à l'état naturel. Les procédures pour leur traitement, leur manipulation et leur enlèvement permettent de s'assurer que leur effet sur l'environnement local est négligeable.

## **B.6 Politique de manipulation du SF<sub>6</sub> compatible avec l'environnement**

Il convient de manipuler le SF<sub>6</sub> dans un cycle fermé, en évitant tout échappement volontaire dans l'environnement. Parmi toutes les initiatives volontaires, la récupération et la réutilisation du gaz représentent une priorité maximale.

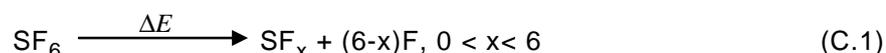
Des accords volontaires [19] impliquant des constructeurs et des utilisateurs ont été signés dans certains pays afin de contrôler et de réduire les échappements de SF<sub>6</sub> des appareillages électriques. En règle générale, dans ce type d'accords, les politiques compatibles avec l'environnement indiquent que le développement, la fabrication, l'installation, le fonctionnement, la maintenance et le démontage en fin de cycle de vie des appareillages électriques qui utilisent du SF<sub>6</sub>, nécessitent l'application de techniques et de procédures à l'état de l'art afin de réduire au minimum les échappements de SF<sub>6</sub>.

## Annexe C (informative)

### Produits de décomposition du SF<sub>6</sub>

#### C.1 Décomposition du SF<sub>6</sub>

Quand un arc se produit dans du SF<sub>6</sub>, pendant les opérations normales de coupure ou d'élimination des défauts ou dans l'éventualité peu probable d'un défaut d'arc interne, différents produits de décomposition sont générés simultanément en quantités variables [5], et [9]. Quand la molécule du SF<sub>6</sub> est soumise à la température, au rayonnement ou aux décharges électriques et lorsque la séparation des atomes de fluor se produit, un certain nombre de radicaux, d'ions ou de molécules neutres se forment selon le type d'excitation et l'apport d'énergie d'après l'équation suivante:



Quand l'apport d'énergie  $\Delta E$  cesse, la majorité des atomes se recombinent pour reformer du SF<sub>6</sub>, les autres se combinant avec différentes substances présentes dans le système, pour former une variété de produits finis stables. Ces substances comprennent, en particulier, de l'oxygène, de l'eau et également des matériaux utilisés dans la fabrication des appareillages électriques.

Ces produits de décomposition sont considérés dans la présente annexe en fonction de l'énergie fournie au SF<sub>6</sub>.

##### C.1.1 Comportement du SF<sub>6</sub> lors d'un arc électrique

Un arc de forte intensité se produit de façon normale au cours de la coupure d'un disjoncteur ou de l'élimination d'un défaut, et de façon anormale lors d'un arc lié à un défaut interne.

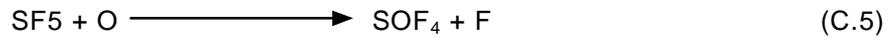
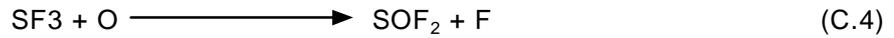
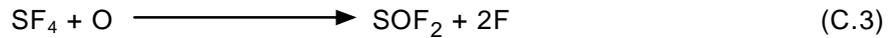
Au-delà de températures de 500 °C, le SF<sub>6</sub> commence à se décomposer en différents éléments dont il est constitué, le degré de décomposition étant directement proportionnel à la quantité d'énergie convertie. Pendant la phase de dissociation décrite dans l'équation (C.1), les molécules de SF<sub>6</sub> se divisent en atomes de soufre et de fluor à une température de 3 000 °C environ.

La grande quantité de chaleur absorbée pendant ce processus se dissipe en s'éloignant de la zone de formation de l'arc par rayonnement et convection. En dessous d'une température de 1 000 °C environ, les atomes se recombinent ou réagissent avec d'autres substances, comme les particules vaporisées d'électrodes métalliques, les parois de la cuve, des matières plastiques ou des impuretés. Des produits de décomposition gazeux et solides peuvent se former, y compris des fluorures métalliques et sulfureux, dont les plus courants sont le CuF<sub>2</sub>, AlF<sub>3</sub>, WF<sub>6</sub>, CF<sub>4</sub> et SF<sub>4</sub>.

Ces produits, généralement connus comme étant des produits de décomposition primaires, sont formés pendant ou peu après une décharge, en un temps inférieur à 1 s. Les dépôts de poudre pouvant se former à la surface des isolants en fonctionnement normal n'ont pas d'effet négatif sur leur performance diélectrique.

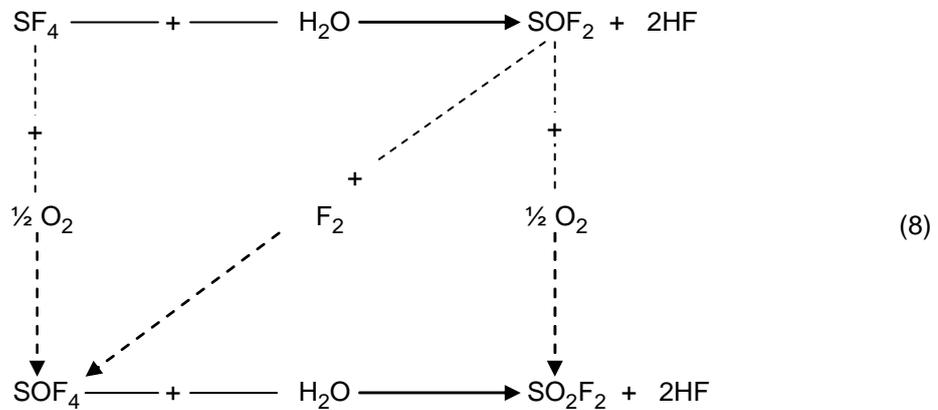
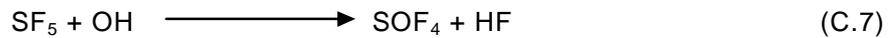
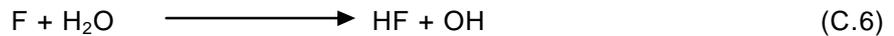
Certains produits de décomposition sont chimiquement stables; d'autres sont très instables, plus particulièrement en présence d'eau.

En présence d'oxygène, des produits de décomposition peuvent se former comme suit:



L'oxygène impliqué dans les réactions (C.2), (C.3), (C.4) et (C.5) peut rester présent suite au processus d'évacuation ou peut être dégagé des matériaux constituant les électrodes en période d'arc.  $SOF_2$  est le produit de décomposition principal.

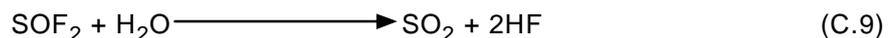
En présence de vapeur d'eau, les réactions suivantes se produisent:



Les lignes discontinues de l'équation (C.8) indiquent les réactions qui ne se produisent qu'à un degré limité au cours de la décomposition du  $SF_6$  dans un arc. Bien que les réactions de l'équation (C.8) impliquent la formation de grandes quantités de HF, on ne signale pas de quantités notables de ce produit à la suite de la formation d'un arc de puissance dans l'appareillage électrique. Cela est probablement dû au fait que la formation de produits de décomposition se produit principalement selon (C.2), (C.3) et (C.4). Il est également possible que le HF produit par les réactions de l'équation (C.8) réagisse ensuite avec les vapeurs métalliques pour former des fluorures métalliques.

Le  $SF_4$  se forme en quantités importantes, mais il s'hydrolyse rapidement (équation (C.8)) en présence de vapeur d'eau.

Si la présence de vapeur d'eau persiste, une hydrolyse supplémentaire a lieu, qui conduit à:



La littérature rapporte d'autres réactions; des produits de décomposition complémentaires de réaction à l'arc comme le  $S_2F_{10}$  peuvent se former. Toutefois, la quantité de  $S_2F_{10}$  produite en conditions d'arc est extrêmement faible, étant donné que les radicaux  $SF_5$  produits à haute température ne forment du  $S_2F_{10}$  que s'ils sont refroidis très rapidement, situation qui ne peut guère se rencontrer dans l'arc [20].

### C.1.2 Décomposition du $SF_6$ lors des décharges à faible énergie

Lorsque l'appareillage électrique contenant du  $SF_6$  fonctionne sous la tension de service, l'éventualité de décharges à faible énergie, telles que l'effet couronne, les décharges

d'étincelles ou les décharges partielles, ne peut être ignorée. Cependant, les concentrations des produits de décomposition issus de telles décharges restent vraisemblablement très faibles. Lorsque le SF<sub>6</sub> est décomposé, suite aux étincelles, les réactions décrites en pointillé dans l'équation (C.8) prédomineront [20].

### **C.1.3 Décomposition catalytique du SF<sub>6</sub> (comportement à haute température)**

Le SF<sub>6</sub> peut être chauffé jusqu'à 500 °C dans des enceintes en quartz sans se décomposer. Jusqu'à des températures de 150 °C environ, tous les matériaux couramment utilisés, comme les métaux, le verre, les céramiques, le caoutchouc et les résines polyester, résistent totalement au SF<sub>6</sub>. Ce n'est qu'à des températures dépassant 200 °C que certains métaux commencent à avoir un effet de décomposition sur le gaz, mais dans le cas de métaux et alliages habituellement utilisés, les mêmes effets ne sont observés de façon significative qu'à partir d'une plage de températures comprise entre 400 °C et 600 °C. [9].

Les températures maximales de fonctionnement à l'intérieur de l'appareillage électrique au SF<sub>6</sub> en l'absence d'arc étant très en deçà de ces valeurs, aucune décomposition de SF<sub>6</sub> de ce type n'est à craindre en cours de fonctionnement.

## **C.2 Comportement corrosif du SF<sub>6</sub> et de ses produits de décomposition**

Le SF<sub>6</sub> est un gaz totalement inerte. Il n'y a, de ce fait, aucune forme de corrosion possible directement liée au SF<sub>6</sub> lui-même. Néanmoins, les produits de décomposition primaires et secondaires, en présence de vapeur d'eau, peuvent former des électrolytes corrosifs susceptibles d'endommager certains matériaux utilisés à l'intérieur des appareillages électriques.

Les métaux couramment utilisés, comme l'aluminium, l'acier, le cuivre et le laiton, ne sont guère attaqués, alors que des matériaux tels que le verre, la porcelaine, le papier isolant et les matériaux analogues sont plus sensibles aux agressions, selon la concentration des substances corrosives présentes. D'autres matériaux isolants, comme la résine époxy, le polyester, le polyéthylène, l'oxyde de polyméthylène, le PTFE, le PVC, etc., ne sont pas significativement affectés.

Dès la conception des appareillages électriques, il est important de tenir compte de l'effet corrosif des produits de décomposition. Il est possible de prévenir la corrosion en éliminant toute humidité et en utilisant des matériaux adéquats.

### **C.3 Précautions à prendre lors du retrait des produits de décomposition**

L'humidité et les produits de décomposition présents dans un appareillage électrique en fonctionnement peuvent être réduits à des niveaux acceptables par adsorption. Les matières comme l'alumine, les tamis moléculaires ou autres substances peuvent remplir cette fonction. Ils adsorbent efficacement les produits de décomposition de façon pratiquement irréversible, et confèrent également au gaz une basse température de point de rosée [9].

La destruction des produits de décomposition, après leur retrait d'un appareillage électrique, est aisée. Les composés acides (acide sulfurique et fluorure d'hydrogène) sont détruits par des solutions alcalines.

La plupart des produits solides issus de la réaction sont insolubles dans l'eau ou le sont très difficilement; mais certains fluorures métalliques peuvent réagir en présence d'eau et former de l'acide fluorhydrique. Il est alors nécessaire de traiter, par exemple à l'hydroxyde de calcium (chaux), les produits solides issus de la réaction, afin de neutraliser ses composantes acides. Le dépôt ainsi obtenu pourra alors être éliminé conformément à la réglementation locale.

#### **C.4 Caractéristiques physiologiques des produits de décomposition**

Les produits de décomposition peuvent irriter la peau, les yeux et les muqueuses, notamment les voies respiratoires. En forte concentration, ces produits de décomposition peuvent provoquer des œdèmes pulmonaires, en cas d'exposition prolongée.

Le SF<sub>6</sub> contenant des produits de décomposition dégage une odeur désagréable, âcre, qui elle-même, présente un effet irritant. Les seuils olfactifs, en particulier pour le SOF<sub>2</sub>, le SO<sub>2</sub> et le HF, sont du même ordre de grandeur que les TLV. Du fait de ces caractéristiques, même de faibles quantités de produits de décomposition gazeux peuvent donner une infaillible indication d'avertissement dans les secondes qui suivent, avant que ne survienne le moindre risque d'empoisonnement [5].

## **Annexe D** (informative)

### **Effets potentiels sur la santé des produits de décomposition contenant du SF<sub>6</sub>**

#### **D.1 Introduction**

La présente annexe étudie les risques pour la santé provoqués par du SF<sub>6</sub> s'échappant de manière accidentelle dans l'atmosphère locale, suite à un échappement et dans le cadre d'un défaut interne.

Le SF<sub>6</sub> reste enfermé dans l'appareillage électrique en service normal, et les produits de décomposition formés sont neutralisés par des tamis moléculaires, ainsi que par les processus de recombinaison naturelle. Le SF<sub>6</sub> peut apparaître dans l'atmosphère à cause d'un échappement ou si un compartiment à remplissage de gaz ne peut plus contenir le gaz, par exemple dans l'éventualité peu probable d'un défaut interne. Il est nécessaire, lors de l'étude des risques pour la santé, de différencier clairement les échappements se produisant dans des conditions normales, et les défauts internes pouvant provoquer un échappement soudain de SF<sub>6</sub>.

Dans le cas d'un échappement, il est nécessaire de prendre en compte les effets d'une exposition prolongée aux produits de décomposition gazeux. La concentration de ces produits dans l'air doit rester suffisamment faible pour ne présenter aucune menace pour les personnes non protégées pendant une période normale de travail, par exemple de 8 h.

Dans le cas d'un échappement soudain de SF<sub>6</sub> dû à un arc interne, les procédures d'évacuation obligatoires et de ventilation impliquent une exposition momentanée. Une concentration de produits de décomposition supérieure à la concentration maximale admise pour une exposition, par exemple, de 8 h, peut être tolérée si le temps d'exposition est considérablement réduit. Il est donc clair que dans de tels cas, il convient de tenir compte de toutes les sources possibles d'émanations toxiques, ce qui nécessite de connaître en détail tous les produits formés. Pour cela, il convient qu'une étude complète considère à égalité les contributions à la toxicité dues au SF<sub>6</sub> et celles dues aux vapeurs de métal, de plastique, d'isolants de câbles, de peinture, etc.

NOTE Par exemple, en comparant les limites d'exposition de longue durée, les vapeurs de cuivre issues de la vaporisation des électrodes sont environ quatre fois plus toxiques que le SF<sub>6</sub> soumis à un arc (SOF<sub>2</sub>), alors que les vapeurs d'aluminium le sont environ quatre fois moins. Les deux peuvent se former en quantités importantes dans tous les cas où un arc électrique se produit, quel que soit le milieu d'isolement employé, et peuvent constituer le risque majeur pour la santé (voir D.4.7.2). La contribution des vapeurs issues de la combustion des plastiques (voir D.4.7.3) est aussi très significative.

Le premier objectif de la présente annexe est de fournir les conseils de base pour évaluer la concentration dans l'air des produits de décomposition toxiques dans un milieu où le SF<sub>6</sub> s'est échappé. Les effets d'autres substances potentiellement toxiques échappées dans des situations de défaut sont également pris en compte.

Les paragraphes suivants présentent les méthodes de calcul des risques liés à la présence dans l'atmosphère de produits de décomposition à la suite d'un échappement ou d'un défaut interne, ainsi que les principes adoptés pour effectuer ces calculs.

#### **D.2 Vue d'ensemble**

Des méthodes de calcul du risque lié à la présence dans l'atmosphère de produits de décomposition à la suite d'un échappement ou d'un défaut interne sont spécifiées dans la présente annexe. Les principes adoptés pour effectuer ces calculs sont présentés dans les articles suivants.

## D.3 Formation et effets sur la santé des produits de décomposition

### D.3.1 Formation de produits de décomposition

Lors de la formation d'arcs de puissance dans du SF<sub>6</sub>, les températures peuvent atteindre, au cœur de l'arc, une valeur de l'ordre de 10 000 K. A ces températures, les molécules du gaz sont totalement désintégrées en leurs atomes constituants, à savoir le soufre et le fluor, comme indiqué en C.1.1. Toutes impuretés présentes, telles que l'air ou la vapeur d'eau, se dissocient de la même manière. Ainsi il se crée localement une zone ne contenant que des atomes libres de soufre, de fluor, d'hydrogène, d'azote, d'oxygène et de divers ions. L'échauffement des électrodes par les racines de l'arc crée des vapeurs de cuivre, de tungstène, de graphite et/ou d'aluminium qui s'ajoutent à cette atmosphère.

Après extinction de l'arc ou dans les zones qui commencent à refroidir, la recombinaison de ces atomes débute pour reformer principalement du SF<sub>6</sub>. Cependant, des réactions chimiques se produisent avec les impuretés présentes, en particulier la vapeur d'eau et l'oxygène, formant ainsi les produits de décomposition de l'arc, comme indiqué dans l'Annexe C. Les quantités formées dépendent directement de l'énergie électrique dissipée par la décharge.

Les produits de décomposition les plus fréquemment rencontrés sont les suivants: SOF<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HF et également CF<sub>4</sub>, SF<sub>4</sub> et SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> [21]. L'existence de ces produits de décomposition ne revêt d'importance que s'ils s'échappent dans l'atmosphère locale. Leurs concentrations à l'intérieur des appareillages électriques n'ont pas d'importance significative en elles-mêmes, notamment puisque la présence d'adsorbants (par exemple des tamis moléculaires) a tendance à purifier le gaz.

Pendant un certain temps, le produit de décomposition gazeux S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>, très toxique, était considéré comme un facteur important de la toxicité du SF<sub>6</sub> soumis à un arc. Toutefois, les expérimentations effectuées plus tard ont montré que cette idée n'est pas confirmée [22]. En fait, il apparaît maintenant que le S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> est formé en quantité si faible lors de la formation d'un arc, que sa contribution à la toxicité globale du SF<sub>6</sub> est négligeable.

Il est également connu que le S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> se forme lors de décharges à faible énergie dans le SF<sub>6</sub>, et que, dans ces conditions, les taux de formation de S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> sont plus importants [23] qu'au cours d'un arc. La forte toxicité de ce composé, à des concentrations qu'il était, il y a encore peu de temps, difficile de détecter, a conduit à des investissements considérables en recherche, afin d'évaluer les risques potentiels liés à sa présence [20]. Cependant, le S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> décroît en présence de vapeur d'eau [23], à des températures supérieures à 200 °C, et à la température ambiante par une décomposition catalytique avec les parois. Ce dernier mécanisme est tellement efficace que le S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> généré dans l'appareillage électrique est réduit à une quantité négligeable [24].

### D.3.2 Effets sur la santé des produits de décomposition

Si le SF<sub>6</sub>, après avoir été soumis à un arc ou à des décharges de faible énergie, s'échappe dans la salle de travail, le risque potentiel pour la santé dépendra alors de la concentration dans l'air de chaque produit de décomposition, et donc, du volume de la salle de l'appareillage électrique. Il convient que l'évaluation de la toxicité prenne en compte la concentration de chacune des substances présentes, en fonction des concentrations admises pour des temps d'exposition correspondants.

#### D.3.2.1 Effets sur la santé du SF<sub>6</sub> décomposé à la suite d'un arc

Pour des mélanges de plusieurs substances, les toxicologues définissent trois cas généraux:

- chaque composant agit de manière différente, ou sur des organes-cibles différents; de ce fait, les effets ne sont pas cumulatifs et chaque composant est traité séparément;
- les composants agissent de façon similaire sur les mêmes organes-cibles; leurs effets sont alors cumulatifs et les calculs devront en tenir compte;

- les effets d'un composant particulier l'emportent largement sur ceux des autres; la toxicité globale peut alors être estimée, en étudiant la concentration de ce seul élément.

Une étude de la plupart des travaux menés au cours des dernières décennies sur la décomposition du SF<sub>6</sub> soumis à un arc de forte puissance [21] et [25] permet d'établir la conclusion suivante: la toxicité du SF<sub>6</sub> décomposé à la suite d'un arc est dominée dans un premier temps par un composé spécifique, le gaz fluorure de thionyle, SOF<sub>2</sub>.

Cette conclusion justifie l'adoption de ce qui suit: il convient d'évaluer le risque global pour la santé du personnel, dû au SF<sub>6</sub> décomposé à la suite d'un arc, en utilisant les concentrations de SOF<sub>2</sub> générées.

Dans le présent rapport, le produit de décomposition SOF<sub>2</sub> est utilisé comme indicateur de la toxicité globale du SF<sub>6</sub> décomposé à la suite d'un arc. Cela permet d'estimer les risques pour la santé dans différentes situations, et de dégager les implications pour les procédures de sécurité.

L'hydrolyse du SOF<sub>2</sub> peut avoir lieu en présence d'importantes concentrations de vapeur d'eau, avec production de SO<sub>2</sub> et de HF, comme indiqué en C.1.1. Les risques que présente l'exposition à ce mélange, sans tenir compte du fait qu'il est peu probable que le HF reste très longtemps présent dans l'atmosphère en raison de sa forte réactivité, sont légèrement plus élevés que ceux du SOF<sub>2</sub>, comme exposé en D.4.5.1. Cela est pris en compte lors de l'évaluation des risques liés aux échappements, cas dans lesquels il peut s'écouler un temps suffisant pour que se produise une réaction d'hydrolyse, que ce soit à l'intérieur de l'appareillage électrique ou dans l'atmosphère. L'hydrolyse du SOF<sub>2</sub> peut être négligée dans le cas des défauts internes, étant donné qu'il ne s'écoule que peu de temps entre l'apparition du défaut et la ventilation et les travaux de réparation qui s'ensuivent.

#### **D.3.2.2 Effets sur la santé du SF<sub>6</sub> décomposé par les décharges à faible énergie**

Lors de décharges à faible énergie, le produit de décomposition S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> peut se former dans de très faibles quantités. Il s'agit du produit de décomposition du SF<sub>6</sub> le plus toxique que l'on connaisse. C'est pourquoi il est également pris en compte dans l'appréciation des risques dus aux échappements des appareillages électriques à haute tension. La part de toxicité des autres produits de décomposition tels que le SOF<sub>2</sub>, le SO<sub>2</sub> et le HF est négligeable dans le SF<sub>6</sub> décomposé par des décharges à faible énergie. Ces produits ne sont donc pas pris en compte.

#### **D.3.2.3 Durée d'exposition et dilution dans l'air**

Les deux notions clés essentielles à toute évaluation de risque pour la santé dû aux substances toxiques sont:

- La dilution dans le milieu environnant
- Le temps d'exposition.

La première notion est nécessaire pour permettre la conversion de la concentration des produits de décomposition formés à l'intérieur de l'appareillage électrique, en un niveau de concentration dans l'atmosphère des salles de travail.

NOTE Par exemple, une concentration alarmante de produits de décomposition de 1 000 ppmv, générée dans une enveloppe expérimentale de 1 l, atteindra la valeur très faible de 0,04 ppmv une fois échappée dans une pièce de 3 m × 3 m × 2,5 m.

La deuxième notion permettra de déterminer la méthode d'évaluation du risque potentiel pour la santé, applicable soit pour des conditions normales de service (échappement), soit pour des conditions anormales (défaut interne).

Dans des conditions normales, il convient que la concentration TLV (concentration maximale admissible), soit utilisée, comme indiqué en D.8.1. Cela assure la sécurité des personnes travaillant à plein temps à proximité de l'appareillage électrique rempli de SF<sub>6</sub>.

Dans des conditions anormales, par exemple dans le cas d'un défaut lié à un arc interne, le personnel quitte immédiatement la salle de l'appareillage électrique et la période d'exposition est donc momentanée. Pour ce type d'exposition, des concentrations très supérieures à la valeur TLV peuvent être tolérées, comme indiqué en D.4.2.

#### **D.4 Calcul des concentrations des produits de décomposition**

Les méthodes et les résultats des calculs, donnant les concentrations des produits de décomposition gazeux dans l'atmosphère de la salle de l'appareillage électrique, sont présentés ci-après pour différents types d'installation. Les contributions des autres sources de risques qui se présentent lors d'un défaut interne, comme les fumées, les émanations ou les vapeurs, ont également été évaluées.

Dans le cas d'un échappement, les quantités de SOF<sub>2</sub> et de S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> échappées en 24 h sont prises en compte. Il est supposé qu'aucun gaz ne s'échappe de la salle de l'appareillage électrique. Les effets de l'hydrolyse du SOF<sub>2</sub> sont pris en compte.

Dans le cas d'arc interne, tout le SOF<sub>2</sub> formé est considéré comme s'échappant rapidement dans l'atmosphère environnante et est considéré également comme stable pendant la période de temps concernée.

Pour le cas de maintenance de l'appareillage électrique, spécifique aux systèmes à pression entretenue et/ou autonome, des conseils sont fournis dans l'Article 9. Dans de telles situations, les procédures de travail nécessitent de récupérer tout le SF<sub>6</sub> avant l'ouverture de l'appareillage électrique.

##### **D.4.1 Critères de calcul**

Les critères suivants ont été retenus au cours de cette étude, aussi bien pour les cas d'échappement que pour les cas de défaut interne:

- La salle de l'appareillage électrique est supposée être complètement fermée, et la ventilation est supposée être inactive, pendant la période concernée.
- Les adsorbants de produits de décomposition issus de l'arc, installés à l'intérieur de l'appareillage électrique, sont supposés être inactifs, pendant la période concernée.
- Le gaz échappé est supposé se mélanger uniformément avec l'air de la salle de l'appareillage en un temps relativement court par rapport à une journée de travail ou à la durée d'exposition.

##### **D.4.2 Evaluation du risque**

###### **D.4.2.1 Cas d'échappement**

Les résultats des calculs pris en exemple donnent les concentrations C de SOF<sub>2</sub> (voir D.4.5) et de S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> (voir D.4.6) dans l'air de la salle de l'appareillage électrique. Il convient de comparer chaque valeur de C avec la concentration permise pour un travail à plein temps, à savoir le TLV indiquée en D.8.1. Le résultat final de chaque calcul est exprimé sous la forme d'un rapport C/TLV. Il convient que ce rapport soit inférieur à l'unité pour que les risques soient considérés comme négligeables et que le travail à temps plein soit autorisé.

Dans le cas de l'hydrolyse du SOF<sub>2</sub> (voir D.4.5.1), les concentrations de SO<sub>2</sub> et de HF sont calculées. On considère que le HF et le SO<sub>2</sub> ont un effet cumulatif sur l'organisme humain et, pour un mélange multicomposants de cette nature, il convient que la somme R<sub>tot</sub> des rapports individuels de concentration aux TLV ne dépasse pas l'unité.

$$R_{\text{tot}} = \frac{\text{Concentration de SO}_2}{\text{TLV (SO}_2)} + \frac{\text{Concentration de HF}}{\text{TLV (HF)}} \leq 1$$

NOTE Il s'agit là d'une supposition prudente, qui a pour résultat la concentration maximale autorisée de chaque composant inférieure au TLV. Elle est adoptée ici afin de simuler un cas très pessimiste.

Les TLV des quatre composés concernés, à savoir SOF<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HF et S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>, sont données dans le Tableau D.1 [10]:

**Tableau D.1 – Valeurs TLV pour les gaz SOF<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HF et S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>**

	SOF <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	HF	S <sub>2</sub> F <sub>10</sub>
TLV (ppmv)	1,6	2	3	0,01

#### D.4.2.2 Cas d'arcs liés à des défauts internes

Pour ces cas anormaux, les concentrations de SOF<sub>2</sub> sont très supérieures à celles liées aux échappements, puisque tout le SF<sub>6</sub> s'est échappé dans un intervalle de temps court. Les procédures habituelles imposent l'évacuation et la ventilation de la salle de l'appareillage électrique. Il convient que l'exposition au SF<sub>6</sub> décomposé par l'arc soit par conséquent momentanée. Pour cette raison, la comparaison de la concentration de SOF<sub>2</sub> calculée avec le TLV n'est plus appropriée (voir D.8.1).

En général, une valeur IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health /Présentant un danger immédiat pour la vie ou la santé) fournit une indication pour une exposition de courte durée (voir D.8.2). Il n'existe cependant pas de valeur IDLH publiée pour le SOF<sub>2</sub>. Il est donc nécessaire de se tourner vers les résultats de données toxicologiques pour établir une valeur de référence pour une exposition momentanée non répétitive (C<sub>m</sub>).

$$C_m = 500 \text{ ppmv}$$

NOTE Des données toxicologiques existent pour l'exposition d'animaux de laboratoire à des atmosphères contenant du SOF<sub>2</sub> [26] et [27], et couvrent les effets d'une exposition de 1 h pour trois espèces distinctes de mammifères, pour des concentrations allant jusqu'à plusieurs milliers de ppmv de SOF<sub>2</sub>. Les résultats montrent que, pour une exposition à des concentrations jusqu'à 100 ppmv (souris et rats) et 500 ppmv (lapins), tous les animaux présentent un état général apparemment normal, 24 h après la période d'exposition.

Les concentrations de SOF<sub>2</sub> calculées sont comparées à C<sub>m</sub>, pour évaluer les risques pour la santé dus aux produits de décomposition pendant ou après un défaut interne. Il convient de prendre en compte d'autres facteurs, pouvant être plus significatifs, lors de l'évaluation des risques et la définition des procédures de sécurité (voir D.4.7.2 et D.4.7.3).

Pour l'homme, une exposition à des concentrations supérieures à 500 ppmv pendant 1 h pourrait être supportable, les organismes plus gros étant généralement moins sensibles aux agents toxiques. Il peut donc en être déduit que l'utilisation d'une concentration limite d'exposition momentanée C<sub>m</sub> de 500 ppmv comme valeur de référence à comparer aux concentrations calculées est acceptable.

#### D.4.3 Limites de calculs pour les cas d'un arc lié à un défaut interne

##### D.4.3.1 Salles de très faible volume

Dans ce cadre, par exemple, lors d'un arc lié à un défaut interne dans un poste moyenne/basse tension, le risque principal pour la santé ne provient pas des produits de décomposition soumis à un arc. L'arc lui-même, le souffle des gaz chauds, la fumée, les vapeurs de peintures brûlées, les vapeurs plastiques ou métalliques, et finalement l'onde de choc, constituent probablement les risques majeurs, comme indiqué en D.4.7.2 et D.4.7.3.

L'extrapolation des résultats à des salles nettement inférieures à 50 m<sup>3</sup> ne constitue pas, dès lors, un procédé valable pour évaluer les risques pour la santé. Un exemple de calcul pour des salles d'un volume inférieur à 50 m<sup>3</sup> a néanmoins été inclus, afin d'évaluer la contribution du SOF<sub>2</sub> à la toxicité globale.

#### **D.4.3.2 Très longues durées d'arc**

Pour tous les calculs liés à l'arc interne, il est supposé que l'environnement de l'arc reste constant, conduisant à un taux constant de formation de SOF<sub>2</sub> pour un arc d'une durée de 100 ms (voir D.7.3.2). Pour des temps d'arc supérieurs à 100 ms, l'hypothèse d'un taux constant de formation de produits de décomposition ne sera vraisemblablement plus valable, pour les raisons ci-dessous:

#### **Défaut interne dans les disjoncteurs moyenne et haute tension et dans l'appareillage électrique de coupure d'artère (RMU)**

Dans ces cas, le dispositif de décharge de pression libère rapidement le contenu du compartiment dans l'atmosphère. La brusque élévation de pression induite par l'arc tendra à vider la plus grande partie du SF<sub>6</sub> en une fraction de seconde, mais l'arc continuera à brûler principalement dans les vapeurs métalliques formées par l'évaporation des électrodes. Il est clair que seule une fraction de l'énergie totale de l'arc est employée à la formation des produits de décomposition. Des expérimentations plus détaillées sont ainsi nécessaires pour permettre l'extrapolation au-delà de 100 ms environ.

#### **Défaut interne dans les appareillages électriques à isolation gazeuse (GIS haute tension)**

Dans ces situations, une quantité importante de vapeur métallique est produite, et une réaction exothermique a lieu entre le SF<sub>6</sub> et les électrodes en aluminium. L'environnement de l'arc sera profondément modifié, ne justifiant plus l'utilisation d'un taux constant de formation des produits de décomposition.

#### **D.4.4 Cas étudiés**

Dix situations représentatives ont été étudiées comme suit:

- a) Echappement d'un disjoncteur moyenne tension après trois coupures consécutives d'un courant de défaut triphasé de 31,5 kA (voir la CEI 62271-100, séquence d'essai T100).
- b) Echappement d'un disjoncteur haute tension après trois coupures consécutives d'un courant de défaut triphasé de 31,5 kA (voir la CEI 62271-100, séquence d'essai T100).
- c) Echappement d'un compartiment haute tension dans lequel des décharges partielles se sont produites pendant une période de 30 ans.
- d) Echappement d'un compartiment haute tension dans lequel des décharges par effet couronne se sont produites pendant une période de 30 ans.
- e) Echappement d'un sectionneur haute tension dans lequel des étincelles se sont produites 200 fois par an pendant une période de 30 ans.
- f) Défaut interne, entraînant le fonctionnement du dispositif de décharge de pression, ou provoquant un percement du compartiment dans un jeu de barres de GIS de 245 kV à 40 kA (défaut monophasé).
- g) Défaut interne, entraînant le fonctionnement du dispositif de décharge de pression, ou provoquant un percement du compartiment dans un jeu de barres GIS de 145 kV à 31,5 kA (défaut impliquant deux arcs phase-phase).
- h) Défaut interne, entraînant le fonctionnement du dispositif de décharge de pression, ou provoquant un percement du compartiment dans un appareillage électrique GIS moyenne tension à 25 kA (défaut monophasé).
- i) Défaut interne, entraînant le fonctionnement du dispositif de décharge de pression, dans un disjoncteur moyenne tension à 25 kA (défaut monophasé).

- j) Défaut interne, entraînant le fonctionnement du dispositif de décharge de pression, dans une artère RMU moyenne tension à 16 kA (défaut impliquant deux arcs phase-phase).

#### D.4.5 Détermination des concentrations dues aux échappements de SOF<sub>2</sub> des disjoncteurs

Seuls les échappements de disjoncteurs sont pris en compte ici, parce que le degré de décomposition du SF<sub>6</sub> dans les disjoncteurs est plus élevé que dans d'autres types d'appareil.

La concentration, dans la salle de l'appareillage électrique, du produit de décomposition gazeux de référence, à savoir le SOF<sub>2</sub>, est calculée dans le cas d'un disjoncteur qui vient de couper un courant de défaut triphasé trois fois de suite (conformément à la CEI 62271-100, T100), et qui présente donc un échappement de SF<sub>6</sub> contenant des produits de décomposition. La quantité de SOF<sub>2</sub> qui s'est échappée, sous la forme d'un échappement, pendant une durée de 24 h est calculée puis comparée au volume de la salle, afin d'établir la concentration.

La méthode de calcul des concentrations des produits de décomposition est la suivante. Les données et les résultats de calculs intermédiaires sont donnés en D.7, tel qu'indiqué pour chaque étape.

- Calculer l'énergie totale de l'arc en kilojoules (kJ) ( $E = I \times U \times t \times n \times m$ ), où  $n$  étant le nombre de phases et  $m$  est le nombre de coupures (voir D.7.3.1 pour les données).
- Calculer la quantité de SOF<sub>2</sub> formée, en litres (à partir du taux de formation,  $r$ , en l/kJ, voir D.7.4 et D.7.5).

NOTE 1 L'arc se forme entre les contacts cuivre-tungstène.

- Calculer le rapport volumique SOF<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub> à l'intérieur du disjoncteur (en tenant compte de la pression de remplissage, voir D.7.7).
- Déterminer le débit  $L$  de l'échappement en litres par jour (d'après les données du constructeur, voir D.7.6).
- Calculer la quantité de SOF<sub>2</sub> s'écoulant dans la salle de l'appareillage électrique (voir D.7.7).
- Calculer la quantité de SOF<sub>2</sub> accumulée sur une période de 24 h (en litres, voir D.7.7).
- Calculer le taux de SOF<sub>2</sub> accumulé dans le volume de la salle de l'appareillage électrique (en ppmv, voir D.7.1 pour les données).
- Comparer cette concentration avec le TLV (voir D.8.1) et exprimer le résultat sous forme de rapport  $R = C/TLV$ . Si cette valeur  $R < 1$ , alors aucun risque pour la santé n'est à craindre.

L'équation, pour le calcul en ppmv, de la concentration  $C$  de SOF<sub>2</sub> dans la salle de l'appareillage électrique, sur une période de 24 h est donc la suivante:

$$C = \frac{r \times E \times L \times 10^6}{V \times v \times p_f}$$

où

$r$  est le taux de formation en l/kJ;

$E$  est l'énergie de l'arc, en kJ;

$L$  est le débit de l'échappement, en l/jour;

$V$  est le volume de la salle, en l;

$v$  est le volume du compartiment des appareillages électriques, en l;

$p_f$  est le rapport entre la pression de remplissage SF<sub>6</sub> (MPa absolu) et la pression atmosphérique.

Les résultats des calculs donnés à titre d'exemple pour des cas d'échappement (voir D.7 pour les données) sont indiqués dans le Tableau D.2.

**Tableau D.2 – Résultats des calculs donnés à titre d'exemple dans les cas d'échappement**

Disjoncteur	$V_1$ Echappement de SOF <sub>2</sub> 	$V$ Volume de la salle 	$C$ SOF <sub>2</sub> concentration ppmv	TLV (NOTE) du SOF <sub>2</sub> ppmv	$R$
MT	$1,3 \times 10^{-6}$	$120 \times 10^3$	$11 \times 10^{-6}$	1,6	$6,8 \times 10^{-6}$
HT	$108 \times 10^{-6}$	$700 \times 10^3$	$154 \times 10^{-6}$	1,6	$96 \times 10^{-6}$

NOTE TLV: Concentration maximale admissible (TLV): niveaux d'exposition basés sur des expositions répétées sur une période de 8 h [28] (voir D.8.1).

$V_1$  est la quantité échappée dans l'atmosphère en 24 h (voir D.7.5, D.7.6 et D.7.7). Les concentrations  $C$  sont beaucoup plus petites que le TLV, comme indiqué par les valeurs du rapport  $R$ .

NOTE L'extrapolation à des temps supérieurs d'accumulation requiert des données détaillées concernant le taux de renouvellement d'air apporté par ventilation.

**D.4.5.1 Calcul complémentaire destiné à prendre en compte les effets de l'hydrolyse du SOF<sub>2</sub>**

En C.1.1, l'équation (9) décrit l'hydrolyse du SOF<sub>2</sub>, au cours de laquelle se forment du SO<sub>2</sub> et du HF. Cela peut se produire lorsque le SOF<sub>2</sub> reste en présence de vapeur d'eau pendant de longues périodes, que ce soit à l'intérieur du compartiment à remplissage de gaz de l'appareillage électrique ou dans l'atmosphère de la salle de l'appareillage électrique. Les adsorbants maintiennent l'humidité présente dans le compartiment à un niveau faible, ce qui limite le niveau d'hydrolyse avant l'échappement. Une ventilation normale prévient l'accumulation de SOF<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

En supposant cependant une mauvaise ventilation qui permettrait une accumulation de SOF<sub>2</sub>, il est nécessaire de considérer des produits finaux pour évaluer les risques pour la santé.

Chaque molécule de SOF<sub>2</sub> participant à la réaction d'hydrolyse produit une molécule de SO<sub>2</sub> et deux molécules de HF. Ainsi, chaque mole de SOF<sub>2</sub> donne une mole de SO<sub>2</sub> et deux moles de HF, chaque mole occupant le volume molaire. Par conséquent, un volume donné de SOF<sub>2</sub> produit un volume égal de SO<sub>2</sub> et deux fois ce volume de HF, et les concentrations atteintes dans un volume donné ont la même relation. Toutefois, le HF est très réactif, et il ne subsiste généralement pas assez longtemps dans l'atmosphère pour atteindre de fortes concentrations.

On considère que le HF et le SO<sub>2</sub> ont des effets similaires sur l'organisme humain et, pour un mélange multicomposants de cette nature, la somme  $R_{tot}$  ces rapports individuels de concentration aux TLV ne devrait pas dépasser l'unité.

$$R_{tot} = \frac{\text{Concentration de SO}_2}{\text{TLV (SO}_2)} + \frac{\text{Concentration de HF}}{\text{TLV (HF)}} \leq 1$$

NOTE Il s'agit là d'une supposition prudente, qui a pour résultat la concentration maximale autorisée de chaque composant inférieure à son TLV. Elle est adoptée ici afin de simuler un cas très pessimiste.

En supposant que la totalité du SOF<sub>2</sub> subisse une hydrolyse et que la totalité du SO<sub>2</sub> et du HF reste dans l'atmosphère, les résultats de D.4.5 donnent les valeurs suivantes de  $R_{tot}$ . Les très faibles valeurs de  $R_{tot}$  (et des rapports individuels de concentration par rapport aux TLV) indiquent un risque négligeable.

**Tableau D.3 – Résultats pour les cas d'échappement, en tenant compte de l'hydrolyse du SF<sub>2</sub>**

Disjoncteur	SOF <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>		HF		R <sub>tot</sub>
	Concentration ppmv	TLV ppmv (NOTE)	Concentration ppmv	TLV ppmv (NOTE)	Concentration ppmv	
MT	11 × 10 <sup>-6</sup>	2,0	11 × 10 <sup>-6</sup>	3,0	22 × 10 <sup>-6</sup>	12,6 × 10 <sup>-6</sup>
HT	154 × 10 <sup>-6</sup>	2,0	154 × 10 <sup>-6</sup>	3,0	308 × 10 <sup>-6</sup>	180 × 10 <sup>-6</sup>

NOTE Les TLV pour SO<sub>2</sub> et HF sont données dans les références [27] et [28].

#### D.4.6 Détermination des concentrations liées à un échappement de S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>

Les vitesses de décomposition du SF<sub>6</sub> en présence de décharges à faible énergie sont généralement considérées comme extrêmement faibles dans les conditions normales de service, avec, en conséquence, un risque négligeable pour la santé. Dans le cas des décharges partielles (DP) et de l'effet couronne, cela est surtout dû au fait que les énergies en cause sont extrêmement faibles. Une décomposition plus importante ne pourrait se produire que si les décharges se poursuivaient sur une longue période (des semaines ou des mois). De plus:

- Les décharges partielles se produisant à l'intérieur des isolants solides ne peuvent pas affecter le gaz;
- Les appareillages électriques remplis de SF<sub>6</sub> ne sont généralement pas affectés par l'effet couronne, et toutes les décharges par l'effet couronne de quelque importance ont habituellement une source extérieure aux appareillages électriques, par exemple traversées, etc.;
- Des procédures d'essai de DP normalisées vérifient les appareillages électriques contre ce type de décharge, comme d'ailleurs les mesures d'interférences radio.

L'arc des sectionneurs à haute tension a un effet limité, d'abord parce que l'énergie totale dissipée lors de chaque manœuvre est faible, deuxièmement parce que le temps s'écoulant entre deux manœuvres est très long dans les conditions normales de service, et troisièmement parce que la crête d'intensité de l'étincelle est élevée.

Cependant, indépendamment des considérations précédentes, certaines préoccupations ont été exprimées quant à la présence possible de S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> dans les appareillages électriques en raison de sa forte toxicité relative [22], bien que sa quantité décroisse rapidement dans des situations réelles [23].

Afin d'illustrer le très faible risque pour la santé lié au S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> dans les situations pratiques, des estimations sont présentées ci-dessous pour les trois cas mentionnés plus haut. Des scénarios sévères ont été adoptés dans chaque cas.

Les valeurs exactes de l'énergie de décharge employée peuvent être multipliées par de nombreux ordres de grandeur sans modifier les conclusions de façon notable. Cela assure une marge de sécurité considérable, pour les cas de niveaux de décharge anormalement élevés.

L'approche retenue pour les calculs est la même pour chaque cas:

- Il est supposé que le phénomène de décharge produit du S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> stable en toutes conditions, et qui s'accumule pendant 30 ans à l'intérieur de l'appareillage électrique;
- Ce gaz s'échappe (échappement) ensuite dans la salle de l'appareillage électrique (700 m<sup>3</sup>), au rythme régulier de 1 % par an (27 × 10<sup>-6</sup> par jour);

- La quantité accumulée en 24 h est ensuite estimée, la concentration  $C$  trouvée étant ensuite comparée au TLV (0,01 ppmv) [28], afin d'obtenir le rapport  $R$ ;
- Des rapports  $R$  nettement inférieurs à l'unité indiquent clairement que le risque pour la santé est négligeable.

NOTE Les taux de décroissance mentionnés dans les références citées conduisent à des concentrations de  $S_2F_{10}$  environ 100 fois inférieures à celles des présentes estimations.

Dans les trois cas étudiés, les concentrations maximales calculées accumulées se situent dans une plage correspondant à 5 ordres de grandeur en dessous du TLV. Ce résultat signifie qu'en pratique, il n'y a aucun risque pour la santé lié au  $S_2F_{10}$  produit dans les appareillages électriques dans les conditions de décharge à faible énergie de cette nature. Il convient que la décroissance de la quantité de  $S_2F_{10}$  dans les situations réelles réduise fortement la quantité accumulée, ce qui renforce encore de façon considérable cette conclusion. De surcroît, les calculs ne tiennent pas compte des réductions éventuelles des taux de formation du  $S_2F_{10}$  dues à la présence de vapeur d'eau.

#### D.4.6.1 Cas de décharges partielles

Les hypothèses suivantes sont formulées:

- Le niveau de DP dans le gaz est de 5 pC;

NOTE 1 Il s'agit là d'un niveau maximal typique employé au cours des essais de réception du GIS.

- Le nombre de décharges par cycle est élevé;

NOTE 2 Toutes les décharges ont des amplitudes identiques, et elles sont supposées être réparties uniformément sur l'onde de tension.

- La tension assignée est de 245 kV à une fréquence de 50 Hz;
- Le taux de formation de  $S_2F_{10}$  est de  $0,2 \times 10^{-9}$  mol/J;

NOTE 3 Les taux de formation de  $S_2F_{10}$  dans le cas de décharges partielles sous excitation alternative n'existent pas dans la littérature. Le présent calcul repose donc sur une extrapolation des résultats des mesures de décharge par étincelle.

- Les décharges se produisent en continu pendant 30 ans, et le  $S_2F_{10}$  formé ne décroît pas.

Les résultats sont donnés dans le Tableau D.4 suivant. La quantité de  $S_2F_{10}$  échappé pendant la période de 24 h est extrêmement faible ( $88,3 \times 10^{-9}$  l), la concentration accumulée est  $C = 126 \times 10^{-9}$  ppmv, et le rapport  $R = C/TLV$  est de  $12,6 \times 10^{-6}$ .

**Tableau D.4 – Exemple de calcul de concentration de  $S_2F_{10}$  en cas de décharges partielles**

Charge transférée par décharge	$Q$	$5 \text{ à } 10^{-12} \text{ C}$
Nombre de décharges par cycle	$N$	20
Charge transférée par cycle	$Q = q \times n$	$0,1 \times 10^{-9} \text{ C}$
Tension assignée	$U_r$	245 kV
Energie dissipée par cycle	$E = Q \times U_r \sqrt{3}$	$14,1 \times 10^{-6} \text{ J}$
Energie dissipée par seconde	$E_s = 50 \times E$	$0,707 \times 10^{-3} \text{ J}$
Energie dissipée par année	$E_y = 31,5 \times 10^6 \times E_s$	$22,3 \times 10^3 \text{ J}$
Taux de formation de $S_2F_{10}$	$R$	$0,2 \times 10^{-9} \text{ mole/J}$
$S_2F_{10}$ formé par an	$P = r \times E_y$	$4,46 \times 10^{-6} \text{ mole}$
Volume de $S_2F_{10}$ en litres (par an)	$V = 24,45 \times P$	$109 \times 10^{-6} \text{ l}$
$S_2F_{10}$ accumulé en 30 ans	$U = 30 \times V$	$3,27 \times 10^{-3} \text{ l}$
$S_2F_{10}$ échappé en 24 h	$v = 27 \times 10^{-6} \times U$	$88,3 \times 10^{-9} \text{ l}$
Concentration (salle de $700 \text{ m}^3$ )	$C = v/(700 \times 10^3)$	$126 \times 10^{-9} \text{ ppmv}$

TLV du S <sub>2</sub> F <sub>10</sub>	TLV	0,01 ppmv
Rapport R	$R = C/TLV$	$12,6 \times 10^{-6}$

#### D.4.6.2 Cas de l'effet couronne

Les hypothèses suivantes sont formulées pour le phénomène de décharges à l'intérieur des appareillages électriques:

- La tension totale de couronne (RIV) est de 3 μV mesurée sur 300 Ω;
- La tension assignée est de 245 kV;
- Le taux de formation de S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> est de  $0,05 \times 10^{-9}$  mole/J. Le S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> ne décroît pas.

Comme l'indique le tableau suivant, le volume de S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> échappé au cours de la période de 24 h est d'environ  $45 \times 10^{-9}$  l, la concentration C est de  $64 \times 10^{-9}$  ppmv, et le rapport  $R = C/TLV$  est de  $6,4 \times 10^{-6}$ .

**Tableau D.5 – Exemple de calcul de concentration de S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> pour les cas de décharges par l'effet couronne**

Tension de couronne	$V_c$	$3 \times 10^{-6}$ V
Impédance de mesure	Z	300 Ω
Courant de couronne	$I = V_c/Z$	$0,1 \times 10^{-9}$ C
Tension assignée de GIS	$U_r$	$245 \times 10^3$ V
Energie dissipée dans une seconde	$E_s = I \times U_r / \sqrt{3}$	$14,1 \times 10^{-3}$ J
Energie dissipée par année	$E_y = 31,5 \times 10^6 E_s$	$44,5 \times 10^3$ J
Taux de formation de S <sub>2</sub> F <sub>10</sub>	R	$0,05 \times 10^{-9}$ mole/J
S <sub>2</sub> F <sub>10</sub> formé par an	$P_v = r \times E_y$	$2,2 \times 10^{-6}$ mole
Volume de S <sub>2</sub> F <sub>10</sub> par an	$V = 24,45 \times P_y$	$54,4 \times 10^{-6}$ l
S <sub>2</sub> F <sub>10</sub> accumulé en 30 ans	$U = 30 V$	$1,63 \times 10^{-3}$ l
S <sub>2</sub> F <sub>10</sub> échappé en 24 h	$v = 27 \times 10^{-6} \times U$	$44,7 \times 10^{-9}$ l
Concentration (salle de 700 m <sup>3</sup> )	$C = v / (700 \times 10^3)$	$63,8 \times 10^{-9}$ ppmv
TLV du S <sub>2</sub> F <sub>10</sub>	TLV	0,01 ppmv
Rapport R	$R = C/TLV$	$6,4 \times 10^{-6}$

#### D.4.6.3 Coupure capacitive de sectionneur

Les hypothèses suivantes sont formulées:

- Le sectionneur manœuvre 200 fois par an. L'énergie requise par manœuvre est de 0,25 kJ;

NOTE 1 Les valeurs moyennes utilisées sont les suivantes: tension d'arc 1 kV et courant capacitif 0,25 A. La durée d'arc utilisée est de 1 s.

- Le taux de formation est de  $0,05 \times 10^{-9}$  mole/J et la quantité de S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> formé ne décroît pas.

NOTE 2 Les arcs individuels peuvent avoir, pendant l'étincelle de coupure, des crêtes de courants allant jusqu'à 3 kA, mais qui ne durent que quelques dizaines de microsecondes. A défaut de données publiées, le taux de formation retenu correspond à la valeur inférieure donnée pour les décharges par étincelles. Il est toutefois plus de 2 000 fois supérieur à celui donné pour les arcs de puissance.

Comme l'indique le tableau suivant, le volume de  $S_2F_{10}$  échappé au cours de la période de 24 h est d'environ  $50 \times 10^{-9}$  l, la concentration résultante est  $C = 72 \times 10^{-9}$  ppmv, et le rapport  $R = C/TLV$  est de  $7,2 \times 10^{-6}$ . Le caractère réaliste de ces estimations théoriques a été confirmé par des mesures sur un sectionneur réel, dans des conditions de fonctionnement très accélérées [23].

**Tableau D.6 – Exemple de calcul de concentration de  $S_2F_{10}$  en cas de coupure capacitive de sectionneur**

Energie par manœuvre	$E_0 = I \times u \times t$	0,25 kJ
Energie dissipée par année	$E_y = 200 E_0$	50 kJ
Taux de formation de $S_2F_{10}$	$R$	$0,05 \times 10^{-9}$ mole/J
$S_2F_{10}$ formé par an	$P_y = r \times E_y$	$2,5 \times 10^{-6}$ mole
Volume de $S_2F_{10}$ par an	$V = 24,45 \times P$	$61 \times 10^{-6}$ l
$S_2F_{10}$ accumulé en 30 ans	$U = 30 \times V$	$1,8 \times 10^{-3}$ l
$S_2F_{10}$ échappé en 24 h (litres)	$V = 27,4 \times 10^{-6} \times U$	$50 \times 10^{-9}$ l
Concentration (salle de 700 m <sup>3</sup> )	$C = V / (700 \times 10^3)$	$72 \times 10^{-9}$ ppmv
TLV du $S_2F_{10}$	TLV	0,01 ppmv
Rapport $R$	$R = C/TLV$	$7,2 \times 10^{-6}$

#### D.4.7 Détermination de la concentration due à un défaut interne

Un défaut interne ne conduit pas nécessairement à un échappement de  $SF_6$ . Les seules situations dans lesquelles un échappement se produit sont les suivantes:

- Les défauts provoquant le fonctionnement du dispositif de décharge de pression ou l'ouverture du compartiment;
- Les cas d'arc interne provoquant le percement du compartiment.

Les hypothèses formulées pour l'étude de ces cas, en plus de celles citées en D.4.1, sont les suivantes:

- La totalité des produits de décomposition gazeux formés s'échappe rapidement dans l'atmosphère environnante;
- Les effets très importants de souffle du gaz, associés à des forces de convection très élevées, entraînent un mélange rapide du gaz échappé avec l'air de la salle de l'appareillage électrique;
- Le  $SOF_2$  généré est considéré comme stable pendant la période de temps considérée.

La concentration de  $SOF_2$  dans l'air de la salle de l'appareillage électrique est calculée pour chaque cas de la façon suivante. Les données et les résultats intermédiaires sont donnés en D.7 comme indiqué à chaque étape:

- Calculer l'énergie de l'arc  $E$ , en kJ (voir D.7.3.2);
- Calculer la quantité  $V_f$  de  $SOF_2$  formée, en l (à partir des taux de formation,  $r$ , en l/kJ, voir D.7.4 et D.7.5);
- Calculer le volume de la salle de l'appareillage électrique  $V$ , en l (voir D.7.1).
- Calculer le rapport  $C$  du volume de  $SOF_2$  /volume de la salle de l'appareillage électrique, en ppmv.
- Comparer cette concentration de  $SOF_2$  à la limite d'exposition momentanée  $C_m$  à ce même gaz. L'équation de base servant au calcul de la concentration  $C$  de  $SOF_2$  en ppm par volume dans la salle est de ce fait la suivante:

$$C = \frac{r \times E \times 10^6}{V}$$

Les résultats des calculs donnés à titre d'exemple pour des cas de défaut interne (voir D.7 pour les données) figurent dans le Tableau D.7.

**Tableau D.7 – Exemple de calcul de concentrations de SOF<sub>2</sub> en cas de défaut interne**

Défaut interne	V <sub>r</sub>	V	C	C <sub>m</sub> (NOTE 1) pour le SOF <sub>2</sub> ppmv
	SOF <sub>2</sub> formé l	Volume de la salle l	Concentration de SOF <sub>2</sub> ppmv	
GIS 245 kV	60	2 000 x 10 <sup>3</sup>	30	500
GIS 145 kV	95	700 x 10 <sup>3</sup>	135	500
GIS MV	11,3	120 x 10 <sup>3</sup>	94	500
Disjoncteur MT	1,9	120 x 10 <sup>3</sup>	15	500
RMU MT (Note 2)	3,0	30 x 10 <sup>3</sup>	100	500
NOTE 1 Pour C <sub>m</sub> , voir D.4.2.2.				
NOTE 2 Dans ce cas, le volume de la salle est petit, voir D.4.3.1.				

#### D.4.7.1 Estimation des contributions relatives des produits de décomposition

Le SF<sub>6</sub> décomposé à la suite d'un arc est un produit multicomposants. Il convient que la contribution relative de chaque composant au risque d'exposition soit évaluée en divisant la concentration *C* de ce composant par le niveau admissible correspondant (TLV, IDLH, etc.). Plus le rapport est petit, plus la contribution du composant à la toxicité globale est faible. La comparaison des rapports obtenus pour les différents composants indique leur importance relative. Ceci est illustré en observant les résultats obtenus pour les produits de décomposition bien connus SOF<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> et S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>, pour lesquels des données fiables sont disponibles [22], [26] et [28].

NOTE 1 Les taux de formation utilisés sont les suivants: 3,7 ml/kJ; SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>: 0,06 ml/kJ; S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>: 2,4 × 10<sup>-6</sup> ml/kJ. Les valeurs TLV sont les suivantes: SOF<sub>2</sub>: 1,6 ppmv; SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>: 5 ppmv et S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>: 0,01 ppmv. Pour une exposition de courte durée, la valeur C<sub>m</sub> pour le SOF<sub>2</sub> est de 500 ppmv; les valeurs IDLH sont SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>: 1 000 ppmv et S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>: 1,0 ppmv [26].

NOTE 2 Les conditions expérimentales utilisées pour l'obtention de données sur les taux de formation diffèrent selon les chercheurs. Néanmoins, les ordres de grandeur sont estimés comparables, pour les besoins de ces calculs.

L'application de la méthode de D.4.7 à l'exemple du disjoncteur moyenne tension permet d'obtenir les rapports *C*/TLV suivants:

$$\text{SOF}_2 = 9,3 \qquad \text{SO}_2\text{F}_2 = 0,05 \qquad \text{S}_2\text{F}_{10} = 0,001$$

Pour des expositions de courte durée, les rapports ci-dessous sont calculés sous la forme du rapport *C*/C<sub>m</sub> pour le SOF<sub>2</sub>, et sous la forme du rapport *C*/IDLH pour les autres produits de décomposition:

$$\text{SOF}_2 = 3,0 \times 10^{-2} \qquad \text{SO}_2\text{F}_2 = 2,5 \times 10^{-4} \qquad \text{S}_2\text{F}_{10} = 4,0 \times 10^{-5}$$

Les deux cas indiquent clairement la contribution négligeable du S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> et surtout la prédominance du SOF<sub>2</sub>.

Même une variation de deux ordres de grandeur dans le taux de formation de  $S_2F_{10}$  n'a aucune influence sur cette conclusion. Bien que du  $S_2F_{10}$  puisse exister dans le  $SF_6$  décomposé à la suite d'un arc, l'impact de sa très forte toxicité est largement atténué par l'extrêmement faible quantité produite. Sa présence peut dès lors être ignorée dans le calcul de la toxicité globale.

#### D.4.7.2 Contribution des vapeurs métalliques

En cas d'arc de défaut de forte puissance, quel que soit le milieu, l'énergie dissipée au niveau des électrodes par les racines de l'arc fait fondre et s'évaporer de grandes quantités de métal. Dans le cas d'un défaut interne menant à la rupture du compartiment, la plupart des vapeurs formées se seront échappées dans la salle de l'appareillage électrique, contribuant ainsi à la toxicité globale.

Comme première approximation, la limite supérieure de cette contribution peut être estimée en supposant que toute l'énergie apportée par les racines de l'arc contribue à faire chauffer, fondre, puis évaporer le métal qui s'échappe alors dans la salle. Les résultats peuvent alors être comparés avec les données expérimentales sur l'érosion par arc, afin de vérifier les ordres de grandeur.

Cependant, cette méthode n'est pas valable dans les cas de percement par fusion des compartiments, en haute tension, à cause des réactions fortement exothermiques se produisant entre les vapeurs d'aluminium et le  $SF_6$ , qui accroissent davantage la formation de vapeur. Oublier ce fait conduirait à une forte sous-estimation de la quantité de vapeur métallique formée pour une énergie d'arc donnée.

Les commentaires ci-dessous s'appliquent aux résultats de ces calculs:

- Pour des défauts internes, il convient de ne pas considérer automatiquement la contribution du  $SF_6$  décomposé par l'arc comme dominante dans la toxicité globale de l'atmosphère. Indépendamment du caractère approximatif de ce calcul, celui-ci montre, dans les deux cas de moyenne tension décrits en D.4.4, que les émanations de cuivre peuvent dominer dans la toxicité globale.
- Cette conclusion reste valable même si seulement 10 % de l'énergie dissipée aux racines de l'arc contribue à la formation de vapeur ou si 90 % de la vapeur formée est condensée ou transformée à l'intérieur des appareillages électriques.
- Par conséquent, il convient de prendre des mesures de sécurité semblables pour tous les types d'appareillage électrique, quel que soit le milieu d'isolement. Il est alors conseillé de définir ces précautions de sécurité en se basant plutôt sur la solide connaissance de la formation de vapeur métallique, plutôt que sur les valeurs de décomposition du  $SF_6$ .

Cette procédure ne tient pas compte de l'existence de réactions chimiques entre les vapeurs métalliques et le gaz d'isolement.

En l'absence de méthodes plus fiables, la méthode d'approximation suivante a le mérite de mettre en évidence le rôle d'un contributeur potentiel majeur à la toxicité globale, dans des situations d'arc interne, pour tous les types d'appareillage électrique.

La procédure utilisée pour l'estimation de la contribution maximale des émanations de cuivre à la toxicité suppose que toute l'énergie dissipée par les racines de l'arc contribue à la formation de vapeur métallique:

- La chute de tension totale de l'ensemble anode plus cathode est estimée à environ 30 V. Cela donne une énergie injectée dans les électrodes de 75 kJ et de 96 kJ respectivement pour le disjoncteur et le RMU moyenne tension de D.4.4, cas i) et j).
- L'énergie requise pour transformer une mole de cuivre, initialement à la température ambiante, en vapeur, a été calculée à 390 kJ.

- La comparaison des valeurs ci-dessus donne les limites supérieures pour les quantités de vapeur formée dans chaque cas, qui sont de 0,19 mole pour le disjoncteur moyenne tension et de 0,25 mole pour le RMU.
- Sur la base d'une masse moléculaire de 64 g/mole pour le cuivre, ces valeurs correspondent respectivement à 12 g et 15,8 g de métal évaporé.
- Cela représente une érosion d'environ 1,4 cm<sup>3</sup> et 1,8 cm<sup>3</sup> de métal, ce qui est raisonnable compte tenu des énergies d'arc impliquées.
- Ces valeurs sont environ 40 % supérieures à celles extrapolées à partir de données expérimentales obtenues lors d'essais répétés à 4 kA, qui donnent des taux d'érosion compris entre 2,5 mg/A/s et 4,5 mg/A/s pour des électrodes en cuivre.
- En utilisant les volumes de salles de l'appareillage électrique donnés en D.7.1 d'une valeur de 120 m<sup>3</sup> et 30 m<sup>3</sup> respectivement, les concentrations finales obtenues sont d'environ 100 mg/m<sup>3</sup> et 520 mg/m<sup>3</sup>.
- Ces valeurs sont à comparer avec le TLV du cuivre de 0,2 mg/m<sup>3</sup> [28].

NOTE Ces résultats ont été obtenus de façon théorique en utilisant des données et des méthodes approximatives, et n'ont pas été confirmés par des essais pratiques.

#### **D.4.7.3 Contribution due à la combustion de matières plastiques**

Ce sujet n'est pas traité en tant que tel, étant extérieur au cadre général du présent rapport. Toutefois, la contribution potentiellement très significative à la toxicité de ces matériaux justifie leur prise en compte. La combustion de matériaux plastiques, comme les isolants de câbles, suite à un défaut interne, produit une variété d'émanations toxiques, indépendamment de la technologie des appareillages électriques.

Le cas du polychlorure de vinyle (PVC) sera examiné à titre d'exemple. Le TLV du chlorure de vinyle est de 1 ppmv = 2,6 mg/m<sup>3</sup> [28]. Cela signifie que la vaporisation complète de seulement 8 g de matériau dans l'atmosphère d'une salle de 30 m<sup>3</sup> donnera une concentration égale à 100 fois le TLV. Pour une salle de 120 m<sup>3</sup>, 32 g de PVC donneront le même résultat. Cela représente la quantité d'isolant de 1,2 m de câble normalisé de 1 mm de diamètre.

Un salle d'appareillage électrique moyenne tension normale peut contenir plusieurs kilomètres de câble de cette dimension, avec environ 7 kg de PVC par kilomètre.

Ces estimations peuvent être faites pour chacun des matériaux plastiques risquant de brûler lors d'un défaut d'arc interne. Les observations précédentes indiquent qu'il convient de ne pas ignorer la contribution à la toxicité des émanations dues à la combustion des plastiques et qu'il est bon que l'exposition à de telles émanations reste aussi limitée qu'il est pratiquement possible.

En conclusion, la présence de SF<sub>6</sub> dans les appareillages électriques apporte peu à la toxicité de l'atmosphère, générée par un défaut d'arc interne. Cela est effectivement la conclusion établie par une étude menée en 1987 [6].

Il n'y a ainsi pas lieu de considérer l'appareillage électrique utilisant le SF<sub>6</sub> dans les procédures et réglementations de façon spéciale, par rapport aux autres appareillages.

NOTE Les vapeurs de PVC réagissent avec d'autres produits dans l'atmosphère pour former des produits de décomposition moins toxiques. Les conditions décrites ci-dessus représentent donc un cas très pessimiste.

## **D.5 Evaluation des résultats**

### **D.5.1 Cas d'échappement**

Les produits de décomposition, résultant d'arcs et de décharges de faible énergie, et s'échappant à la suite de l'échappement d'un appareillage électrique rempli de SF<sub>6</sub>, atteignent des concentrations négligeables dans l'air du lieu de travail. Dans les pires des cas, les

concentrations observées en moyenne et haute tension, sont quatre fois plus faibles que les TLV.

Il n'y a aucune inquiétude à avoir et aucune précaution particulière à prendre, outre une ventilation normale des endroits situés en profondeur. Cette conclusion est renforcée par les hypothèses simplifiées formulées en D.4.1.

Même dans le cas d'un échappement anormal (par exemple, pour un débit d'échappement trois fois supérieur au débit normal), ces conclusions restent inchangées.

### **D.5.2 Défaut interne**

Pour illustrer ces cas, cinq situations rares mais possibles couvrant les applications moyenne et haute tension ont été retenues. Dans la situation la plus sévère, les concentrations de  $\text{SO}_2$  dans la salle de l'appareillage électrique restent en dessous de la limite  $C_m$  d'exposition momentanée (voir D.4.2).

Dans toute situation de ce type, les procédures de sécurité de base comprennent des règles d'évacuation établies pour s'assurer que le personnel n'est pas exposé aux substances éjectées pendant plus de quelques minutes. Par ailleurs, la ventilation forcée et/ou l'aération permettent de réduire les niveaux de concentration de ces substances à des valeurs beaucoup plus faibles en l'espace de quelques minutes. L'application de l'une ou l'autre des situations décrites ci-dessus apporte des marges de sécurité considérables.

Par conséquent, des procédures de sécurité simples permettront de s'assurer que l'exposition effective reste momentanée, et que la santé du personnel ne sera pas mise en danger.

### **D.5.3 Installations à l'extérieur**

Pour les cas d'échappement et de défaut, les calculs sont effectués de la même manière que décrite ci-dessus, toutefois, dans ce cas, le volume d'air, dans lequel le  $\text{SF}_6$  décomposé à la suite d'un arc s'échappe, est grand, sinon infini. Les vents dominants et la grande vitesse d'échappement accélèrent l'effet de dispersion. Il est évident que les concentrations obtenues dans les cas d'échappement sont infimes. Dans les cas de défauts internes, les concentrations vont chuter à une valeur très inférieure aux TLV en quelques secondes.

En conclusion, il n'y a aucun risque à craindre pour la santé, lié à la toxicité des échappements des produits de décomposition d'un appareillage électrique installé à l'extérieur.

## **D.6 Conclusions**

Les résultats des calculs pris en exemple, basés sur l'état de la technique, montrent que, dans les situations d'échappements, il n'y a aucun risque pour la santé lié à l'exposition aux produits de décomposition.

Les résultats montrent aussi que, dans le cas peu probable d'un défaut interne conduisant à un échappement de  $\text{SF}_6$ , des concentrations significatives de produits de décomposition peuvent survenir dans la salle de l'appareillage électrique. Toutefois, les concentrations calculées n'excèdent pas une limite déterminée pour une exposition de courte durée.

On conclut alors que, tant que les procédures normales de sécurité sont respectées, le risque directement lié à l'utilisation du  $\text{SF}_6$  dans les appareillages électriques est minime.

Il a aussi été souligné que dans toute situation de défaut interne, des émanations corrosives et/ou toxiques sont produites, qu'il y ait présence ou non de  $\text{SF}_6$ . Dans les cas où ces émanations se répandent dans l'atmosphère ambiante de la salle de l'appareillage électrique, il a été démontré que les produits soumis à un arc et non liés au  $\text{SF}_6$  sont susceptibles d'être

les principaux agents contribuant à la toxicité globale. Cela conforte l'opinion que le SF<sub>6</sub> utilisé dans les appareillages électriques n'ajoute pas de risque significatif supplémentaire à ceux liés à un défaut interne.

## D.7 Données de calcul

### D.7.1 Volumes types des salles d'appareillage électrique

Salle de GIS 245 kV (7 travées): 25 m × 12 m × 6,5 m = 2 000 m<sup>3</sup>

Salle de GIS 145 kV (7 travées): 12,5 m × 8 m × 7 m = 700 m<sup>3</sup>

Salle de distribution MT (utilisée pour les disjoncteurs et les GIS MT)-(15 cellules à disjoncteurs): 10 m × 4 m × 3 m = 120 m<sup>3</sup>

Salle RMU MT (1 appareillage de coupure d'artère) (voir également D.4.3.1): 4 m × 3 m × 2,5 m = 30 m<sup>3</sup>

### D.7.2 Volume des appareillages et pression de remplissage

Tableau D.8 – Volume des appareillages et pression de remplissage

	Volume l	Pression Mpa absolue
Disjoncteur moyenne tension	45	0,3
RMU moyenne tension	200	0,1
GIS moyenne tension	1 000	0,1
Disjoncteur haute tension	500	0,5
Jeu de barres GIS	2 000	0,3

### D.7.3 Caractéristiques d'arc

#### D.7.3.1 Coupure de courant de défaut/cas d'échappement

L'énergie d'arc indiquée est déterminée pour la somme de trois coupures d'un courant de défaut triphasé, c'est-à-dire neuf fois la valeur d'une coupure de courant monophasé.

Tableau D.9 – Valeurs d'énergie d'arc en cas de coupure de courant

	<i>I</i> kA	<i>U</i> <sub>arc</sub> V	<i>T</i> <sub>arO</sub> ms	9 x <i>E</i> <sub>arc</sub> kJ
Disjoncteur moyenne tension	31,5	200	15	851
Disjoncteur haute tension	31,5	500	15	2 126

#### D.7.3.2 Défaut interne/cas de l'échappement instantané

L'énergie d'arc indiquée est celle de *N* arcs simultanés. Le nombre d'arcs a été choisi pour représenter la situation de défaut interne la plus probable.

**Tableau D.10 – Valeurs d'énergie d'arc en cas de défauts internes**

	$I$ kA	$U_{arc}$ V	$T_{arc}$ ms	$N$	$E_{arc}$ kJ
GIS 245 kV	40	1 000	100	1	4 000
GIS 145 kV	31,5	1 000	100	2	6 300
GIS moyenne tension	25	300	100	1	750
Disjoncteur moyenne tension	25	200	100	1	500
RMU moyenne tension	16	250	100	2	800

Les valeurs de durée d'arc représentent un compromis entre la durée réelle de l'arc, le fonctionnement des dispositifs de décharge de pression, le percement de l'enveloppe, la constance de l'environnement de l'arc et le domaine de validité des données disponibles concernant le taux de formation. Une extrapolation linéaire au-dessus d'environ deux fois ces valeurs va ainsi provoquer une importante surestimation des résultats (voir D.4.3.2).

#### D.7.4 Taux de formation de SOF<sub>2</sub>

La quantité de gaz formé lors d'une décharge électrique est généralement donnée en quantité générée par joule d'énergie dissipée (le taux de formation,  $r$ ).

Les taux de formation de SOF<sub>2</sub> déterminés de manière expérimentale dépendent du matériau utilisé pour les électrodes et du type de décharge pris en compte. Les réactions exothermiques se produisant avec des électrodes en aluminium semblent accroître le taux de formation.

Les résultats expérimentaux sont généralement exprimés en mol/J, mais dans la plupart des cas pratiques, il est plus aisé de les convertir en l/kJ. Cette conversion est réalisée en se basant sur le fait qu'une mole de n'importe quel gaz occupe 24,45 l à une température de 25 °C et à la pression atmosphérique.

Les valeurs utilisées ici sont des moyennes calculées à partir de l'ensemble des valeurs actuellement disponibles dans la littérature existante [21] et [25].

**Tableau D.11 – Taux de formation de SOF<sub>2</sub>**

Matériau des électrodes	Taux de formation de SOF <sub>2</sub> ( $r$ )	
	mol/J	l/KJ
Cu, Fe, WCu	$150 \times 10^{-9}$	$3,7 \times 10^{-3}$
Al	$150 \times 10^{-9}$	$15 \times 10^{-3}$
NOTE Les valeurs figurant pour les électrodes en aluminium sont utilisées uniquement dans les cas de calculs concernant les jeux de barres des GIS.		

#### D.7.5 Quantité de SOF<sub>2</sub> formé

Cette quantité est déterminée à partir de l'énergie d'arc et des taux de formation.

**Tableau D.12 – Quantités de SOF<sub>2</sub> formé**

	Moyenne tension		Haute tension	
	mol	l à 0,1 MPa	mol	l à 0,1 MPa
Echappement	0,13	3,15	0,319	7,87
Défaut interne				
GIS 245 kV			2,4	60
GIS 145 kV			3,8	95
GIS MT	0,45	11,25		
Disjoncteur MT	0,075	1,9		
RMU MT	0,12	3,0		

**D.7.6 Taux d'échappement**

Les taux d'échappement pour les appareillages électriques scellés à vie sont exprimés en volume de SF<sub>6</sub> échappé par seconde et par la pression de remplissage exprimée en bars relatifs.

Pour les appareillages électriques rechargeables en gaz, le taux d'échappement est donné comme le pourcentage d'échappement de gaz total annuel.

Les valeurs typiques pour les disjoncteurs triphasés sont données ci-dessous, avec leur conversion en quantité totale de SF<sub>6</sub> échappé quotidiennement (24 h) et, pour les disjoncteurs moyenne tension, par la pression de remplissage exprimée en bars relatifs.

**Tableau D.13 –Taux d'échappement de SF<sub>6</sub>**

	Disjoncteur MT	Disjoncteur HT
Taux de base	$3 \times 10^{-6}$ cm <sup>3</sup> /s/Mpa relatifs	0,5 % volume total de SF <sub>6</sub> l/an
Taux journalier	$27 \times 10^{-5}$ l/jour/Mpa relatifs	$13,7 \times 10^{-6}$ x (SF <sub>6</sub> vol) l/jour

**D.7.7 Taux d'échappement de SOF<sub>2</sub> (en utilisant les données de D.7.5 et D.7.6)****Tableau D.14 –Taux d'échappement de SOF<sub>2</sub>**

	Disjoncteur MT	Disjoncteur HT
Volume SOF <sub>2</sub> formé (litres à 0,1 MPa absolu)	3,15	7,87
Volume total de SF <sub>6</sub> (litres à 0,1 MPa absolu)	135	2 500
Rapport SOF <sub>2</sub> /SF <sub>6</sub> dans le disjoncteur	2,33 % par vol.	0,31 % par vol.
Pression de remplissage (MPa absolu)	0,3	0,5
Taux d'échappement de SOF <sub>6</sub> (litres par jour) (voir NOTE)	$1,26 \times 10^{-6}$	$107,8 \times 10^{-6}$
NOTE Il s'agit de la quantité de SOF <sub>2</sub> accumulée après 24 h d'échappement dans une salle non ventilée.		

## D.8 Limites d'exposition

Les termes utilisés pour désigner les limites tolérables d'exposition peuvent être classés en deux groupes:

- ceux servant à spécifier les conditions dans lesquelles une personne peut travailler en continu sans équipement de protection, par exemple, le TLV;
- ceux servant à spécifier des situations exceptionnelles ou anormales d'exposition momentanée, dans lesquelles il convient que la personne évacue la salle, par exemple, le IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health).

### D.8.1 TLV – Concentration maximale admissible

La concentration maximale admissible (TLV) est un terme créé à instigation de l'American Conference of Industrial Hygienists (ACGIH). Cette expression se rapporte à la concentration maximale d'un élément ou d'une substance, considérée comme physiologiquement et physiquement acceptable pendant un temps d'exposition déterminé.

La concentration maximale admissible, moyenne pondérée dans le temps (TLV-TWA) est la concentration moyenne pondérée dans le temps en présence de laquelle une personne peut travailler 8 h par jour, 40 h par semaine, sans effet défavorable pour sa santé. La moyenne permet d'obtenir des niveaux de concentration instantanée correspondant à plusieurs fois la valeur TLV-TWA. Tout au long du présent rapport, le TLV-TWA est mentionné seulement sous le vocable TLV, et toute référence au TLV doit être comprise comme signifiant TLV-TWA.

#### D.8.1.1 TLV pour le SOF<sub>2</sub>

La concentration officielle admissible de SOF<sub>2</sub> sur les lieux de travail pour une occupation à plein temps (TLV) est exprimée en fonction de sa contenance en fluorure [27] et [28] avec TLV = 2,5 mg de fluorure F/m<sup>3</sup>, à une température de 25 °C et à la pression atmosphérique.

Ceci correspond à 5,66 mg/m<sup>3</sup> de SOF<sub>2</sub> dans l'air à une température de 25 °C et à la pression atmosphérique.

Exprimé en concentration atmosphérique volume sur volume de SOF<sub>2</sub> avec TLV = 1,6 ppmv.

NOTE 1 La valeur de TLV pour le SOF<sub>2</sub> a été mentionnée comme étant égale à 0,65 ppmv dans certains ouvrages. Il apparaît que cette valeur est obtenue à partir de la masse moléculaire du SOF<sub>2</sub> (86,1) au lieu de sa contenance en fluorure (2 × 19).

NOTE 2 La conversion est obtenue en calculant la masse de SOF<sub>2</sub> (par 1 m<sup>3</sup> d'air) qui correspond au TLV, fixé à 2,5 mg de fluorure F/m<sup>3</sup> d'air. Le rapport de masse moléculaire entre le SOF<sub>2</sub> et sa contenance en fluorure est 86,1 / (2 × 19) = 2,266; la masse de SOF<sub>2</sub> présente par m<sup>3</sup> d'air, au seuil TLV, est donc: 2,5 × 2,266 = 5,66 mg SOF<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.

NOTE 3 La conversion de mg/m<sup>3</sup> en ppm volume est effectuée par la multiplication par le volume molaire (24,45 l à 25 °C), puis par la division par la masse moléculaire (86,1 g/mol) [28].

### D.8.2 IDLH – Présentant un danger immédiat pour la vie ou la santé

Cette valeur de concentration est celle pour laquelle une personne peut être évacuée sans effet défavorable à caractère permanent pour sa santé, tant que la durée d'exposition n'excède pas 30 min. [28].

## Bibliographie

- [1] CIGRE WG B3.02 TF SF<sub>6</sub>, Guide for the preparation of customised “Practical SF<sub>6</sub> handling instructions”, CIGRE brochure N. 276, 2005
- [2] KEMA, SF<sub>6</sub> Safety Regulations, internal document for use in laboratories, 1982
- [3] The Electricity Association, Engineering Recommendation G69, UK, 1988
- [4] Standards Association of Australia, Recommendations for the handling of contaminated SF<sub>6</sub> gas and associated arc by-products in or from electrical equipment, AS-2791, 1989
- [5] G. Mauthe, K. Pettersson, et al., Handling of SF<sub>6</sub> and its by-products in gas insulated switchgear (GIS), *Electra* N°. 136, June 1991, pp 69-89 and No. 137, August 1991, pp 81-108, 1991
- [6] KEMA, Het gebruik van middenspanning installaties met SF<sub>6</sub> als isolatie en/of blusmedium, report No. 00067-DZO 87-1002, 17 February 1987 (in English)
- [7] J.A.J. Pettinga, Gaslekzoekapparatuur toegepast voor het meten van SF<sub>6</sub> concentraties in lucht. *Electrotechniek* 68, 1990
- [8] J.A.J. Pettinga, Studie naar de mogelijkheid van ruimtebewaking in onderstations waarin SF<sub>6</sub> schakel-materiaal is opgesteld, n.v. KEMA report, 1986
- [9] Sulphur Hexafluoride brochure (Solvay Fluor, 2006)
- [10] R. J. Lewis Sr., *Sax's Dangerous Properties of Industrial Materials*, 11<sup>th</sup> edition, John Wiley and Sons Inc., Hoboken NJ, United States, 2004
- [11] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Third Assessment Report: Climate Change 2001, edited by R. T. Watson and the Core Writing Team (Eds.), <http://www.ipcc.ch/pub/reports.htm>, 2001
- [12] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>, 2006
- [13] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, edited by J. T. Houghton et al. (Cambridge University Press, Cambridge, 1996)
- [14] ISO 14040, Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre, 2006
- [15] S. Wartmann and J. Harnisch, Reductions of SF<sub>6</sub> emissions from high and medium voltage electrical equipment in Europe, Ecofys GmbH, Nurnberg, Germany, 2005
- [16] K. Yokotsu, Y. Ichikawa et al., Recent practice for huge reduction of SF<sub>6</sub> gas emission from GIS & GCB in Japan, CIGRE SC A3 & B3 Joint Colloquium and Tutorial in Japan, 26<sup>th</sup> – 28<sup>th</sup> Sep 2005, Tokyo, Japan, 2005
- [17] United States Environmental Protection Agency (EPA), Global Anthropogenic Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020, Washington DC, United States, 2006
- [18] United States Environmental Protection Agency (EPA), Mitigation of Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gases, Washington DC, United States, 2006
- [19] CIGRE WG B3-02, Template for Voluntary agreement on the use of SF<sub>6</sub> and on measures for SF<sub>6</sub> emission reduction in the national, regional electric industry, 2003

- [20] CRADA, Cooperative Research and Development Agreement, Investigation of S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> production and mitigation in compressed SF<sub>6</sub> insulated power system, Technical Note No. 1, 22, December 1992
- [21] F.Y. Chu, SF<sub>6</sub> Decomposition in gas insulated equipment, IEEE Trans, on Elec. Insul., EL-21, No. 5, October 1986
- [22] R.J. Van Brunt, J.K. Olthoff, et al., Production of S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> by electrical discharge in SF<sub>6</sub>. I.H.S. 1992, Swansea, U.K., Vol. 1, p. 418, 1992
- [23] H.D. Morrison, V.P. Cronin, et al. Production and decay of S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> in a disconnect switch, 7<sup>th</sup> Int. Sym. Gaseous Dielectrics, Knoxville, TE, USA, 1994
- [24] L. Niemeyer, S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> in SF<sub>6</sub> insulated equipment, 7th Intern. Sympos. On Gaseous Dielectrics, Knoxville, TE, USA, 1994
- [25] B. Belmadani, et al., SF<sub>6</sub> decomposition under power arcs, physical aspects, IEEE Trans. on Elec. Ins., Vol. 26, No. 6, 1991
- [26] R. Truhault, C. Boudène, et al., Toxicité de quelques dérivés gazeux fluor et oxyfluors du soufre, Archives des maladies professionnelles de Médecine du Tâche et de la Sécurité Sociale (Paris), T34, No. 10-11, October-November (pp 581-591), Translation available, 1973
- [27] Documentation of the threshold limit values and biological exposure indices, 5<sup>th</sup> ed. Cincinnati, OH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Inc., 1986, 5: 272, 1986
- [28] NIOSH pocket guide to chemical hazards, U.S. Department of Health and Human Services Publications Dissemination. DSDTT National Institute for Occupational Safety and Health, 4676 Colombia Parkway, Cincinnati, Ohio 45226, USA
- [29] CEI 60050-601, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Partie 601: Production, transport et distribution de l'énergie électrique – Généralités*
- [30] CEI 60695-7-1, *Essais relatifs aux risques du feu – Partie 7: Guide sur la minimalisation des risques toxiques dus à des feux impliquant des produits électrotechniques – Section 1: Généralités*
- [31] CEI 62271-200, *Appareillage à haute tension – Partie 200: Appareillage sous enveloppe métallique pour courant alternatif de tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures ou égales à 52 kV*
- [32] CEI 62271-201, *Appareillage à haute tension – Partie 201: Appareillage sous enveloppe isolante pour courant alternatif de tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures ou égales à 52 kV*
- [33] CEI 62271-203, *Appareillage à haute tension – Partie 203: Appareillage sous enveloppe métallique à isolation gazeuse de tensions assignées supérieures à 52 kV*
-



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](mailto:info@iec.ch)  
[www.iec.ch](http://www.iec.ch)