

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**High-voltage switchgear and controlgear –
Part 4: Handling procedures for sulphur hexafluoride (SF₆) and its mixtures**

**Appareillage à haute tension –
Partie 4: Utilisation et manipulation de l'hexafluorure de soufre (SF₆) et des
mélanges contenant du SF₆**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2013 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 Varembé
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

Useful links:

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

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

It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

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

A propos de la CEI

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

A propos des publications CEI

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

Liens utiles:

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

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

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

Just Published CEI - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**High-voltage switchgear and controlgear –
Part 4: Handling procedures for sulphur hexafluoride (SF₆) and its mixtures**

**Appareillage à haute tension –
Partie 4: Utilisation et manipulation de l'hexafluorure de soufre (SF₆) et des
mélanges contenant du SF₆**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

XC

ICS 29.130.10; 29.130.99

ISBN 978-2-8322-1042-0

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

CONTENTS

FOREWORD.....	5
INTRODUCTION.....	7
1 General	8
1.1 Scope.....	8
1.2 Normative references	8
2 Terms and definitions	9
3 SF ₆ handling during installation and commissioning	11
3.1 General	11
3.2 Evacuation, filling and checking the SF ₆ quality after filling	11
3.3 Topping-up of SF ₆ pre-filled compartments to the rated filling pressure/density.....	13
3.4 Filling sealed pressure systems.....	15
4 SF ₆ handling during normal service life	15
4.1 Re-filling of SF ₆ to the rated filling pressure/density	15
4.2 Checking the SF ₆ quality.....	16
4.2.1 General	16
4.2.2 Measurement of the SF ₆ quality with portable equipment	16
4.2.3 Sampling and shipment of SF ₆ for off-site analysis.....	17
5 SF ₆ recovery and reclaim during maintenance	18
5.1 General	18
5.2 SF ₆ recovery and reclaim from any compartment of controlled or closed pressure systems containing non-arced or normally arcad SF ₆	18
5.3 Recovery and reclaim from any compartment of controlled or closed pressure systems containing heavily arcad SF ₆	20
6 Dismantling of SF ₆ electric power equipment at the end-of-life	22
6.1 General	22
6.2 End-of-life of controlled or closed pressure systems	23
6.3 End-of-life of sealed pressure systems	23
6.4 SF ₆ recovery and reclaim at the end-of-life of sealed pressure systems	24
6.5 Dismantling of electric power equipment at the end-of-life	26
6.6 By-products at the end-of-life	27
Annex A (informative) Storage and transportation of SF ₆	29
Annex B (informative) Safety and first aid	33
Annex C (informative) Training and certification	39
Annex D (informative) Description of SF ₆ Handling Equipment	43
Annex E (informative) Sulphur hexafluoride	51
Annex F (informative) Environmental effects of SF ₆	55
Annex G (informative) SF ₆ by-products.....	58
Annex H (informative) Procedure for evaluating the potential effects on health of SF ₆ by-products.....	61
Annex I (informative) Cryogenic reclaim of SF ₆	67
Annex J (normative) Handling of SF ₆ mixtures.....	71
Bibliography.....	76
Figure 1 – Evacuation, filling and checking the SF ₆ quality after filling.....	12

Figure 2 – Topping-up of SF ₆ pre-filled compartments to the rated filling pressure/density	14
Figure 3 – SF ₆ re-filling to the rated filling pressure/density.....	15
Figure 4 – Checking the SF ₆ quality on-site.....	17
Figure 5 – SF ₆ sampling and shipment	18
Figure 6 – Example of recovery and reclaim from any compartment of controlled or closed pressure systems containing non-arced or normally arced SF ₆	19
Figure 7 – Example of recovery and reclaim from any compartment of controlled or closed pressure systems containing heavily arced SF ₆	21
Figure 8 – End-of-life of controlled or closed pressure systems.....	23
Figure 9 – End-of-life of sealed pressure systems.....	24
Figure 10 – SF ₆ recovery and reclaim at the end-of-life of sealed pressure systems.....	25
Figure 11 – Dismantling of electric power equipment	27
Figure D.1 – General purpose reclaimer	43
Figure D.2 – Gas mixing device	49
Figure E.1 – Pressure/temperature/density characteristics for SF ₆ [16]	52
Figure H.1 – Procedure for the evaluation of the potential effects on health due to arcing	65
Figure H.2 – Procedure for the evaluation of the potential effects on health due to low energy discharges	66
Figure I.1 – Saturated vapour pressure of various gases as a function of temperature	68
Figure I.2 – Typical cryogenic reclaimer for SF ₆ recovery on site.....	69
Figure I.3 – Typical cryogenic reclaimer for removing contaminants.....	70
Figure J.1 – Vapour pressure of SF ₆	74
Figure J.2 – Maximum SF ₆ storage density to avoid SF ₆ liquefaction	75
Table 1 – Evacuation, filling and checking the SF ₆ quality after filling.....	13
Table 2 – Topping-up of SF ₆ pre-filled compartments to the rated filling pressure/density.	14
Table 3 – SF ₆ re-filling to the rated filling pressure/density.....	16
Table 4 – Checking the SF ₆ quality on-site	17
Table 5 – SF ₆ sampling and shipment	18
Table 6 – Example of recovery and reclaim from any compartment of controlled or closed pressure systems containing non-arced or normally arced SF ₆	20
Table 7 – Example of recovery and reclaim from any compartment of controlled or closed pressure systems containing heavily arced SF ₆	22
Table 8 – SF ₆ recovery at the end-of-life of sealed pressure systems.....	26
Table 9 – Expected SF ₆ characteristics and quantity of by-products	28
Table A.1 – Methods for storage of SF ₆	29
Table A.2 – Container types and labelling required for storage and transportation of SF ₆	30
Table A.3 – International regulations for shipment of SF ₆	31
Table B.1 – Measures when working with SF ₆ electric power equipment.....	33
Table B.2 – Safety measures when opening or accessing gas compartments.....	34
Table B.3 – Neutralising solutions.....	35
Table B.4 – Additional safety measures	37

Table D.1 – Typical filter types used during SF ₆ reclaim	44
Table D.2 – Gas measuring devices	47
Table E.1 – Main chemical characteristics of SF ₆ [16]	51
Table E.2 – Main physical characteristics of SF ₆ [16]	53
Table E.3 – Main electrical characteristics of SF ₆ [16]	53
Table H.1 – OELs for SO ₂ , HF, and S ₂ F ₁₀	63
Table H.2 – SOF ₂ production rate	63

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

HIGH-VOLTAGE SWITCHGEAR AND CONTROLGEAR –

**Part 4: Handling procedures for sulphur hexafluoride (SF₆)
and its mixtures**

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 62271-4 has been prepared by subcommittee 17A: High-voltage switchgear and controlgear, of IEC technical committee 17: Switchgear and controlgear.

This first edition cancels and replaces the first edition of IEC/TR 62271-303 published in 2008.

This first edition constitutes a technical revision. This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

- a) the description of the potential effects on health of SF₆ by-products (former Annex D of IEC/TR 62271-303:2008) has been replaced by the calculation methods for evaluating of the potential effects on health of SF₆ by-products (see Annex H);
- b) information about cryogenic reclaim of SF₆ have been added (see Annex I);
- c) handling procedures for the most popular SF₆ mixtures have been added (see Annex J).

The text of this standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
17A/1044/FDIS	17A/1051/RVD

Full information on the voting for the approval of this standard 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 in the IEC 62271, published 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 stability date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

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

IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

INTRODUCTION

As agreed with TC 10, annexes A, E, F, G, H and I will be removed from this document as soon as the revised editions of IEC 60376 and IEC 60480 have been published.

HIGH-VOLTAGE SWITCHGEAR AND CONTROLGEAR –

Part 4: Handling procedures for sulphur hexafluoride (SF₆) and its mixtures

1 General

1.1 Scope

This part of IEC 62271 applies to the procedures for handling of SF₆ during installation, commissioning, normal and abnormal operations, disposal at the end-of-life of high-voltage switchgear and controlgear.

These procedures are regarded as minimum requirements to ensure the safety of personnel working with SF₆ (see Annex B) and to minimize the SF₆ emission to the environment.

This standard generally applies also to gas mixtures containing SF₆. The particularities for their handling are covered in Annex J.

NOTE 1 Throughout this standard, use of the term High-Voltage (refer to IEC 60050-601:1985, 601-01-27) means a rated voltage above 1 000 V. However the term Medium Voltage (refer to IEC 60050-601: 1985, 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 standard, the term “electric power equipment” stands for “high-voltage and medium-voltage switchgear and controlgear”.

NOTE 3 Throughout this standard, the term “pressure” stands for “absolute pressure”.

1.2 Normative references

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

IEC 60050-441, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 441: Switchgear, controlgear and fuses*

IEC 60050-601, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 601: Generation, transmission and distribution of electricity – General*

IEC 60376, *Specification of technical grade sulphur hexafluoride (SF₆) for use in electrical equipment*

IEC 60480, *Guidelines for the checking and treatment of sulphur hexafluoride (SF₆) taken from electrical equipment and specifications for its re-use*

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

EN 1089-3, *Transportable gas cylinders. Gas cylinder identification (excluding LPG). Colour coding*

2 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60050-441 and IEC 60050-601, as well as the following apply.

2.1

abnormal release of SF₆

release from equipment in service due to a failure in the pressure system or mistake in the handling process

Note 1 to entry: An abnormal SF₆ leak is usually an unwanted and continuous emission of gas at a higher rate than the equipment designed leak rate. As soon as an abnormal SF₆ leak is detected, appropriate measures to locate and eliminate it should be arranged.

2.2

handling of SF₆

any process which might involve transfer of SF₆

2.3

evacuation

transfer of a gas different from SF₆ (e.g. air or N₂) which can be released into the atmosphere. The operation is performed utilising a vacuum pump

2.4

recovery of SF₆

transfer of SF₆ from the gas compartment into a reclaimer or storage container

Note 1 to entry: The operation is normally performed utilising a recovery compressor.

2.5

topping-up with SF₆

filling a pre-filled compartment with SF₆ to the rated filling pressure

Note 1 to entry: Pre-filled compartments are closed pressure systems filled in the factory prior to shipment. They contain SF₆ at a typical pressure between 0,12 MPa to 0,15 MPa allowing for a faster and easier commissioning on-site.

2.6

re-filling with SF₆

filling a compartment with SF₆ to the rated filling pressure to assure continuity of service

2.7

reclaim of SF₆

a series of SF₆ handling procedures including recovery and minimum SF₆ refining process such as filtering dust, by-products, moisture, oil, etc.

Note 1 to entry: A standard reclaimer is described in Annex D; while a cryogenic reclaimer is described in Annex I.

Note 2 to entry: Sometimes the words "reclaiming" or "reclamation" may be used with the same meaning as "reclaim".

2.8

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 1 to entry: This term generally applies to high-voltage switchgear and controlgear.

[SOURCE: IEC 60050-441: 1984, 441-12-05]

2.9**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 to entry: Several gas-filled compartments may be permanently interconnected to form a common gas-system (gas-tight assembly).

Note 2 to entry: The definition is the same as in IEC 62271-1.

2.10**controlled pressure system for gas**

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

Note 1 to entry: Examples of controlled pressure systems are air-blast circuit-breakers or pneumatic operating mechanisms.

Note 2 to entry: A volume may consist of several permanently connected gas-filled compartments.

Note 3 to entry: The definition is the same as in IEC 62271-1.

2.11**closed pressure system for gas**

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

Note 1 to entry: Example of closed pressure systems are SF₆ single pressure circuit-breakers.

Note 2 to entry: The definition is the same as in IEC 62271-1.

2.12**sealed pressure system**

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

Note 1 to entry: Examples of sealed pressure systems are tubes of vacuum circuit-breakers or some SF₆ circuit-breakers.

Note 2 to entry: Sealed pressure systems are completely assembled and tested in the factory.

Note 3 to entry: The definition is the same as in IEC 62271-1.

2.13**technical grade SF₆**

SF₆ gas having a very low level of impurities in accordance with IEC 60376

2.14**used SF₆**

gas removed from an item of electrical equipment, initially filled with SF₆ according to IEC 60376 or IEC 60480

Note 1 to entry: If after filling, the gas is removed for any purpose during the life of the equipment, e.g. repair, service, maintenance, the gas will be transferred and is considered as used gas.

Note 2 to entry: Annex G provides information regarding the by-products of used SF₆, which occur in both gaseous and solid form.

2.15**used SF₆ suitable for reuse on site**

used SF₆ having a maximum impurity level in accordance with IEC 60480

Note 1 to entry: If necessary, service units with appropriate filters and adsorber materials should be used.

2.16

used SF₆ suitable for reuse at the gas manufacturer

used SF₆ exceeding the maximum acceptable impurity level stated in IEC 60480, suitable for reuse by the gas manufacturer

Note 1 to entry: If necessary to meet the specification, service units with appropriate filters and adsorber materials should be used.

2.17

used SF₆ not suitable for reuse

used SF₆ not falling under the category defined under 2.15 or 2.16

Note 1 to entry: Used SF₆ not suitable for reuse is disposed according to local or international regulations on waste management.

2.18

non-arced SF₆

used SF₆ having less than approximately 1 ml/l (0,1 % by volume) of gaseous by-products

Note 1 to entry: Non-arced SF₆ is typically expected to be in any compartment after filling and prior to energising or after insulation testing or in insulation compartments which never experienced arcing.

2.19

normally arc'd SF₆

used SF₆ having between approximately 1 ml/l (0,1 % by volume) and approximately 10 ml/l (1 % by volume) of gaseous by-products.

Note 1 to entry: Normally arc'd SF₆ is typically expected to be in circuit breakers or switches after normal (load or fault) operations.

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

2.20

heavily arc'd SF₆

used SF₆ having more than approximately 10 ml/l (1 % by volume.) of gaseous by-products

Note 1 to entry: Heavily arc'd SF₆ is typically expected to be in any gas compartments after internal arc fault or circuit breakers or switches after interruption failure or circuit breakers after successful interruptions of several short circuits at high amplitude in relation with its ratings.

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

2.21

SF₆ mixture

gas mixture formed by SF₆ and a complementary gas, typically N₂ or CF₄

3 SF₆ handling during installation and commissioning

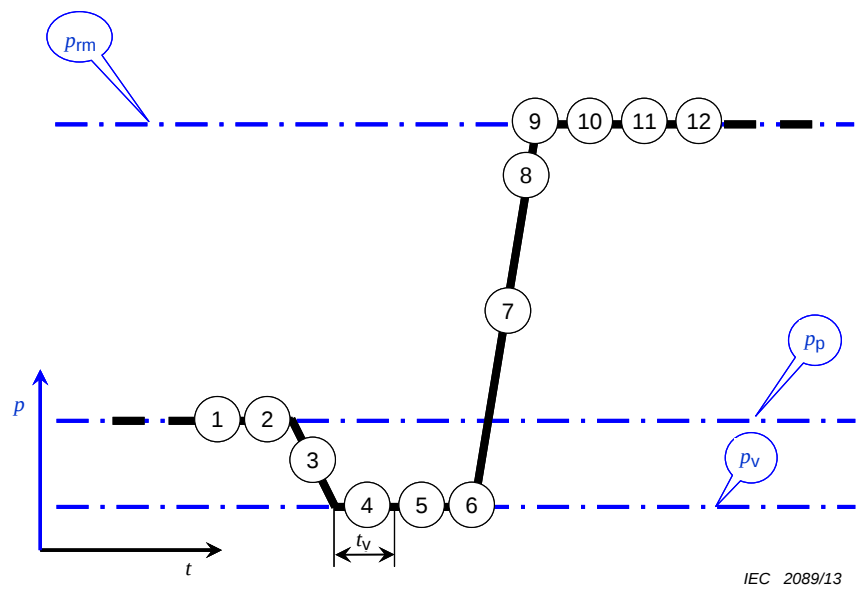
3.1 General

This clause provides guidance for working with technical grade SF₆, according to IEC 60376 or used SF₆ suitable for reuse on site, according to IEC 60480 i.e. when a gas compartment is filled, after the switchgear and controlgear has been installed on site.

3.2 Evacuation, filling and checking the SF₆ quality after filling

This subclause applies to switchgear compartments of pressure systems that currently contain a gas different from SF₆ (typically air or N₂) at ambient pressure or slight overpressure (typically 0,1 MPa to 0,15 MPa).

The following detailed sequence of operations for air/N₂ evacuation and SF₆ filling in each compartment shall be performed according to Figure 1 and Table 1, except as otherwise specified in the handling procedure detailed by the Original Equipment Manufacturer in the Operating Instruction Manual.



1	Prepare SF ₆ handling equipment	9	Pressure/density sensor inspection
2	Adsorber installation	10	Tightness inspection
3	Evacuation	11	SF ₆ quality checking
4	Vacuum stabilisation phase	12	Documentation
5	Vacuum holding phase (optional step)	p_{rm}	SF ₆ rated filling pressure
6	Documentation	p_p	Initial pressure in the gas compartment
7	Filling with SF ₆	p_v	Evacuation pressure < 2 kPa
8	Documentation	t_v	Vacuum stabilisation time ≥ 30 min

Figure 1 – Evacuation, filling and checking the SF₆ quality after filling

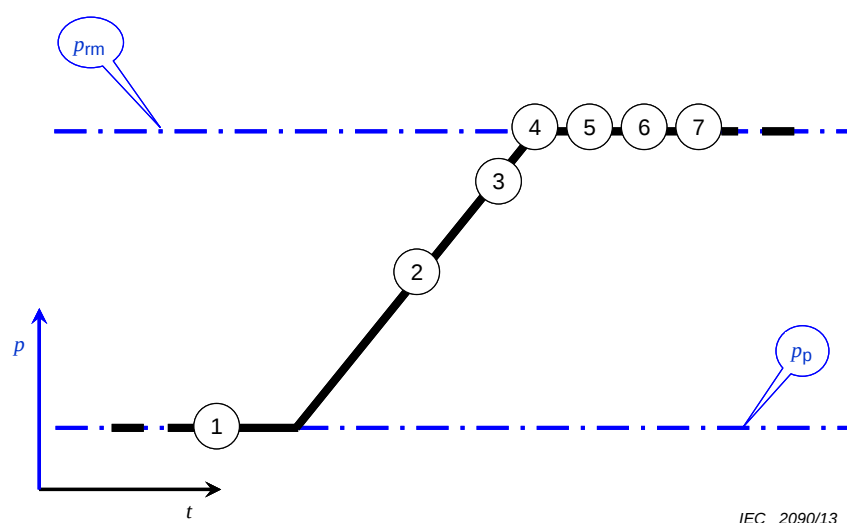
Table 1 – Evacuation, filling and checking the SF₆ quality after filling

Step		Procedure
1	Prepare SF ₆ handling equipment	Check that the SF ₆ handling equipment 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 to reach 2 kPa.
4	Vacuum stabilisation phase	Leave the vacuum pump running for at least 30 min and then disconnect the vacuum pump by closing the valve. Read the pressure gauge. ^a
5	Vacuum holding phase (optional step)	The pressure in the compartment should remain lower than 2 kPa for the time which may be required by the Original Equipment Manufacturer in the Operating Instruction Manual].
6	Documentation	Record at least the manufacturer, equipment type reference, serial number and compartment reference to identify the gas compartment, the evacuation pressure (i.e. the residual air content), ambient temperature and date for further reference.
7	Filling with SF ₆	Connect the SF ₆ container and fill the compartment until the SF ₆ rated filling pressure is reached. Use a safety valve, a regulator to allow a good control of the filling process and a calibrated gauge to avoid overfilling. ^{b c}
8	Documentation	Record at least the manufacturer and serial number to identify the gas compartment, the final filling pressure, ambient temperature and date for further reference.
9	Pressure/density sensor inspection	Check the functionality of the pressure/density sensor. The operation can be performed during the filling operation and shall not be considered as a calibration.
10	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.
11	SF ₆ 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 ₆ percentage. ^d
12	Documentation	Record at least the manufacturer and serial number to identify the gas compartment, the functionality of the pressure/density sensor, the moisture content, the SF ₆ content, ambient temperature and date for further reference.
^a The vacuum duration can be prolonged in order to better remove moisture when for example the ambient temperature is freezing, except as otherwise specified by the Original Equipment Manufacturer in the Operating Instruction Manual. ^b SF₆ to be introduced into the gas compartment may be either technical grade SF₆ or used SF₆ suitable for reuse on site. ^c No SF₆ 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 SF₆ quality may be checked prior to the filling operation (see 4.2). ^d If the gas compartment has a small volume, re-filling after SF₆ quality checking may be required.		

3.3 Topping-up of SF₆ pre-filled compartments to the rated filling pressure/density

This subclause applies to compartments of pressure systems pre-filled in the factory prior to shipment. They contain SF₆ at above atmospheric pressure (typically 0,12 MPa to 0,15 MPa), allowing for a faster and easier commissioning on-site.

The following detailed sequence of operations for SF₆ topping-up in each pre-filled compartment shall be performed according to Figure 2 and Table 2, except as otherwise specified in the handling procedure detailed by the Original Equipment Manufacturer in the Operating Instruction Manual.



IEC 2090/13

- | | | | |
|---|--|----------|--|
| 1 | Prepare SF ₆ handling equipment | 6 | SF ₆ quality checking |
| 2 | Topping-up with SF ₆ | 7 | Documentation |
| 3 | Documentation | p_{rm} | SF ₆ rated filling pressure |
| 4 | Pressure/density sensor inspection | p_p | Initial SF ₆ pressure in the gas-filled compartment |
| 5 | Tightness inspection | | |

Figure 2 – Topping-up of SF₆ pre-filled compartments to the rated filling pressure/density

Table 2 – Topping-up of SF₆ pre-filled compartments to the rated filling pressure/density.

Step		Procedure
1	Prepare SF ₆ 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 ₆	Connect the SF ₆ container and fill the compartment until the SF ₆ rated filling pressure is reached. Use a safety valve, a regulator to allow a good control of the filling process and a calibrated gauge to avoid overfilling. ^{a b}
3	Documentation	Record at least the manufacturer, equipment reference, serial number and compartment reference to identify 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 and shall not be considered as a calibration.
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 ₆ 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 ₆ percentage. ^c
7	Documentation	Record at least the manufacturer and serial number to identify the gas compartment, the functionality of the pressure/density sensor, the moisture content, the SF ₆ content, ambient temperature and date for further reference.
^a SF ₆ to be introduced into the gas compartment may be either technical grade SF ₆ or used SF ₆ suitable for reuse on site.		
^b No SF ₆ 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 ₆ quality may be checked prior to the filling operation (see 4.2).		
^c If the gas compartment has a small volume, re-filling after SF ₆ quality checking may be required.		

3.4 Filling sealed pressure systems

The large majority of medium-voltage switchgear and controlgear uses sealed pressure systems, as defined in 2.12. Typically this type of equipment is filled with SF₆ in the factory and no further SF₆ handling is required during its expected operating life.

Under some abnormal circumstances (e.g. in case of damage) it may be required to re-fill or re-commission the equipment on-site. The Original Equipment Manufacturer should be contacted for this purpose.

4 SF₆ handling during normal service life

4.1 Re-filling of SF₆ to the rated filling 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 shall be immediately arranged.

The following detailed sequence of operations for SF₆ re-filling in each compartment shall be performed according to Figure 3 and Table 3 except as otherwise specified in the handling procedure detailed by the Original Equipment Manufacturer in the Operating Instruction Manual.

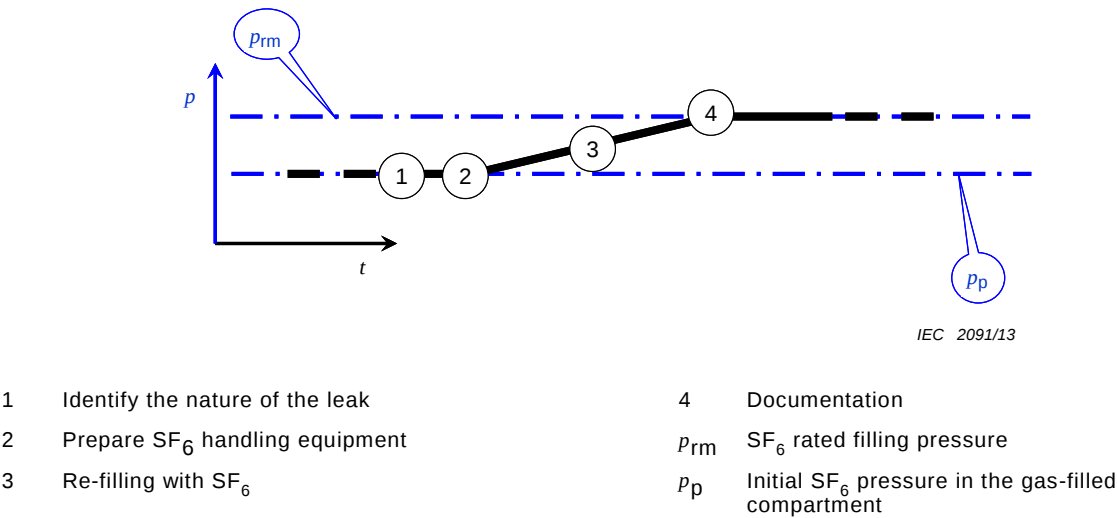


Figure 3 – SF₆ re-filling to the rated filling pressure/density

Table 3 – SF₆ re-filling to the rated filling 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 ₆ 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 ₆	Connect the SF ₆ container and fill the compartment until the SF ₆ rated filling pressure is reached. Use a safety valve, a regulator to allow a good control of the filling process and a calibrated gauge to avoid overfilling. ^{a b}
4	Documentation	Record at least the manufacturer, equipment type reference, serial number and compartment reference to identify the gas compartment, the final filling pressure, ambient temperature and date for further reference.
^a SF ₆ to be introduced into the gas compartment may be either technical grade SF ₆ or used SF ₆ suitable for reuse on site. ^b As the amount of SF ₆ used for re-filling is very small in comparison to the amount of SF ₆ in the related compartment, it is not necessary to perform a SF ₆ quality check after the re-filling operation.		

4.2 Checking the SF₆ quality

4.2.1 General

The measurement of the SF₆ 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 SF₆ quality checks according to IEC 60480 are moisture content (e.g. water content in mg/kg), SF₆ percentage, and total reactive gaseous by-products giving rise to residual acidity content (e.g. total amount of reactive gasses in µl/l).

NOTE Adequate corrections for measurements made at other temperatures than 20 °C are specified by the Original Equipment Manufacturer in the Operating Instruction Manual.

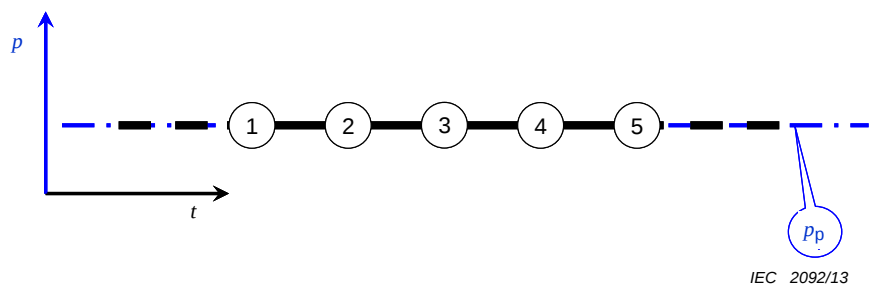
The total reactive gaseous by-products shall be checked first to prevent damage of other portable equipment, if the history of the gas-filled compartment is unknown.

4.2.2 Measurement of the SF₆ quality with portable equipment

This subclause applies to SF₆ filled compartments of controlled and closed pressure systems or SF₆ filled containers to check the quality of the gas with portable equipment.

The following detailed sequence of operations for an on-site SF₆ quality check shall be performed according to Figure 4 and Table 4, except as otherwise specified in the handling procedure detailed by the Original Equipment Manufacturer in the Operating Instruction Manual.

Characteristics of portable equipment are described in Annex D.



- 1

Prepare portable equipment
- 2

Connect the portable equipment
- 3

Read the portable equipment
- 4

Disconnect the portable equipment
- 5

Documentation
- p_p

SF₆ pressure in the gas-filled compartment

Figure 4 – Checking the SF₆ quality on-site

Table 4 – Checking the SF₆ quality on-site

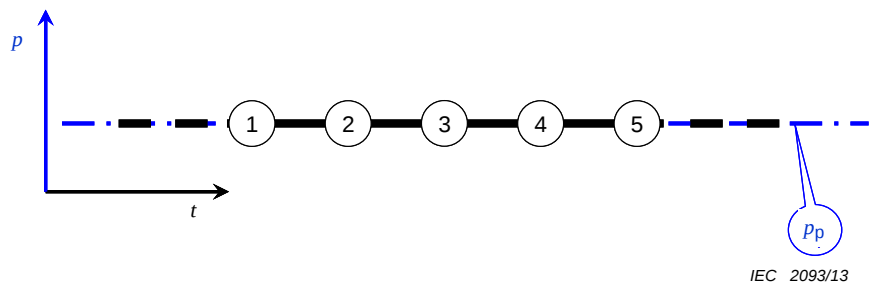
Step		Procedure
1	Prepare portable equipment	Check that the portable equipment is working properly, the ambient conditions are within the working range, e.g. temperature, ^a the gas connections are clean and dry, hoses are evacuated and no leaks on connection fittings exist to avoid any false measurements. Check the validity of the calibration of instruments subject to calibration. Use short connections to minimise SF ₆ release.
2	Connect the portable equipment	Connect the portable equipment. Make tight connections and establish gas flow. ^b
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. ^c
5	Documentation	Record at least the manufacturer, equipment type reference, serial number and compartment reference to identify the gas compartment, the reading and the date for further reference.
^a Typical temperature ranges for portable equipment are given in Table D.2. ^b Sampled SF₆ should be recovered or pumped back into the gas filled compartment. ^c If the gas compartment has a small volume, re-filling after SF₆ quality checking may be required.		

4.2.3 Sampling and shipment of SF₆ for off-site analysis

This subclause applies to SF₆ filled compartments of controlled or closed pressure systems or SF₆ filled containers to cross-check unsatisfactory SF₆ quality measurements obtained on-site.

The following detailed sequence of operations for SF₆ sampling and shipment shall be performed according to Figure 5 and Table 5 except as otherwise specified in the handling procedure detailed by the Original Equipment Manufacturer in the Operating Instruction Manual.

Characteristics of cylinders for SF₆ samples are described in Annex D.



- 1

Prepare SF₆ sampling equipment
- 2

Documentation
- 3

Connect the sampling cylinder
- 4

Disconnect the sampling cylinder
- 5

Shipment
- p_p

SF₆ pressure in the gas-filled compartment

Figure 5 – SF₆ sampling and shipment

Table 5 – SF₆ sampling and shipment

Step		Procedure
1	Prepare SF ₆ sampling equipment	Evacuate the sampling cylinder. ^a 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 ₆ release.
2	Documentation	Tag the sampling cylinder with at least the following information and keep a record: the manufacturer, equipment type reference, serial number and compartment reference to identify the gas compartment, The SF ₆ pressure, ambient temperature and date for further reference.
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. ^b
5	Shipment	Transportation to the laboratory is done in accordance to local and international regulations, as described in Annex A.
^a Clause D.7 describes cylinders suitable for gas sampling.		
^b If the gas compartment has a small volume, re-filling after SF ₆ quality checking may be required.		

5 SF₆ recovery and reclaim during maintenance

5.1 General

This clause contains the procedures for SF₆ recovery and reclaim from any gas-filled compartment during maintenance.

Once SF₆ has been recovered and reclaimed, it can be either reused on site, stored or transported off site for further reuse or disposal, according to IEC 60480.

5.2 SF₆ recovery and reclaim from any compartment of controlled or closed pressure systems containing non-arced or normally arced SF₆

This subclause applies to any compartment of controlled or closed pressure systems containing non-arced or normally arced SF₆, when it is recovered for maintenance.

The partial SF₆ pressure in the gas compartment prior to flooding with (dry) air and opening shall be lower than 2 kPa.

Figure 6 and Table 6 can be adopted as an example of the detailed sequence of operations for SF₆ recovery and reclaim from any compartment of controlled or closed pressure systems containing non-arced or normally arced SF₆, except as otherwise specified in the handling

procedure detailed by the Original Equipment Manufacturer in the Operating Instruction Manual.

There are cases where the SF₆ residual pressure of 2 kPa cannot be reached using the procedure given in Figure 6 and Table 6, despite the use of adequate recovery facilities (e.g. due to leakage of the switchgear, small pumping apertures in the switchgear). In such cases other methods may be applied to reach the partial SF₆ pressure of 2 kPa (e.g. dilution method) in the gas compartment prior to opening.

NOTE The partial SF₆ pressure is the pressure of SF₆ occupying alone the whole volume of the gas compartment. For pure SF₆ if the procedure detailed in Figure 6 and Table 6 is followed, SF₆ is the only gas in the gas compartment and therefore the partial SF₆ pressure is practically equal to the SF₆ residual pressure.

The safety rules given in Annex B should be followed.

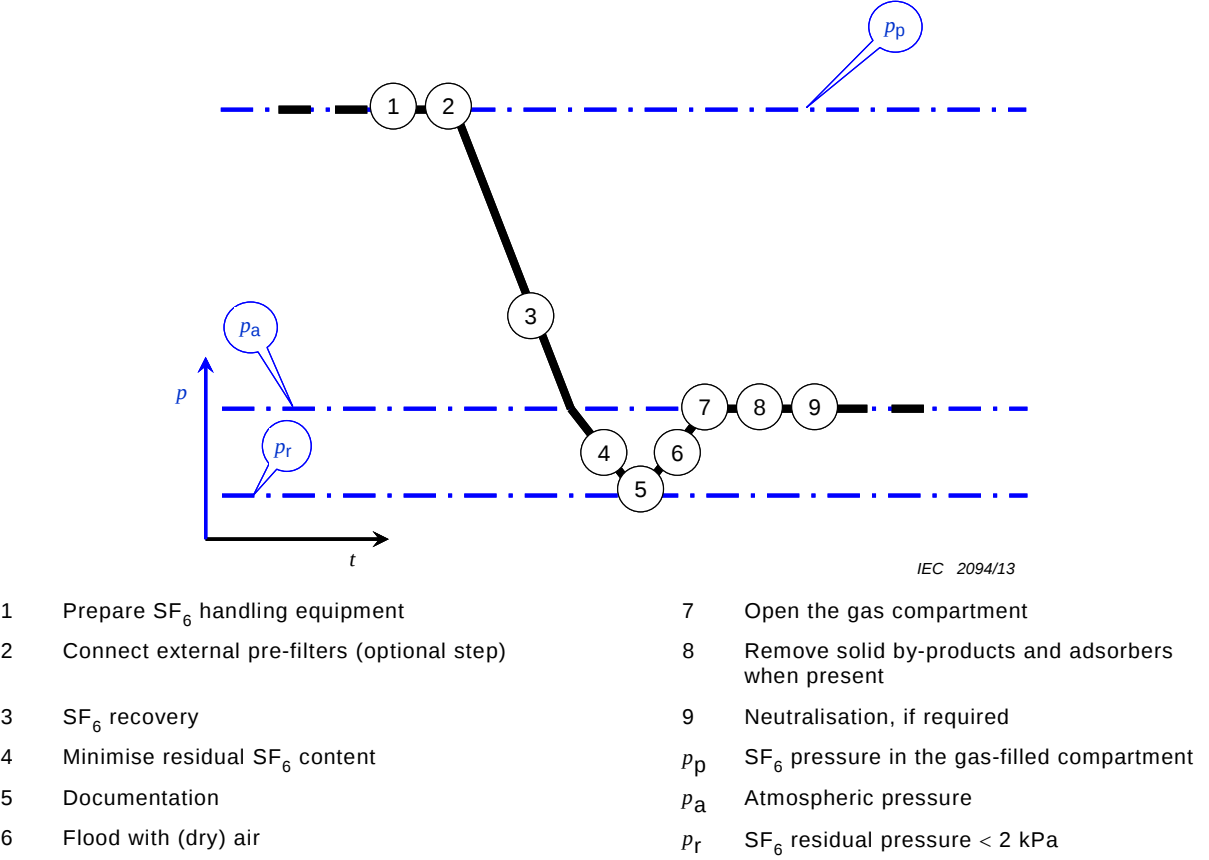


Figure 6 – Example of recovery and reclaim from any compartment of controlled or closed pressure systems containing non-arced or normally arcad SF₆

Table 6 – Example of recovery and reclaim from any compartment of controlled or closed pressure systems containing non-arced or normally arced SF₆

Step		Procedure
1	Prepare SF ₆ handling equipment	Check that the SF ₆ handling equipment is properly working, the filters and pre-filters are still active and connected, and the gas connections are clean and dry, hoses are evacuated and no leaks on connection fittings exist to avoid contamination. Check the capacity and the condition of the storage containers are compatible with the gas compartments to be reclaimed. Check the validity of the calibration of instruments subject to calibration.
2	Connect external pre-filters (optional step)	Connect one or multiple external pre-filters between the gas-filled compartment and the inlet of the SF ₆ handling equipment.
3	SF ₆ recovery	Connect the gas-filled compartment. Use the main compressor stage as soon as the SF ₆ 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. ^a
4	Minimise residual SF ₆ content	Connect the auxiliary compressor stage when the SF ₆ 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, equipment type reference, serial number and compartment reference to identify the gas compartment, the SF ₆ residual pressure p_r , the SF ₆ residual quantity, ambient temperature and the date for further reference.
6	Flood with (dry) air	Disconnect the compressor and let the air enter slowly into the gas compartment. ^b
7	Open the gas compartment	Apply safety rules according to Annex B. Carefully open the gas compartment.
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 Annex B.
^a In 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. ^b Dry air or N ₂ from the bottle may be introduced in the compartment to reduce moisture contamination.		

5.3 Recovery and reclaim from any compartment of controlled or closed pressure systems containing heavily arced SF₆

This subclause applies to any compartment of controlled or closed pressure systems containing heavily arced SF₆, when it is recovered for maintenance.

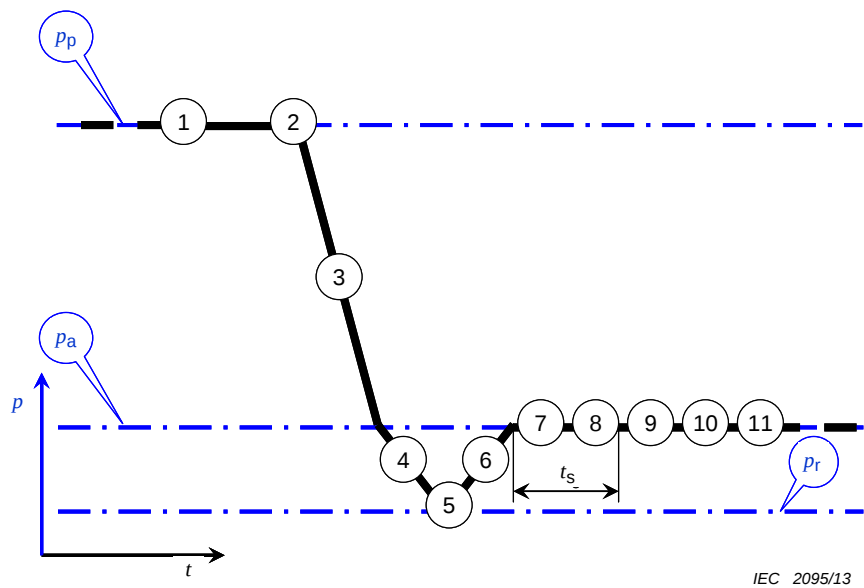
The partial SF₆ pressure in the gas compartment prior to flooding with (dry) air and opening shall be lower than 2 kPa.

Figure 7 and Table 7 can be adopted as an example of the detailed sequence of operations for SF₆ recovery and reclaim from any compartment of controlled or closed pressure systems containing heavily arced SF₆ except as otherwise specified in the handling procedure detailed by the Original Equipment Manufacturer in the Operating Instruction Manual.

There are cases where the SF₆ residual pressure of 2 kPa cannot be reached using the procedure given in Figure 7 and Table 7, despite the use of adequate recovery facilities (e.g. due to leakage of the switchgear, small pumping apertures in the switchgear). In such cases other methods may be applied to reach the partial SF₆ pressure of 2 kPa (e.g. dilution method) in the gas compartment prior to opening.

NOTE The partial SF₆ pressure is the pressure of SF₆ occupying alone the whole volume of the gas compartment. For pure SF₆ if the procedure detailed in Figure 7 and Table 7 is followed, SF₆ is the only gas in the gas compartment and therefore the partial SF₆ pressure is practically equal to the SF₆ residual pressure.

The safety rules given in Annex B should be followed.



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

Figure 7 – Example of recovery and reclaim from any compartment of controlled or closed pressure systems containing heavily arced SF₆

Table 7 – Example of recovery and reclaim from any compartment of controlled or closed pressure systems containing heavily arced SF₆

Step		Procedure
1	Prepare SF ₆ handling equipment	Check that the SF ₆ handling equipment is properly working, the filters and pre-filters are still active and connected, and the gas connections are clean and dry, hoses are evacuated and no leaks on connection fittings exist to avoid contamination. Check the capacity and the condition of the storage containers are compatible with the gas compartments to be reclaimed. Check the validity of the calibration of instruments subject to calibration.
2	Connect external pre-filters	Connect one or multiple external pre-filters in series between the gas-filled compartment and the inlet of the SF ₆ handling equipment.
3	SF ₆ recovery	Connect the gas-filled compartment. Use the main compressor stage as soon as the SF ₆ 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. ^a
4	Minimise residual SF ₆ content	Connect the auxiliary compressor stage when the SF ₆ 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, equipment type reference, serial number and compartment reference to identify the gas compartment, the SF ₆ residual pressure p_r , the SF ₆ residual quantity, ambient temperature and the date for further reference.
6	Flood with (dry) air	Disconnect the compressor and let the air enter slowly into the gas compartment. ^b
7	Settling down of solid by-products	Wait at least 1 h to give enough time for the remaining solid by-products to settle down in the gas compartment.
8	Open the gas compartment	Apply safety rules according to Annex B. Carefully open the gas compartment. ^c
9	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.
10	Neutralisation	Use 10 % by weight soda solution or equivalent to wash and neutralise all parts and then wash with clean water, according to Annex B.
11	Documentation	Record all relevant information concerning service behaviour. Include some pictures.
^a In 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. ^b Dry air or N₂ from the bottle may be introduced in the compartment to reduce moisture contamination. ^c If the gas compartment is already open to the atmosphere (e.g. due to operation of a rupture disc or enclosure burn-through), the procedure may be followed starting from step 8.		

6 Dismantling of SF₆ electric power equipment at the end-of-life

6.1 General

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.

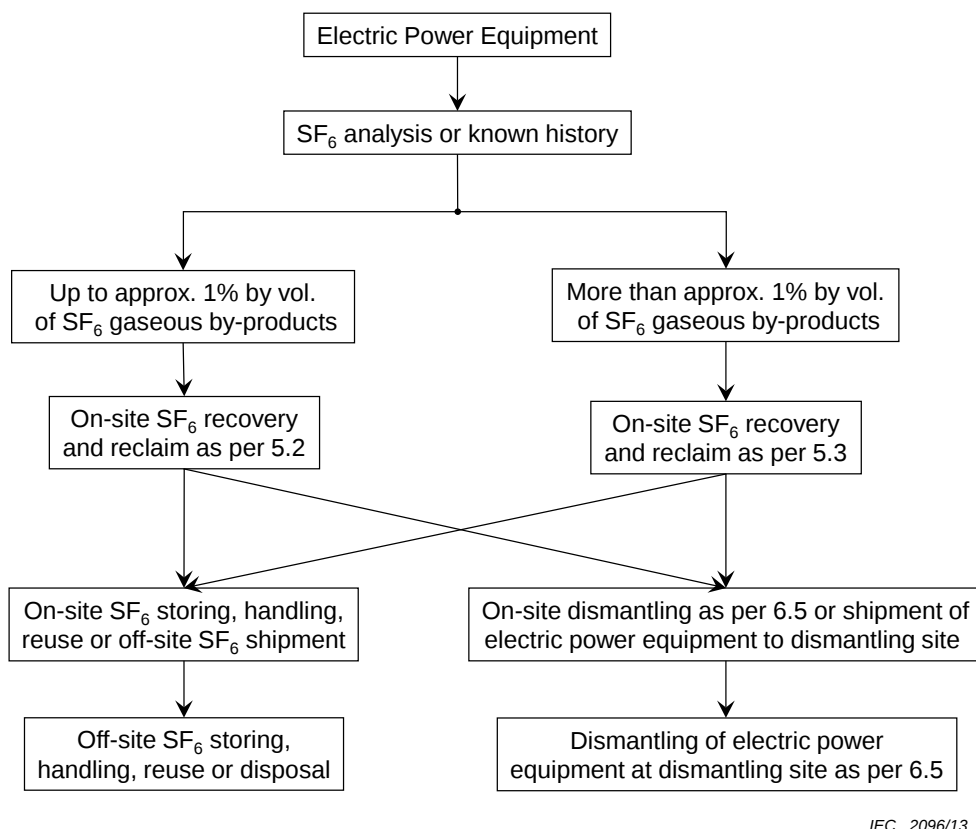
End-of-life dismantling is performed according to local regulations under the Owner / User's responsibility and supported by the Original Equipment Manufacturer as his knowledge and experience are essential. Third parties, such as qualified service companies, may also carry out end-of-life dismantling. 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 can also be applicable at maintenance and overhaul.

Dismantling of electric power equipment and related treatment of used SF₆, gas compartments, powders, adsorber materials and effluents shall be conducted with due regard to personnel and environmental safety, as described in Annex B.

6.2 End-of-life of controlled or closed pressure systems

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



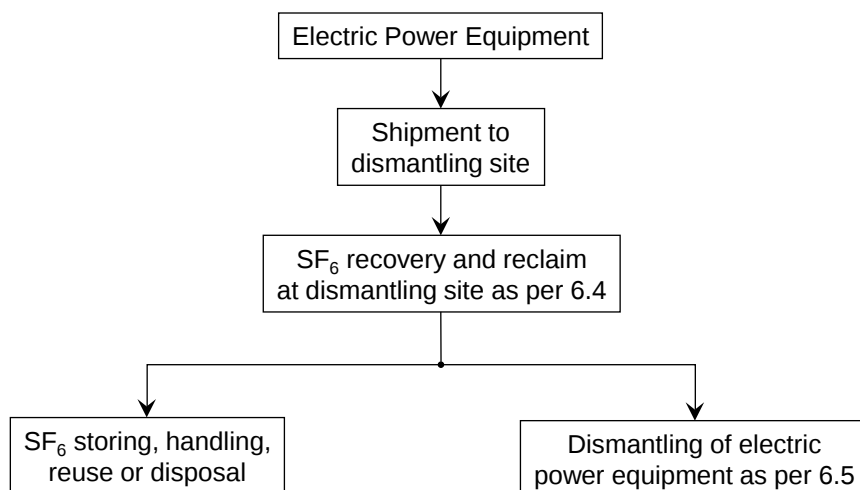
IEC 2096/13

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

If the past history of a gas-filled compartment is unknown, the gas shall be analysed and handled in safe conditions according to Clause 5. Once SF₆ has been recovered and reclaimed, it can be either reused on-site, or stored or transported off-site for further reuse or disposal, according to Annex A. The electric power equipment can be either dismantled on-site or shipped to a dismantling site.

6.3 End-of-life of sealed pressure systems

Sealed pressure systems are typically shipped to the dismantling site as shown in Figure 9. If requested, SF₆ recovery and dismantling could be performed on-site. The procedure for SF₆ recovery remains the same and is reported in 6.4.



IEC 2097/13

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

Sealed pressure systems may be shipped to the dismantling site before removal of SF₆, this operation being typically conducted by service companies. These companies shall 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 SF₆ being dispersed in the environment during handling and transportation is extremely low, if the transportation instructions issued by the Original Equipment Manufacturer are followed.

6.4 SF₆ recovery and reclaim at the end-of-life of sealed pressure systems

SF₆ recovery and reclaim at the end-of-life of any sealed pressure systems may be performed at the dismantling site. When sealed pressure systems are fitted with connecting facilities, dedicated tools according to specifications given by the Original Equipment Manufacturer in the Operating Instruction Manual should be used for the SF₆ recovery. If not, then tight drilling systems shall be used.

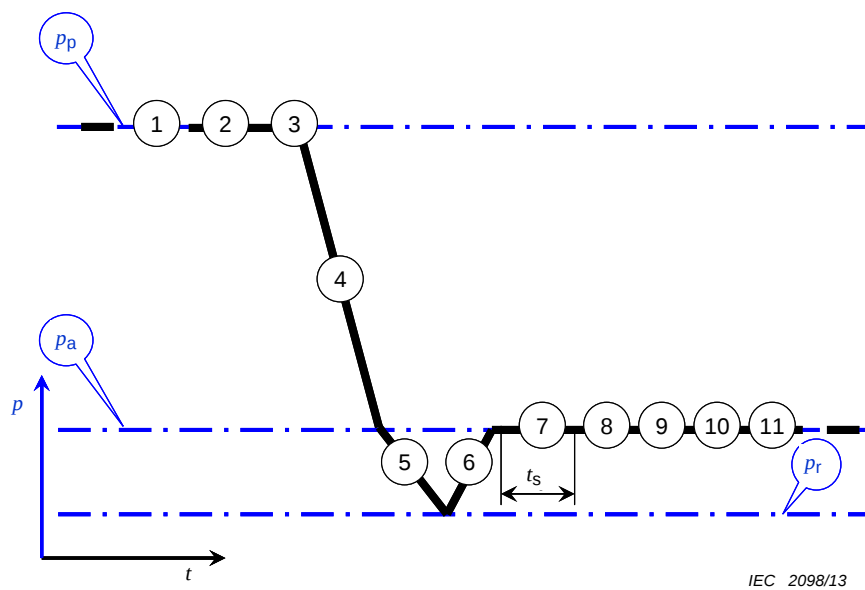
The partial SF₆ pressure in the gas compartment prior to opening shall be lower than 2 kPa.

Figure 10 and Table 8 can be adopted as an example of the detailed sequence of operations for SF₆ recovery and reclaim at the end-of-life of sealed pressure systems, except as otherwise specified in the handling procedure detailed by the Original Equipment Manufacturer in the Operating Instruction Manual.

There are cases where the SF₆ residual pressure of 2 kPa cannot be reached using the procedure given in Figure 10 and Table 8, despite the use of adequate recovery facilities (e.g. due to leakage of the switchgear, small pumping apertures in the switchgear). In such cases other methods may be applied to reach the partial SF₆ pressure of 2 kPa (e.g. dilution method) in the gas compartment prior to opening.

NOTE The partial SF₆ pressure is the pressure of SF₆ occupying alone the whole volume of the gas compartment. For pure SF₆ if the procedure detailed in Figure 10 and Table 8 is followed, SF₆ is the only gas in the gas compartment and therefore the partial SF₆ pressure is practically equal to the SF₆ residual pressure.

The safety rules given in Annex B should be followed.



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

Figure 10 – SF₆ recovery and reclaim at the end-of-life of sealed pressure systems

Table 8 – SF₆ recovery at the end-of-life of sealed pressure systems

Step		Procedure
1	Prepare SF ₆ handling equipment	Check that the SF ₆ handling equipment is working properly, the filters and pre-filters are still active and connected, and the gas connections are clean and dry, hoses are evacuated and no leaks on connection fittings exist to avoid contamination. Check the capacity and the condition of the storage containers are compatible with the gas compartments to be reclaimed. Check the validity of the calibration of instruments subject to calibration.
2	Connect external pre-filters, if required	Connect one or multiple external pre-filters between the gas-filled compartment and the inlet of the SF ₆ handling equipment.
3	Connect SF ₆ compartment	Use dedicated tools and follow the instructions of the Original Equipment Manufacturer to connect the SF ₆ compartment. In other cases, tight drilling systems shall be used.
4	SF ₆ 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 [NOTE].
5	Minimise residual SF ₆ content	Connect the auxiliary compressor stage and leave it running until a pressure lower than 2 kPa is reached.
6	Flood with air	Disconnect the compressor and let the air enter slowly into the gas compartment.
7	Settling down of solid by-products, if required.	Wait at least 1 h to give enough time for the remaining solid by-products to settle down in the gas compartment.
8	Open the gas compartment	Apply safety rules according to Annex B. Carefully open the gas compartment.
9	Remove solid by-products, removable parts, 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 adsorbers and removable parts in a plastic bag. Seal the plastic bags with tape and tag them.
10	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 Annex B.
11	Documentation	Record at least the manufacturer, equipment type reference, serial number and compartment reference to identify the gas compartment, the SF ₆ residual quantity, ambient temperature and date for further reference.
NOTE In 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.		

6.5 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.

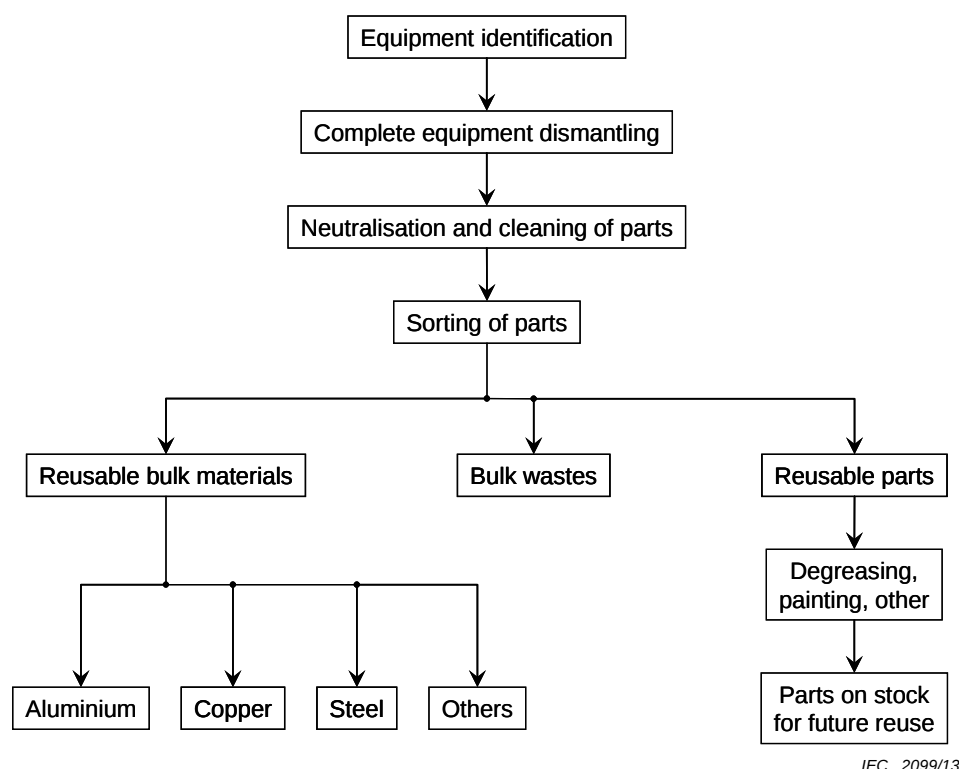


Figure 11 – Dismantling of electric power equipment

The first operation consists of 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 Annex B.

For the dismantling phase, operators should know the products. Tools and drawings should be available. The safety rules given in Annex B should be followed.

NOTE A typical item of electric power equipment is made up of approx. 75 % to 90 % by weight of metals (both ferrous and non-ferrous metals), the rest being dielectric material.

Where SF₆ 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 (e.g. cast resin, plastics, ceramics). The major part of the reclaimable value is in the metals.

6.6 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, which has been applied during its life, in relation to the amount of SF₆ and the quantity and type of adsorbers. The cumulative arc energy depends on the function and service history of the equipment in question. A load-break switch will 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 G. 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 SF₆ characteristics and quantity of by-products for various types of electric power equipment are given in Table 9.

Table 9 – Expected SF₆ characteristics and quantity of by-products

Design	SF ₆ characteristics	Expected quantity of by-products
GIS busbars, cable box, vacuum breaker compartment (SF ₆ as insulation medium)	Non arced SF ₆	From zero to a few ml/l (few tenths of a percent by volume)
GIS earthing switch and disconnecter	Normally arced SF ₆	Light powder deposit
Medium-voltage load-break switch and ring main unit		Light powder deposit
Medium-voltage and high-voltage circuit-breaker		Up to some 10 ml/l (a few percent by volume), light powder deposits
Circuit-breakers after successful interruption of several short-circuits at high amplitude or any gas-filled compartment after an internal arcing fault	Heavily arced SF ₆	Could exceed 150 ml/l (1 % by volume), medium to heavy powder deposits

Annex A (informative)

Storage and transportation of SF₆

A.1 General

Storage and transportation of SF₆, either in containers or in electric power equipment shall always be carried out in accordance with local and international regulations.

An empty SF₆ container can still contain a residual amount of SF₆. It shall be stored and transported in the same way as for a filled container.

A.2 Storage of containers filled with SF₆

In general SF₆ 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 SF₆.

Containers should be 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 should be refillable (non-refillable containers should be banned) and clearly labelled to identify their contents; containers containing technical grade SF₆ and used SF₆ suitable for reuse on site should be physically separated from those containing used SF₆ suitable for reuse at the gas manufacturer or used SF₆ not suitable for reuse.

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

Table A.1 – Methods for storage of SF₆

Method	Requirements	Features
Gaseous	Typical pressure lower than 2 MPa. SF ₆ 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 ₆ after compression, which allows SF ₆ 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 ₆ compressed to 5 MPa liquefies by pressure only	Requires recovery differential of typically 1 000:1 but eliminates the need of additional aggregates. Can be used with any storage vessel rated 5 MPa or higher

When used SF₆ is stored on-site, the storage containers shall comply with local and international regulations on pressurised vessels. Container labelling shall also comply with local and international regulations.

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

Table A.2 – Container types and labelling required for storage and transportation of SF₆

Gas	Characteristic	Container type	Container labelling ^a
Technical grade SF ₆	Liquefied inert gas	Suitable for liquefied gas up to a pressure of 7 MPa. NOTE The filling factor for technical grade SF ₆ is up to 1,04 kg/l. Recommendation: Containers should be marked with a green label or the container should be painted green according to EN 1089-3.	Stencilled on container: UN 1080, sulphur hexafluoride Danger label 2.2
Used SF ₆ suitable for reuse on site	Liquefied inert gas	Suitable for liquefied gas up to a pressure of 7 MPa. NOTE: Due to the inert gas content (e.g. N ₂ , O ₂), the filling factor is smaller than 0,8 kg/l. ^b Recommendation: Containers should be specially coloured to avoid confusion between used and technical grade SF ₆ (an orange band on the upper third of the container is suggested)	Stencilled on container: UN 3163, sulphur hexafluoride, carbon tetrafluoride or air or nitrogen ^c Danger label 2.2
Used SF ₆ suitable for reuse at gas manufacturer or used SF ₆ not suitable for reuse	Liquefied inert gas	Container type and labelling are the same as for used SF ₆ suitable for reuse on-site ^{f g}	
	Liquefied gas containing toxic gaseous by-products ^d	Same as for used SF ₆ suitable for reuse on site ^{f g}	Stencilled on container: UN 3162, sulphur hexafluoride, hydrogen fluoride, thionyl fluoride ^c Danger label 2.3
	Liquefied gas containing both toxic and corrosive gaseous by-products ^e	Special containers approved for storing and transportation of corrosive gases (such as hydrofluoric acid HF) with a corrosion-proof valve and adapter ^{f g}	Stencilled on container: UN 3308, sulphur hexafluoride, hydrogen fluoride, thionyl fluoride Danger labels 2.3 + 8
^a UN numbers are assigned 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. ^b The filling factor is the weight of SF₆ contained in the container divided by the container volume and is usually specified in kg/l. ^c Only the two most abundant contaminants have to be specified. ^d Any used SF₆ containing toxic gaseous by-products can be reclaimed on site to remove the toxic gaseous by-products thereby facilitating easier transportation. ^e Any used SF₆ 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. ^f Containers filled with used SF₆ suitable for reuse at gas manufacturer should be tagged with the following sentence: "Contains used SF₆ suitable for reuse at gas manufacturer". ^g Containers filled with used SF₆ not suitable for reuse should be tagged with the following sentence: "Contains used SF₆ not suitable for reuse".			

A.3 Transportation of containers filled with SF₆

International regulations for shipment of electric power equipment containing SF₆ and SF₆ 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 SF₆ are summarised in Table A.3.

Table A.3 – International regulations for shipment of SF₆

Gas	Characteristic	Class	Final classification ^a	Transport document ^a
Technical grade SF ₆ ^b	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 ₆ suitable for reuse on site	Liquefied inert gas	Transportation class and danger label are the same as for technical grade SF ₆	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 ₆ suitable for reuse at gas manufacturer or used SF ₆ 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 ₆ suitable for reuse on site		
	Liquefied toxic gas (gas containing toxic gaseous by-products) ^c	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) ^d	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
^a UN numbers are assigned 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. ^b Avoid any contamination of containers dedicated to technical grade SF ₆ . ^c Any used SF ₆ containing toxic gaseous by-products can be reclaimed on-site to remove the toxic gaseous by-products thereby facilitating easier transportation. ^d Any used SF ₆ 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.				

A.4 Storage and transportation of electric power equipment containing SF₆

Electric power equipment filled with SF₆ shall be stored and transported according to local and international regulations.

A.5 Responsibilities

The owner of the electric power equipment utilising SF₆ is responsible for the proper use, transportation, and disposal of the equipment and the gas. He is also responsible for record-keeping regarding SF₆ banked in equipment 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 in the manuals as per IEC 62271-1.

Annex B (informative)

Safety and first aid

B.1 General safety rules

B.1.1 General

Before starting any maintenance/service work in electric power equipment, a detailed inspection of the state of the equipment shall be carried out and documented. In addition to the local safety regulations, at least the following general safety rules shall 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 / User of the equipment and the service provider.

Table B.1 lists the major issues to consider when working with SF₆ electric power equipment.

Table B.1 – Measures when working with SF₆ electric power equipment

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

A notice stating that open fire, naked flames (e.g. matches), smoking, use of heat engines, heating to more than 200 °C and welding without special precautions are prohibited and instructions for giving first-aid (see B.3) should be displayed while SF₆ 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 or heavily arced SF₆ should:

- use suitable tools and equipment;
- wear suitable protective clothing (see Table B.2 and B.1.5);
- observe high standards of personal hygiene;
- clean themselves and their equipment using disposable materials, before leaving the work area;
- remove protective clothing and wash them 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.

B.1.2 Protection of personnel

SF₆ 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 Annex C).

A specific training covering the recovery of used SF₆ from a gas-filled compartment is requested for personnel opening or entering the gas compartment. The Operating Instruction Manual of the equipment provided by the Original Equipment Manufacturer should be strictly followed.

Table B.2 gives an overview of the potential risks, safety precautions as well as safety equipment and tools required when opening or entering a gas compartment. No substantial difference between indoor and outdoor conditions is given as the operator opens or enters the compartment.

Table B.2 – Safety measures when opening or accessing gas compartments

Item	Any compartment which contained normally or heavily arced SF ₆	Any compartment which contained non-arc'd SF ₆
Potential risk	Fumes of cleaning substances O ₂ starvation Remaining used SF ₆ Residual reactive gaseous by-products Solid by-products and adsorber materials	Fumes of cleaning substances O ₂ starvation Remaining used SF ₆ or other gas from production process
Safety precaution	Removal of solid by-products and adsorber materials Ventilation Measurement of O ₂ concentration when entering Wear personal protective equipment Protect solid by-products against hydrolysis	Ventilation Measurement of O ₂ concentration before entering
Safety equipment and tools	Suction ventilator or vacuum cleaner O ₂ 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 or wind (outdoor only)	Suction ventilator or vacuum cleaner O ₂ concentration measuring device

Like any gas but oxygen, a concentration greater than 190 ml/l (19 % by volume) of SF₆ in the air is considered as a potential risk of asphyxiation. This is because it reduces the oxygen concentration down to 160 ml/l (16 % by volume), 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 it. In addition to that, the oxygen content in the ambient environment may be checked when working in confined spaces.

Eating, drinking and smoking are prohibited 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.

B.1.3 Handling of contaminated safety equipment and tools

Equipment and tools, which have been in contact with solid by-products or adsorber materials are considered to be 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 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 B.3.

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

Table B.3 – Neutralising solutions

Active agent	Formula	Concentration kg/100 l	T ₁ ^a hours	T ₂ ^b hours	References to the bibliogra- phy
Lime	Ca(OH) ₂	Saturated	Not applicable	24	[9]
Sodium carbonate (washing soda)	Na ₂ CO ₃	1,1 3 10 ^c 10-14 ^c 3	Not applicable Wash not applicable 1 not applicable	24 not applicable 0,25 48 not applicable	[10] [9] [11] [12] [13]
Sodium bicarbonate	NaHCO ₃	1 ^d	Not applicable	not applicable –	[11]
^a Reusable safety equipment, tools, gas compartments, and internal parts of compartments which contained normally arced SF₆ should, where practicable, be treated with a neutralising solution for a time period T₁. They should then be rinsed with clean water. ^b Reusable safety equipment, tools, gas compartments, and internal parts of compartments which contained heavily arced SF₆ should, where practicable, be treated with a neutralising solution for a time period T₂. They should then be rinsed with clean water. ^c When using alkaline solutions at such high concentrations, care should be taken to avoid contact with the skin and eyes. ^d Recommended for washing the skin.					

B.1.4 Pressurised equipment and tools or measuring devices

As with any pressurised gas, a sudden volume expansion results in a local temperature drop and may cause freezing. Suitable insulated gloves (e.g. leather, not latex) and protective goggles should be worn when working on high-pressure piping, valves or connectors, during filling operations.

All equipment and tools used during SF₆ handling potentially contain gaseous or liquid SF₆ under high pressure. They should be handled with care.

B.1.5 Personal safety and protective equipment

The use of personal safety and protective equipment is not related to the presence of the SF₆ 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 SF₆ due to external fire or internal arc fault, additional safety rules apply for entering a switchgear room, according to B.2.

Depending on the kind of work to be performed on site and according to Table B.2, workers engaged in handling SF₆ are provided with the following personal safety and protective equipment:

- protective gloves: suitable acid resistant gloves made of e.g. neoprene, PVC, rubber;
- protective goggles: chemical type industrial goggles according to local regulations (e.g. 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 (e.g. 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 (e.g. 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 O₂ or the amount of by-products are at unsafe levels, a respirator is used according to local regulations (e.g. European Standard EN 136);
- O₂ concentration measurement device for permanent monitoring of the O₂ content in the environment;
- environmental protection for outdoor work locations: 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 (e.g. 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.

B.1.6 Facilities and services

Where gas compartments containing used SF₆ have to be recovered 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.

B.2 Additional safety measures in case of abnormal release of SF₆ due to external fire or internal arc

General safety recommendations to adopt when working with SF₆ on site are given in B.1. This B.2 describes additional safety measures in case of abnormal release of SF₆ due to external fire or internal arc fault.

Under these circumstances, personnel trained on modules C1 or C2 (see clauses C.2.5 and C.2.6, respectively) are allowed to enter and clean the switchgear room or to access the electric power equipment. Table B.4 gives an overview of the potential risks, safety precautions as well as safety equipment and tools required.

NOTE Fire fighting can enter the switchgear room in the terms described in the local regulations.

Table B.4 – Additional safety measures

Item	Abnormal release of heavily arced SF ₆	Abnormal release of non-arced or normally arced SF ₆
Potential risk	Fumes of cleaning substances O ₂ starvation SF ₆ abnormally released Residual reactive gaseous by-products Solid by-products	Fumes of cleaning substances O ₂ starvation SF ₆ abnormally released
Safety precaution	Removal of solid by-products Ventilation Measurement of O ₂ concentration when entering Wear personal protective equipment	Ventilation Measurement of O ₂ concentration when entering
Safety equipment and tools	Suction ventilator or vacuum cleaner O ₂ 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 ₂ concentration measuring device

The same rules apply to areas below the level at which the release occurred, poorly ventilated or unventilated areas (e.g. cable trenches, inspection pits, drainage systems). Outdoor equipment needs standard measures for outdoor conditions to be applied (e.g. rain protection, wind protection). Natural ventilation is normally enough to prevent the potential risk of O₂ starvation.

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

B.3 First aid equipment and treatment

B.3.1 General

First aid equipment includes:

- 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 B.1) should minimise the likelihood of accidents. In case of an accident, first aid treatment should be applied as described in the following clauses.

B.3.2 Irritation of the skin

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

NOTE While seeking for professional medical advice, the affected part can be treated with calcium gluconate gel (HF antidote gel) as a remedy after washing for fluoride acid on skin.

B.3.3 Irritation of the eyes

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

B.3.4 Breathing difficulty

All personnel should immediately evacuate the affected area and move into the fresh air. Contaminated clothing on a person with breathing difficulties should be removed and this person covered with a blanket and kept still and under continuous observation. Emergency medical assistance shall be summoned without delay. If the patient stops breathing, artificial respiration must be immediately commenced by trained and qualified personnel.

Annex C (informative)

Training and certification

C.1 General

By the nature of the technology used for electric power equipment utilising SF₆, operational safety and environmental aspects are intrinsically and tightly coupled together and therefore should be treated at the same time.

The following clauses are focused on training performed to assure that operational safety requirements and environmental aspects are met concerning electric power equipment utilising SF₆.

Work on electric power equipment involving gas handling (e.g. development, manufacturing, testing, erection, commissioning, maintenance, repair, 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 of the utmost importance. Training can be done in different locations (e.g. 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 equipment, safety and continuity of service are very important. With the exception of the general training module (module A – awareness, see C.2.2), the scope of the training is related to a specific design (e.g. high-voltage live tank circuit-breaker, medium-voltage switchgear, high-voltage gas insulated switchgear) and different designs require different training to be certified.

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

C.2 Example of training modules

C.2.1 General

With respect to the different pressure systems according to definitions given in 2.11 and 2.12, 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 their entire operating life.

Workers handling SF₆ shall 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 SF₆ emissions.

The training is 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 or repair implying gas recovery (e.g. 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.

C.2.2 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 SF₆ filled equipment, independently from the question whether SF₆ handling is involved or not;
- all personnel working with SF₆ filled equipment, independently from the question whether SF₆ handling is involved or not.

No prerequisites are requested for attending the training.

All personnel working in the proximity to SF₆ filled equipment should be made aware according to the general safety rules given in B.1.

The training covers the following aspects:

- basic knowledge of relevant environmental issues (e.g. climate change, Kyoto Protocol, Global Warming Potential, see Annex F);
- environmental relevance of SF₆ emissions and mitigation approaches [19];¹
- physical, chemical and environmental characteristics of SF₆ (see Annex E);
- use of SF₆ in electric power equipment;
- existence of local regulations and international standards;
- personnel safety and first aid (e.g. local regulations, emergency plans and instructions in case of e.g. asphyxiation, internal arc fault), (see Annex B);
- SF₆ handling, hazards and health characteristics (see E.5)
- design of electric power equipment (properties and application/functionality).

C.2.3 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 SF₆ quality on-site;
- perform a SF₆ re-filling operation.

Personnel should hold a module A certificate to be eligible for module B1 training. Alternatively, a combined training session covering both modules A and B1 is acceptable.

The training covers the following aspects:

- existence of local regulations and international standards in relation to the tasks;
- SF₆ quality according to IEC 60376 (technical grade SF₆) and IEC 60480 (SF₆ for reuse);
- the Instruction Manuals given by the Original Equipment Manufacturer in relation to the tasks;
- personnel safety and first aid (e.g. safety equipment required for personal protection), (see Annex B);
- types of SF₆ filled compartments (see 2.9, 2.10, 2.11, and 2.12);

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

- instruments and procedures for checking the SF₆ quality (see 4.2 and D.4);
- procedures for re-filling of closed pressure systems (see 4.1 and Annex D);
- leak detection methods and repair techniques;
- categories for SF₆ reclaim and reuse (see 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17, 2.18, 2.19, and 2.20);
- storage and transportation of SF₆ (see Annex A);
- monitoring of SF₆ gas and appropriate recording of data related to local environmental obligations.

C.2.4 Module B2 – Installation and commissioning

This module provides the second intermediate level of training required for personnel who install and commission electric power equipment on-site.

Personnel should hold a module B1 certificate to be eligible for module B2 training. Alternatively, a combined training session covering both modules A, B1 and B2 is acceptable.

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 (e.g. working on open gas compartments in relation to the task) (see Annex B);
- procedures for air evacuation and SF₆ filling (see 3.2);
- procedures for topping-up with SF₆ (see 3.3);
- procedures for recovery and reclaim of non-arc'd SF₆ (see 5.2);
- SF₆ handling equipment in relation to the tasks (see Annex D).

C.2.5 Module C1 – Maintenance or repair implying gas recovery

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

- perform maintenance or repair of electric power equipment utilising SF₆, including gas recovery, reclaim as well as appropriate handling of by-products;
- provide further extension of the electric power equipment during its operating life.

Personnel should hold a module B1 certificate to be eligible for module C1 training. Alternatively, a combined training session covering both modules A, B1 and C1 is acceptable. 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 (e.g. 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 SF₆ due to fire or internal arc fault (see B.2);
- procedures for recovery and reclaim of normally and heavily arc'd SF₆ (see 5.3);

- SF₆ handling equipment in relation to the task (see Annex D);
- procedures for handling, neutralisation and removal of by-products (see B.1.3);
- handling of safety equipment and tools which have been in contact with solid by-products (see B.1.3).

C.2.6 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 decommission the electric power equipment at the end-of-life.

Personnel should hold a module C1 certificate to be eligible for module C2 training. Alternatively, a combined training session covering both modules A, B1, C1 and C2 is acceptable. 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 A.4);
- dismantling of equipment and part sorting (see Clause 6);
- instructions given by the Original Equipment Manufacturer on the use of tight drilling systems for recovery SF₆ from the electric power equipment, if applicable.

C.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 practical examination sessions are performed to prove the skill and the ability gained. However, any certification required by local regulations takes priority over the present Standard.

Records should be retained so as to:

- record the date on which the training was completed and the training content;
- identify which task and equipment design personnel have been certified for (e.g. SF₆ recovery);
- restrict task performance (e.g. SF₆ recovery for a certain design) to the personnel who have been certified for (e.g. modules C1 and C2);
- sustain a high level of expertise.

Annex D (informative)

Description of SF₆ Handling Equipment

D.1 General

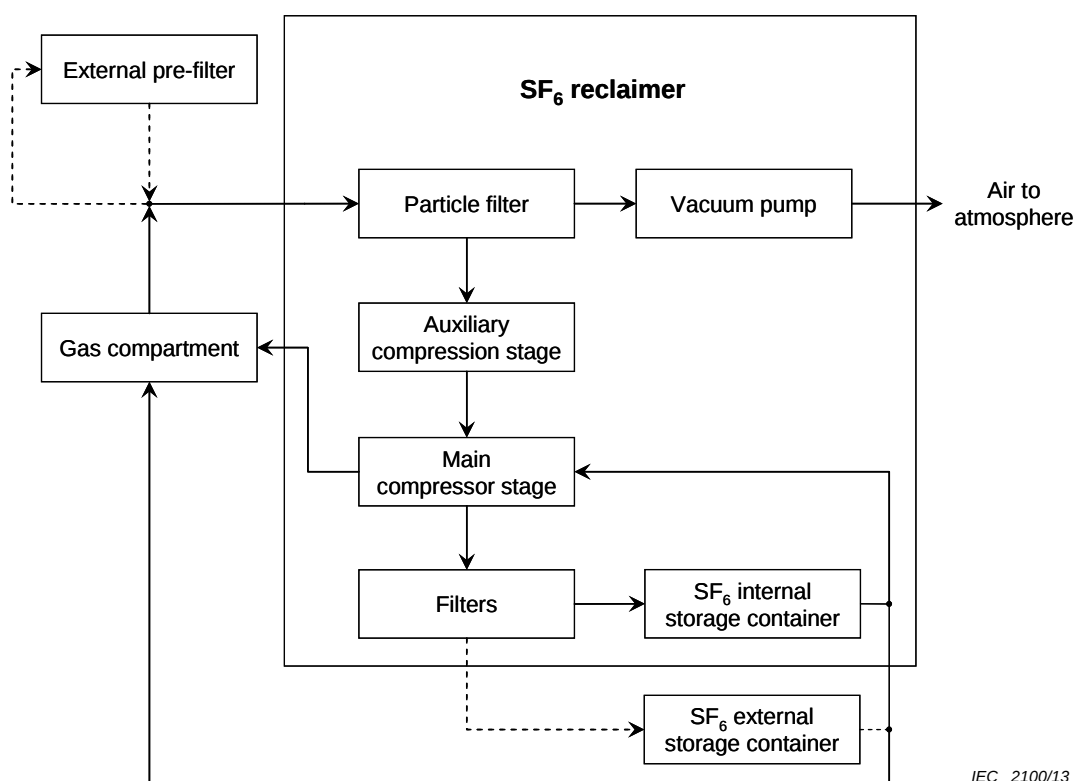
This annex gives information about minimum functionality and performance criteria for SF₆ handling equipment and specific components.

D.2 Reclaimer

D.2.1 General

The appropriate type and size of the reclaimer should be chosen according to the SF₆ quantity to be handled. Figure D.1 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 SF₆ in the gas compartment;
- recovery of SF₆ from the gas-filled compartment;
- storage and filtering of SF₆;
- flooding of the gas compartment with ambient air;
- cylinder to cylinder (or storage tank) transfer.



IEC 2100/13

Figure D.1 – General purpose reclaimer

D.2.2 External pre-filters

An external pre-filter is required to recover used SF₆. 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. If potential oil contamination of the SF₆ is expected (recovering gas from a dual pressure circuit breaker or due to an accidentally contaminated gas compartment) the use of an activated charcoal pre-filter unit is recommended.

Recommended major characteristics are:

- pore size lower than 10 µm (low through-flow resistance);
- residual moisture lower than 200 µl/l;
- residual reactive gaseous by-products lower than 200 µl/l.

D.2.3 Filters

D.2.3.1 General

Filters are required to remove reactive gaseous by-products, moisture and solid particles or oil droplets before storing SF₆ in a container, hence allowing for its reuse. These filters are installed in the reclaimer.

Table D.1 shows typical filter types used during SF₆ reclaim.

Table D.1 – Typical filter types used during SF₆ reclaim

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 µl/l. Residual SO ₂ +SOF ₂ lower than 12 µl/l. Particle retention ability.
Oil filter	Removes oil when required.	Special filter utilising active charcoal.

D.2.3.2 Particle filter

Some by-products, which are generated during switching operations, are made up of fine solid particles (e.g. 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.

D.2.3.3 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 (NaCO₃) should not be used as a filter material for SF₆ as, upon contact with certain reactive gaseous by-products, produces CO₂, which is difficult to remove from SF₆.

D.2.3.4 Oil filter

An oil trap should be inserted in the SF₆ cycle if an oil-lubricated machine is used or if an oil-insulated electric component is included in the electric power equipment utilising SF₆. 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.

D.2.4 Vacuum pump

The vacuum pump is used to evacuate the gas compartment/container/sample cylinders from gases different from SF₆, typically air or N₂ to avoid SF₆ 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 SF₆ – 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 automatically 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 is recommended. If smaller diameters are used, the evacuation process is considerably extended and can hardly be improved by the use of a vacuum pump with higher capacity.

D.2.5 Main and auxiliary compressors

When the SF₆ 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 compressor, 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 compressor, 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 are preferred to eliminate the possibility of 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 SF₆ in a gaseous form (5 MPa pressure is recommended). An additional cooling device can be used to speed up SF₆ recovery.

D.2.6 External and internal gas storage containers

Commercial pressure vessels or special storage containers for used SF₆ are available as gas storage containers. They are mobile, stationary or installed in the reclaimer. Only specially approved containers for storage and transportation of used SF₆ 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 to be observed. For storage containers with liquid SF₆ storage a nominal pressure of 5 MPa is used.

D.2.7 Evaporator and gas storage container heater

If SF₆ is stored in liquid form and used as a gas, thermal losses due to evaporating inside the container can cause SF₆ to cool itself to a temperature where it will no longer evaporate. This can usually be observed by a visible frost ring / line on the tank. In order to fill large volumes rapidly, the reclaimers storage vessel(s) should be designed to extract liquid SF₆ that is then vaporized inside an evaporator. The evaporator 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.

D.2.8 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.

D.2.9 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.

D.2.10 Safety valves

Safety valves are used in the SF₆ cycle for pressure relief. Local safety regulations are followed. Safety valves, which do not directly release SF₆ to the atmosphere, should be used.

D.3 Flexible hose connections

The reclaimer, 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 synthetic rubber or flexible stainless steel, able to withstand vacuum and permeation are required.

D.4 Portable devices for gas measurement

D.4.1 General

Table D.2 gives a survey on gas measuring devices including recommended values for range, operating temperature and minimum accuracy. Those quantities are typically declared by the manufacturer of portable devices for gas measurement in the technical datasheet.

Table D.2 – Gas measuring devices

Device	Measurement	Range	Operating temperature	Minimum accuracy
Dew point meter	Moisture	Dew point: -50 °C to 0 °C	-10 °C to 40 °C	±2 °C
SF ₆ percentage measuring	SF ₆ percentage SF ₆ /N ₂ or SF ₆ /air SF ₆ percentage SF ₆ /CF ₄	0 ml/l to 1 000 ml/l	-20 °C to 40 °C	±10 ml/l ±20 ml/l
Analysers of reactive gaseous by-products	By-products as e.g. SO ₂ Oil mist	1 µl/l to 25 µl/l 0,16 µl/l to 1,6 µl/l	-10 °C to 40 °C	±15 % of the full range
SF ₆ pressure gauge	Pressure	0 MPa to 1 MPa	-20 °C to 40 °C	±10 kPa
Thermometer	Temperature	-25 °C to 70 °C	-25 °C to 70 °C	±1 °C

Gas measurements are conventionally referred to and reported at 20 °C. Adequate corrections shall be made for measurements made at other temperatures.

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

- the moisture content in the gas;
- the SF₆ percentage/quantity of inert gases;
- the total amount of reactive gaseous by-products giving rise to residual acidity content.

State-of-the-art equipment allows for the simultaneous measurement of all contaminant parameters using a single device by taking just one sample and is also capable of pumping back SF₆ into the gas compartment.

D.4.2 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 for this 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 pipes using self-sealing valve connections;
- stainless steel pipes and fittings made of hydrophobic materials e.g. PTFE;
- calibrated or capable of field calibration;
- no SF₆ gas release to the environment (e.g. small compressor for gas re-filling 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.

D.4.3 SF₆ percentage measuring device

Devices that compare the speed of sound or the thermal conductivity of the SF₆ gas mixture with pure SF₆ are used to determine the SF₆ percentage. Velocity of sound based systems

are fast (response time less than 1 min), do not need recalibration and use only a minimal amount of gas. Their readout is the SF_6 concentration expressed in % by volume. They are mostly calibrated for mixtures of SF_6 and N_2 or air, or can be calibrated for SF_6 / CF_4 mixtures.

Desirable characteristics are:

- no SF_6 gas release to the environment (e.g. small compressor for gas re-filling 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 volume of SF_6 should not be used as different non-reactive gases such as N_2 or CF_4 may be present.

D.4.4 Analysers of reactive gaseous by-products

Various methods are available to test for reactive gaseous by-products. Common and recommended practice is to test SF_6 for the level of SO_2 . These tests can be performed using either reactive tubes, (reaction tubes change their initial colour if SF_6 containing SO_2 is fed through them) or by using an electro-chemical sensor. Electrochemical sensors as well as the SO_2 reaction tubes are also sensitive to SOF_2 .

Desirable characteristics are:

- known sensitivity to SO_2 and SOF_2 ;
- connecting pipes resistant to reactive gaseous by-products and utilising self sealing valve connections;
- no SF_6 gas release to the environment (e.g. small compressor for gas re-filling or make use of an empty cylinder);
- less than ~6 g gas used per measurement.

The use of reaction tubes sensitive to HF is not recommended, as HF reacts very fast with metallic surfaces to form a surface layer of metal fluorides.

D.5 Portable SF_6 detectors

Portable detectors for SF_6 are broadly of three types:

- Photo acoustic infrared detectors are based on the pressure waves emitted by the SF_6 molecules when illuminated by monochromatic infrared light. Special microphones detect the acoustic signal which is directly proportional to the energy absorbed. Sensitivities down to 0,01 $\mu\text{l/l}$ (10 ppbv) can be achieved which are far superior to other methods. On the other hand, the response time of about 15 s prevents the device being used for leak localisation.
- 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 corona discharge cells which are described below. Sensitivities down to 0,1 $\mu\text{l/l}$ (0,1 ppmv) of SF_6 in air can be achieved.
- 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 $\mu\text{l/l}$ (10 ppmv) can be achieved, but not with all available units [14].

Photo acoustic and electron capture detectors are generally used for leak tracing and quantification.

If sensitive enough, corona discharge cells could be suitable for either assessing whether an area contains SF₆ or leak detection.

D.6 Alarm system SF₆ detectors

Alarm systems require detectors with very high long-term stability. The infrared absorption characteristic of SF₆ is used as the basis for most detectors of this type [15]. 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 µl/l (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 SF₆ detectors are generally used only where very large volumes of SF₆ are contained in equipment housed indoors, such as in high-voltage GIS installations.

D.7 Cylinders for gas samples

Stainless steel cylinders with a volume smaller than 1 l are recommended. The gas quantity should be not smaller than 6 g. The gas should be sampled directly from the container (e.g. 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 should be used.

D.8 Gas mixing device

Figure D.2 is a gas mixing device which is used to mix SF₆ with a complementary gas, typically N₂ or CF₄, according to a preselected gas ratio during filling or topping-up of electric power equipment.

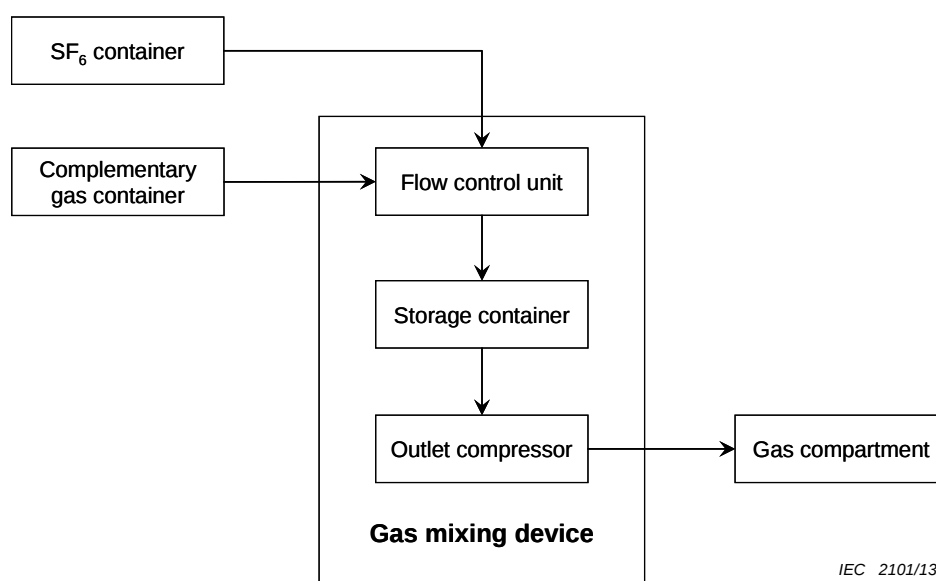


Figure D.2 – Gas mixing device

The flow of both SF₆ and the complementary gas is controlled by the flow control unit so that the storage container is filled with the preselected mixture. The outlet pressure (i.e. the filling pressure in the gas compartment) is controlled by the outlet compressor.

Desirable characteristics are:

- adjustable SF₆ percentage and outlet pressure (i.e. filling pressure);
- gas mixing ratio (i.e. SF₆ percentage): 10 % to 80 % by vol.;
- maximum outlet pressure: up to 1,0 MPa;
- SF₆ inlet in liquid state;
- possibility of mixing little as well as large quantities of gas.

Annex E (informative)

Sulphur hexafluoride

E.1 General

Sulphur hexafluoride (SF₆) 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.

SF₆ 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, SF₆ has been successfully used by the Electricity Industry in power equipment for high-voltage transmission and distribution of electricity (e.g. 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, tyres, high performance radar, tracer gas for meteorological measurements and in power plant piping, and military applications.

E.2 Chemical properties

Pure SF₆ 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 N₂, up to temperatures of about 180 °C.

Table E.1 lists the main chemical characteristics.

Table E.1 – Main chemical characteristics of SF₆ [16]

Formula	SF ₆
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

NOTE The CAS Number is assigned by the Chemical Abstracts Service who maintain a registry of chemical substance information. It has no chemical significance. Access to the information is via a subscription service.

E.3 Physical properties

SF₆ 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 SF₆ 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 SF₆ is between 0,1 MPa and 1,0 MPa absolute. The pressure/temperature/density characteristics of the gas are shown in Figure E.1.

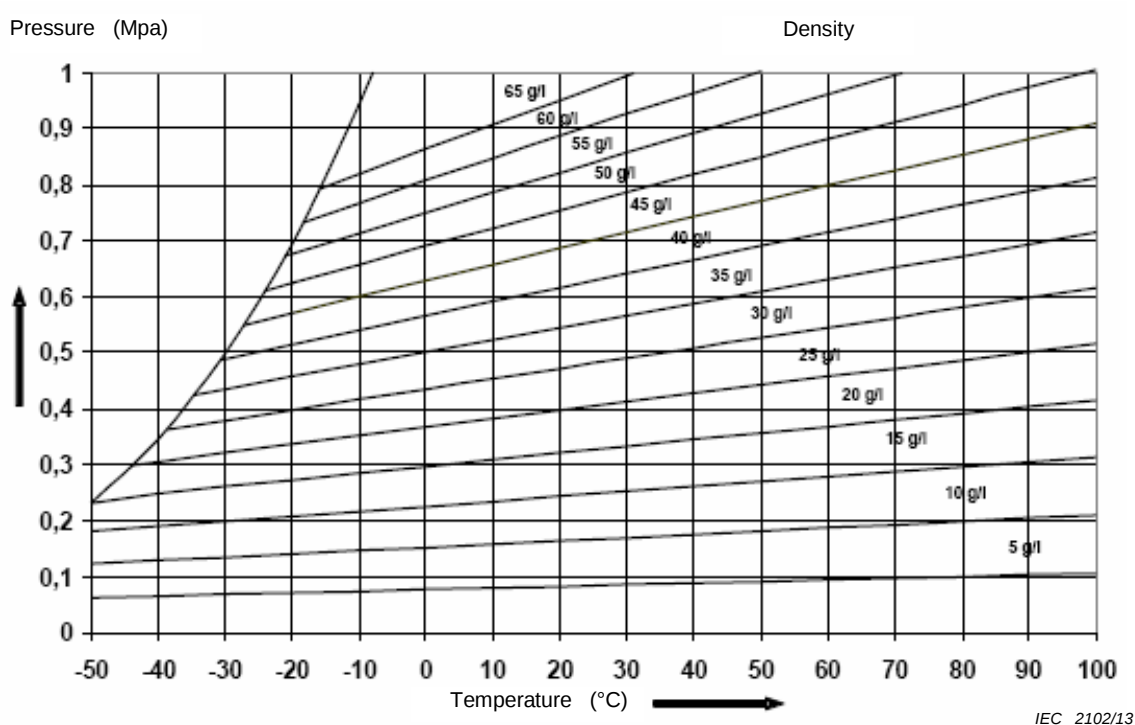


Figure E.1 – Pressure/temperature/density characteristics for SF₆ [16]

Table E.2 lists the main physical characteristics.

Table E.2 – Main physical characteristics of SF₆ [16]

Density at 20 °C 100 kPa	6,07 kg/m ³
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 ³
Solubility in water at 20 °C	6,31 cm ³ SF ₆ / kg H ₂ O
Sound velocity at 0 °C 100 kPa	129,06 m/s
Refractive index	1,000 783
Heat of formation	-1 221,58 ± 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 E.1

E.4 Electrical properties

The excellent dielectric properties of SF₆ 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 SF₆ is about 3 times higher than that of air under the same conditions.

Because of its low dissociation temperature and high dissociation energy, SF₆ is an excellent arc quenching medium.

When an electric arc cools in SF₆, it remains conductive to a relatively low temperature, thus minimising current chopping before current zero, and thereby avoiding high overvoltages.

Table E.3 lists the main electrical characteristics of SF₆.

Table E.3 – Main electrical characteristics of SF₆ [16]

Critical breakdown field relative to pressure	89 V/(m×Pa)
Relative dielectrical constant at 25 °C and 0,1 MPa absolute	1,002 04
Loss factor (tan δ) at 25 °C and 0,1 MPa absolute	<2,0×10 ⁻⁷
Effective ionisation coefficient	$\frac{\alpha}{p} = A \frac{E}{p} - B$ α: m⁻¹ E: V/m p: Pa A: 2,8×10⁻²/V B: 89 V/(m×Pa)

E.5 Handling, hazards and health characteristics

SF₆ 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 (e.g. cable ducts, trenches, inspection

pits, drainage systems), may remain full of SF₆. Personnel should be aware of the danger of asphyxiation in such places. Chambers containing SF₆ should not be entered without adequate ventilation and personal protection equipment.

SF₆ 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 µl/l (1 000 ppmv or 6 100 mg/m³). This is intended for places of work in which personnel spend up to 8 h per day, 5 days per week [17]. That TLV is normally adopted for all harmless gases not present in the atmosphere.

SF₆ does not harm the life or the ecosystem but it is a potent and persistent greenhouse gas, as described in Annex F.

When handling SF₆ it is necessary therefore to adopt procedures to keep the gas in a closed cycle, avoiding any deliberate release to the environment.

Technical grade SF₆ is commercially available, according to IEC 60376.

Used SF₆ can be reused on-site, according to IEC 60480.

Used SF₆ 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 F (informative)

Environmental effects of SF₆

F.1 General

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.

F.2 Ecotoxicology

SF₆ 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, SF₆ does not harm the ecosystem. SF₆ 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.

F.3 Ozone depletion

SF₆ and its by-products from application in electric power equipment do not contribute to the destruction of stratospheric ozone layer [16] because they do not contain either chlorine or bromine.

F.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) [18].

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 [20] 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 (CO₂), methane (CH₄), nitrous oxide (N₂O), hydrofluorocarbons (HFCs), perfluorocarbons (PFCs), and sulfur hexafluoride (SF₆). 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 Fourth Assessment Report (AR4) in Autumn 2007 [18].

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 CO₂, 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 SF₆ and its long lifetime in the environment are the reasons for its high Global Warming Potential (GWP) which is 22 200 higher than CO₂, 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 CO₂. Its overall contribution to the global greenhouse gas effect from all applications amounts to approximately 0,2 % overall.

However, the GWP of SF₆ alone is not adequate to measure the environmental impact of electric power equipment based on SF₆ technology. The environmental impact of any specific application should be evaluated and compared using the Life Cycle Assessment – LCA approach as regulated by ISO 14040 [2].

The Electric Industry utilises SF₆ in a closed cycle, banking it e.g. 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 SF₆ are banked in gas insulated power transformers (GIT) as well.

In spite of being reported as the most important user of SF₆ worldwide, the Electric Industry is a low contributor to the global emission of SF₆, far below that of 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 SF₆ 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 [21], Asia [22], and North America [23] and [24]. Those actions include:

- designing equipment requiring a smaller quantity of SF₆ and having a high tightness degree;
- improving handling processes and handling equipment for all life cycle stages according to the present technical report.

F.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 G 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.

F.6 Environmental compatible SF₆ policy

SF₆ 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 [25] involving manufacturers and users have been signed in some countries with the aim of controlling and reducing emissions of SF₆ 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 SF₆, state-of-the-art technologies and procedures are applied to minimize SF₆ emissions.

Certain countries have recently introduced recording and reporting of SF₆ emissions in their legislation.

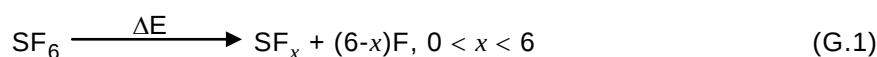
Annex G (informative)

SF₆ by-products

G.1 Decomposition of SF₆

G.1.1 General

When arcing occurs in SF₆ 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 [12], and [16]. When the SF₆ 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 ΔE ceases, most of the atoms recombine to form SF₆, 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 SF₆.

G.1.2 The behaviour of SF₆ in an electric arc

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

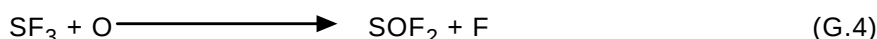
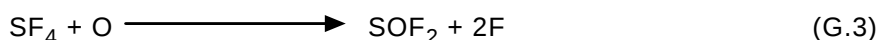
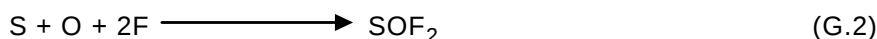
From temperatures of 500 °C, SF₆ begins to decompose into its constituent parts, with the degree of decomposition being directly proportional to the quantity of energy converted. In the dissociation process defined in reaction (G.1), the SF₆ molecules are broken down into sulphur and fluorine atoms at about 3 000 °C.

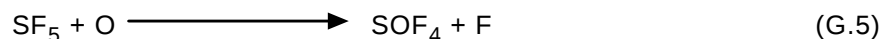
The large quantity of heat adsorbed during this process is dissipated away from the arc zone by radiation and convection. Below a temperature of about 1 000 °C, the atoms recombine or react with other substances, such as vaporised electrode metal, the vessel wall, plastics or impurities. Gaseous and solid by-products can arise, including metal fluorides and sulphur fluorides, of which the most important are CuF₂, AlF₃, WF₆, CF₄ and SF₄.

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.

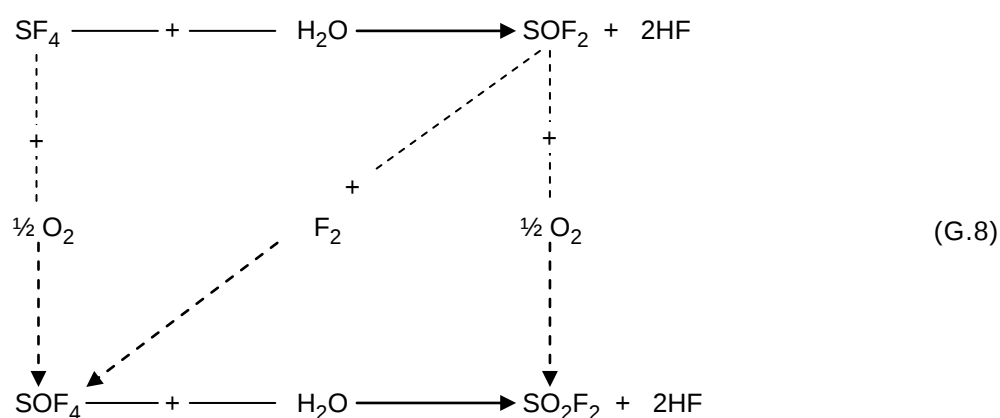
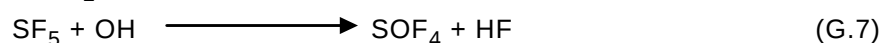
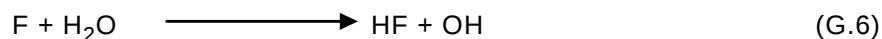
In presence of oxygen, by-products can arise as follows:





The oxygen involved in the reactions (G.2), (G.3), (G.4), and (G.5) may remain as result of the evacuation process or may be released by the electrode materials during arcing. SOF_2 is the major by-product.

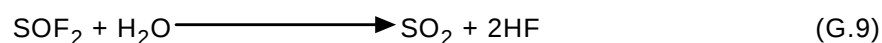
In the presence of moisture, the following reactions occur:



The dashed lines in reaction (G.8) indicate reactions that occur only to a limited degree during SF_6 decomposition in an arc. Whilst the reactions of (G.8) imply the formation of significant quantities of HF, this product has not been reported in large quantities following power arcing in electric power equipment. This is probably because by-product formation is mainly according to (G.2), (G.3) and (G.4). It is also possible that HF formed by the reactions of (G.8) further reacts with metal vapours to produce metal fluorides.

SF_4 is produced in significant quantities but hydrolyses rapidly (G.8) in the presence of moisture.

In the continued presence of moisture, further hydrolysis occurs, leading to:



Other reactions have been reported in the literature; additional by-products of arcing such as S_2F_{10} may be formed. However, the quantity of S_2F_{10} formed under arcing conditions is extremely low, because SF_5 radicals, produced at high temperatures, form S_2F_{10} only when cooled very rapidly, a condition not likely to apply in the arc [26].

G.1.3 SF_6 decomposition with low current discharges

Whilst operating voltage is applied to equipment containing SF_6 , the possibility of low current discharges such as corona, sparking and partial discharges cannot be ruled out. However, the concentrations of by-products resulting from such discharges are likely to be very low. When SF_6 is decomposed in spark discharges, the reactions shown in dashed lines in (G.8) will predominate [26].

G.1.4 Catalytic decomposition of SF_6 (high-temperature behaviour)

SF_6 can be heated to 500 °C in quartz vessels without decomposing. Up to temperatures of about 150 °C, all commonly used materials, such as metals, glass, ceramics, rubber and polyester resin are fully resistant to SF_6 . It is only at temperatures higher than 200 °C that

some metals begin to have a decomposing effect on the gas, but in the case of the metals and alloys normally used, this effect is not observed to any marked degree until the temperature range of 400 °C to 600 °C is reached [16].

As the maximum operating temperatures inside electric power equipment in the absence of arcing are far below these values, no SF₆ decomposition of this kind is to be expected during operation.

G.2 Corrosion behaviour of SF₆ and its by-products

SF₆ is a completely non-reactive gas. There is no possibility therefore that corrosion will be caused directly by the SF₆ 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.

G.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 [16].

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.

G.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.

SF₆ containing by-products has an unpleasant pungent smell that in itself is associated with an irritant effect. The olfactory thresholds, especially for SOF₂, SO₂ 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 [12].

Annex H (informative)

Procedure for evaluating the potential effects on health of SF₆ by-products

H.1 General

This annex suggests procedures for the evaluation of the risks to health due to SF₆ released into the local atmosphere by leakage and in the event of an internal arc fault.

During normal service SF₆ remains inside the electric power equipment and the gaseous by-products formed are neutralised by molecular sieves as well as by natural recombination processes. SF₆ can become present in the atmosphere because of leakage or if a gas filled compartment fails to contain the gas, e.g. internal arc fault. It is necessary to differentiate clearly between leakage conditions and internal arc fault situations leading to a sudden release of SF₆, when evaluating health risk.

In case of leakage it is necessary to consider the effects of long-term exposure to the gaseous by-products of SF₆. The concentrations of these by-products in the air should remain low enough to present no threat to unprotected personnel during a normal working period of e.g. 8 h.

In case of a sudden release of SF₆ due to an internal arc fault, the emergency procedure required by the local regulation may imply a momentary exposure. By-product concentrations of higher levels than would be tolerable during e.g. 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 emissions and this requires detailed knowledge of all of the by-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 SF₆.

The following clauses give the procedures for calculating the risks associated with the presence of SF₆ by-products in the atmosphere due to leakage and to internal arc fault together with the principles adopted for performing those calculations.

H.2 Formation and health effects of SF₆ by-products

H.2.1 Formation of SF₆ by-products

During high power arcing in SF₆ 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 G.1.2. 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: S, F, H, N, O and diverse ions. The heating of the electrodes and the insulating parts by the arc adds vapours of Cu, W, C and Al to this atmosphere.

After arc extinction or in regions where cooling commences, these atoms start to bind together again and reform mainly SF₆. 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 G. The quantities formed are directly related to the power injected into the gas volume.

In case of power arcing, the most frequently encountered by-products are: SOF₂, SO₂, HF and also CF₄, SF₄ and SO₂F₂ [27]. In case of low energy electrical discharges, S₂F₁₀ is also formed in extremely small quantities [28], [29] and [30].

H.2.2 Effects of SF₆ by-products on health

H.2.2.1 General

If SF₆, 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 into account the concentration of each by-product in relation to the permissible concentrations for the appropriate exposure time. Equation (H.1) should be adopted to calculate the total risk associated to the by-products.

$$\text{Risk}_{\text{tot}} = \sum_i \frac{\text{Concentration (by - product)}_i}{\text{Threshold (by - product)}_i} \leq 1 \quad (\text{H.1})$$

H.2.2.2 Health effects of arc decomposed SF₆

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 separately treated;
- 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 should be estimated by studying the concentration of this component alone.

A survey of the majority of the work carried out over the past decades on high power arc decomposition of SF₆ [27], [31] concludes that the total health risk to personnel, due to arc decomposed SF₆, is predominantly dependent on the SOF₂ concentrations generated.

Hydrolysis of SOF₂ may occur in the presence of significant concentrations of moisture, producing SO₂ and HF, as reported in G.1.2. For the time being, no OEL (Occupational Exposure Limit) has been defined for SOF₂. For this reason, it is assumed that hydrolysis always takes place giving HF and SO₂. The potential effect on health is then evaluated on those gaseous by-products (see Table H.1).

H.2.2.3 Exposure duration and dilution in air

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

- concentration within the surrounding volume;
- time duration of exposure, leading to the selection of the appropriate exposure limit.

When a leakage situation is calculated, the OEL (Occupational Exposure Limit) concentration, defined as TWA (Time Weighted Average over an 8 h per day, 40 h per week exposure limit), should be used.

Under abnormal conditions e.g. internal arc fault, personnel immediately leave the room of the electric power equipment and the exposure is hence momentary. Under those conditions, concentrations defined as C (Ceiling exposure limit, values never to be exceeded), should be employed. When the C value is not defined, the STEL (Short Term Exposure Limit) could be adopted. The STEL refers to an average exposure of 15 min that should not be exceeded during the 8 hours working time.

The occupational exposure limits (OELs) defined by the American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) [33] for SO₂, HF, and S₂F₁₀ are given in Table H.1.

Table H.1 – OELs for SO₂, HF, and S₂F₁₀

OEL	SO ₂	HF	S ₂ F ₁₀
TWA (μl/l)	2	0,5	Not defined
STEL (μl/l)	5	Not defined	Not defined
C (μl/l)	Not defined	2	0,01
NOTE So far, no OEL has been defined for SOF ₂ .			

H.2.3 Quantitative estimation of gaseous by-products

H.2.3.1 General

The quantity of gaseous by-products formed during an electrical discharge is generally referred to the energy in joule dissipated in the gas. This is called as production rate, r .

Experimental results are generally quoted in mol/J but another unit widely adopted is l/kJ. The conversion is based on the fact that 1 mol of ideal gas occupies 24,37 l, at 20 °C and at 100 kPa, and is given in Equation (H.2).

$$1 \text{ mol/J} = 24,37 \times 10^3 \text{ l/kJ} \quad (\text{H.2})$$

The estimation of the production rates of SOF₂ due to arcing and S₂F₁₀ due to low energy discharge, both sparking and partial discharges in the gas, is given in H.2.3.2, H.2.3.3, and H.2.3.4, respectively.

H.2.3.2 Estimation of the SOF₂ production rates due to arcing

The SOF₂ production rate is experimentally determined and depends on the electrode material used and the type of discharge considered. Exothermic reactions, which occur with aluminium electrodes, seem to enhance the production rate.

The values used here have been averaged over the range of presently available data found in the literature [27] and [31].

Table H.2 – SOF₂ production rate

Electrode material	SOF ₂ production rate (r)	
	mol/J	l/kJ
Cu, Fe, WCu	150×10^{-9}	$3,7 \times 10^{-3}$
Al	600×10^{-9}	15×10^{-3}
NOTE Aluminium electrodes are assumed only for GIS bus-bar situations.		

H.2.3.3 Estimation of the S₂F₁₀ production rate due to sparking

Manoeuvring disconnectors produces sparking, which is considered as a low energy discharge. Average parameters are: 1 kV arc voltage drop, 0,25 A capacitive current and 1 s time duration, resulting in 0,25 kJ per each sparking event. However, individual sparks may reach up to 3 kA peak current for only a few tens of microseconds.

In the absence of published data, the production rate of $0,05 \times 10^{-9}$ mol/J (or $1,22 \times 10^{-6}$ l/kJ) is chosen for S₂F₁₀ due to sparking, which reflects a situation at the lower end of the spark

discharge range but more than 2 000 times greater than for arcs. This has been confirmed as being realistic by measurements on a real disconnector under highly accelerated operation conditions [29].

H.2.3.4 Estimation of the S_2F_{10} production rate due to partial discharges

Single components of high-voltage switchgear and controlgear or sub-assemblies in which they are contained shall not exceed the maximum permissible partial discharge level of $q = 5$ pC (see 6.2.9.102 of IEC 62271-203:2011).

At rated voltage U_r , the energy dissipated during each single partial discharge event is therefore:

$$E = q \times \frac{U_r}{\sqrt{3}} \quad (\text{H.3})$$

which always falls into the micro to nanojoule energy range.

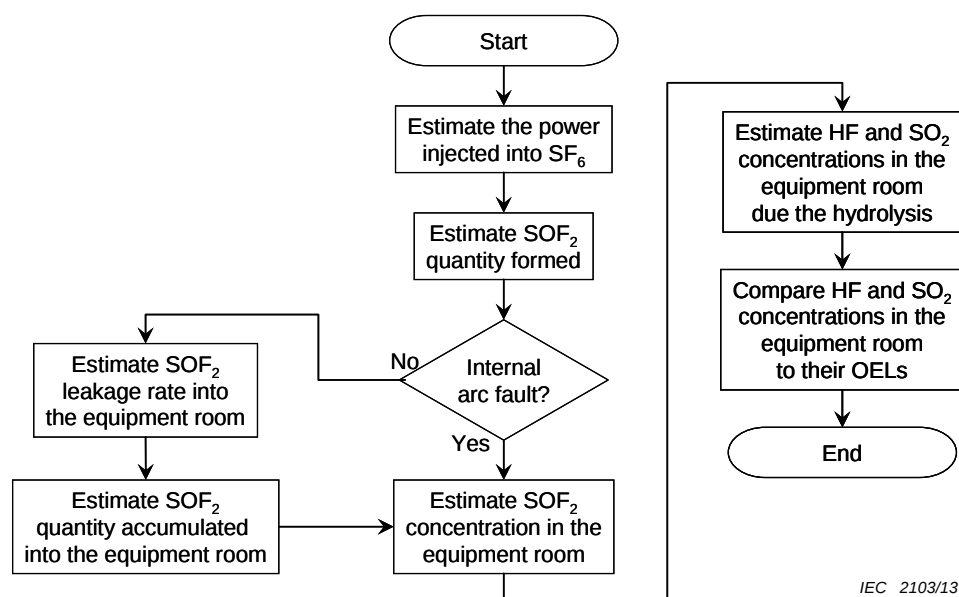
The S_2F_{10} production rate due to partial discharges at power frequency is not available in the literature. A value of $0,2 \times 10^{-9}$ mol/J (or $4,88 \times 10^{-6}$ l/kJ) is obtained by extrapolating the experimental results for sparking in the very low energy region.

H.2.4 Procedures for health risk evaluation

The procedures for the evaluation of the potential effects on health of gaseous by-products are based on the following assumptions:

- the equipment room is completely closed and ventilation is inoperative during the period of interest;
- the adsorbers fitted into the electric power equipment do not reduce the amount of gaseous by-products during the period of interest;
- the gas emitted uniformly mixes with the air in the room containing the electric power equipment in a short time with respect to the working day or exposure duration.

Figure H.1 describes the typical procedure to follow for the evaluation of the potential effects on health of the by-products formed during arcing (either power interruption or capacitive switching) in SF_6 . It is applicable to both leakage and internal arc fault cases.



IEC 2103/13

Figure H.1 – Procedure for the evaluation of the potential effects on health due to arcing

The power injected during one single event into the electric power equipment should be evaluated. Depending on the circumstances, e.g. power arcing, capacitive arcing, corona discharge, this could be thought as arc voltage drop times arc current times arc duration or as voltage drop times charge transferred. The cumulated power is then evaluated multiplying the power of the single event by the number of events taking place during the reference period.

The quantity of SOF_2 formed within the electric power equipment is the power itself times the SOF_2 production rate. The SOF_2 production rate is a non-linear function of the power, the quantity of SF_6 , the time duration and the electrode material. Numerical values are determined by experiments (see H.2.3.2).

In case of internal arc fault, the bursting disk bursts and the whole SOF_2 quantity is suddenly released into the switchgear room, which is the worst case scenario.

In case of leakage, only a small portion of the SOF_2 quantity formed into the electric power equipment transfers to the switchgear room and accumulates over a certain period of time. Under this condition, if $V_{\text{SOF}_2, \text{equipment}}$ is the SOF_2 quantity formed inside the electric power equipment in litres and $F_{\text{p,rel}}$ is the leakage rate of the electric power equipment in % p.a., the SOF_2 quantity accumulated into the switchgear room during one day is:

$$V_{\text{SOF}_2, \text{room}} = \frac{V_{\text{SOF}_2, \text{equipment}} \times F_{\text{p,rel}}}{100 \times 365} \quad (\text{H.4})$$

The SOF_2 concentration in the equipment room is the SOF_2 quantity into the equipment room divided by the volume of the switchgear room. For outdoor installations, the same evaluation should be performed considering the volume of a virtual equipment room.

Due to hydrolysis in the equipment room, the HF concentration in $\mu\text{l/l}$ is twice the SOF_2 concentration in $\mu\text{l/l}$ and the SO_2 concentration in $\mu\text{l/l}$ is equal to the SOF_2 concentration in $\mu\text{l/l}$.

The potential effect on health of the by-products is then evaluated comparing the HF and the SO_2 concentrations in the equipment room to the OELs (Occupational Exposure Limits). The total risk R_{tot} should be defined as:

$$R_{\text{tot}} = \frac{\text{Concentration}(\text{SO}_2)}{\text{TLV}(\text{SO}_2)} + \frac{\text{Concentration}(\text{HF})}{\text{TLV}(\text{HF})} \leq 1 \quad (\text{H.5})$$

A similar procedure can be adopted for the evaluation of the potential effects on health of S_2F_{10} due to low energy electrical discharges. In this case, no hydrolysis takes place. The procedure is described in Figure H.2.

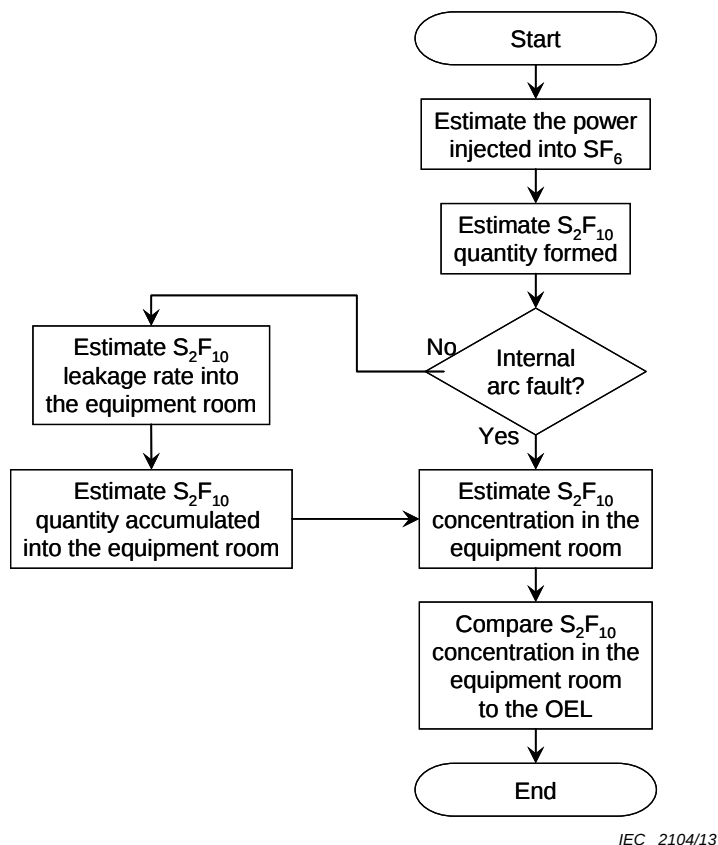


Figure H.2 – Procedure for the evaluation of the potential effects on health due to low energy discharges

H.3 Conclusions

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 by-products, formed by arcing and by low-energy discharges, released due to leakage from SF_6 -filled electric power equipment, reach negligible concentrations in the workplace atmosphere. Therefore there is no cause for concern and no need for precautions other than the normal ventilation practices for low-lying areas. This is still valid even in the case of abnormal leakage situations (a leakage rate for example 2 orders of magnitude higher than the normal rate).

However, in the unlikely event of an internal fault leading to a release of SF_6 , significant concentrations of by-products can occur in an equipment room. In any situation of this sort, basic safety procedures include evacuation rules are designed to ensure that personnel are exposed to exhausted materials for a time as short as possible. Furthermore, forced ventilation and/or venting ensure the concentration levels can be reduced within minutes.

For outdoor installations the volume of air into which the arc decomposed SF_6 escapes is large if not infinite. Prevailing winds and the high exhaust velocity also speed up dispersion.

It is thus concluded that, as long as basic safety procedures are followed, the risk specifically associated with the use of SF_6 in electric power equipment is minimised.

Annex I (informative)

Cryogenic reclaim of SF₆

I.1 General

This annex describes as example a method used in Australia during the past 15 years to reclaim SF₆ based on a cryogenic technique [35], [36], and [37].

I.2 Applications

The principal use of the cryogenic process is to remove contaminants from used SF₆ stored in cylinders returned to the main process plant from a site where it has been removed from electric power equipment.

The process can be used to:

- aggregate the remainder of SF₆ from containers that have been used to fill electric power equipment;
- recover SF₆ from electric power equipment to a pressure of below 100 Pa without the need for a recovery compressor;
- restore used SF₆, even heavily arced or contaminated by air to the standard of technical grade SF₆;
- separate SF₆ from a mixture of SF₆ and nitrogen (N₂). All the SF₆ can be recovered and essentially none is released to the atmosphere;
- obtain CF₄ from an SF₆ / CF₄ mixture.

I.3 Physical Background

The process relies on the variation of the saturated vapour pressure of SF₆ and its typical contaminants with temperature (see Figure I.1).

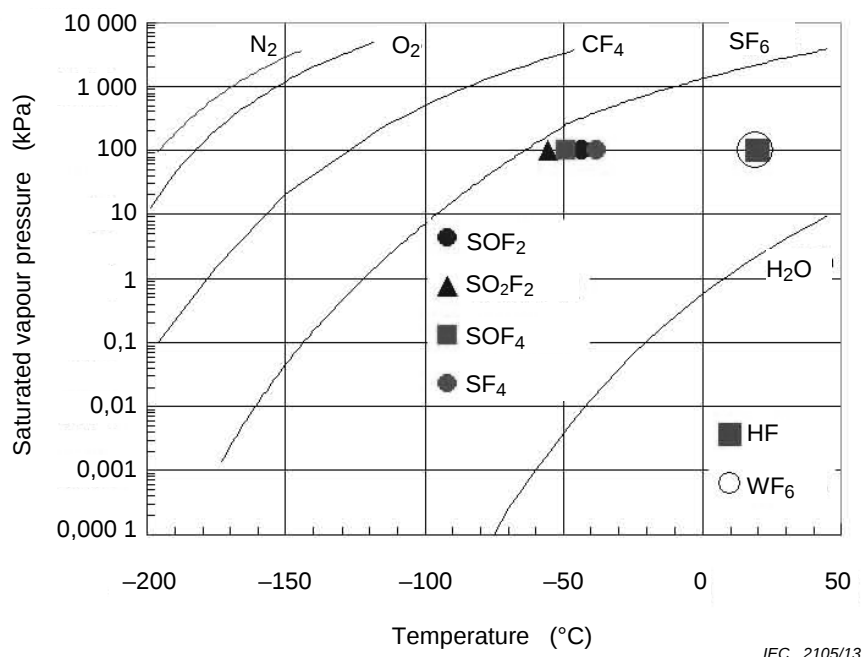


Figure I.1 – Saturated vapour pressure of various gases as a function of temperature

I.4 Cryogenic processes

SF₆ is recovered by means of evacuating and cooling a cylinder called capture cylinder. The pressure differential between the cylinder and the gas-filled compartment or the container containing the SF₆ to be processed causes the SF₆ to be transferred into the cylinder where it will liquefy or solidify due to the low temperatures achieved by liquid nitrogen thereby maintaining a pressure differential until recovery is completed.

The collection process is scalable. A number of cylinders can be connected in parallel to increase collection capacity. Smaller cylinders can be used if the masses of SF₆ involved are small. The speed of mass transfer is mainly limited by the diameter of the connecting pipes and with appropriate sized piping the practical limit given by the speed of sound can be attained.

This process can also be used to separate air from SF₆ as – provided SF₆ is cooled sufficiently – SF₆ will freeze inside the capture cylinder allowing the air to be released or evacuated by a conventional vacuum pump.

The process comprises a second step, where a second cylinder called collection cylinder is cooled by liquid nitrogen and connected to the capture cylinder which is allowed to warm up. The pressure differential between the cylinders causes SF₆ to be transferred into the collection cylinder while the contaminants remain frozen in the capture cylinder. During the SF₆ transfer, the capture cylinder warms up from approx. –150 °C to approx. –45 °C and the pressure in the capture cylinder can be obtained by closing the valve controlling the SF₆ transfer and reading the pressure gauge on top of the capture cylinder. This pressure (see Figure I.1) is representative of the highest temperature portion of SF₆ in the capture cylinder, even though temperature gradients may be present.

The upper temperature limit in the capture cylinder (i.e. approx. –45 °C) is set to limit the concentration (dew point) of moisture transferred to the collection cylinder. This upper temperature limit must also be low enough to also prevent transfer of reactive gaseous by-products that may be present in the capture cylinder.

The capture cylinder may be partly immersed in a refrigerated bath to allow for a better temperature control.

I.5 Description of a cryogenic reclaimer [36]

A cryogenic reclaimer comprises the following components:

- gas cylinders (see D.2.6 in addition suitable for cryogenic temperatures);
- insulated dewars meeting local safety requirements and capable of withstanding $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- vacuum pump (see D.2.4);
- optional filter, used for reclaim heavily arced gas (see D.2.3);
- sampling point (see 4.2.3 and D.7);
- valves, fittings, pressure gauges and gas piping (see D.2.8, D.2.9, D.2.10, and D.3, in addition suitable for cryogenic temperatures where relevant);
- liquid nitrogen purchased as needed.

The components can be put together in different configurations according to the task at hand.

Figure I.2 is the flow chart of a cryogenic reclaimer suitable for SF_6 recovery on site.

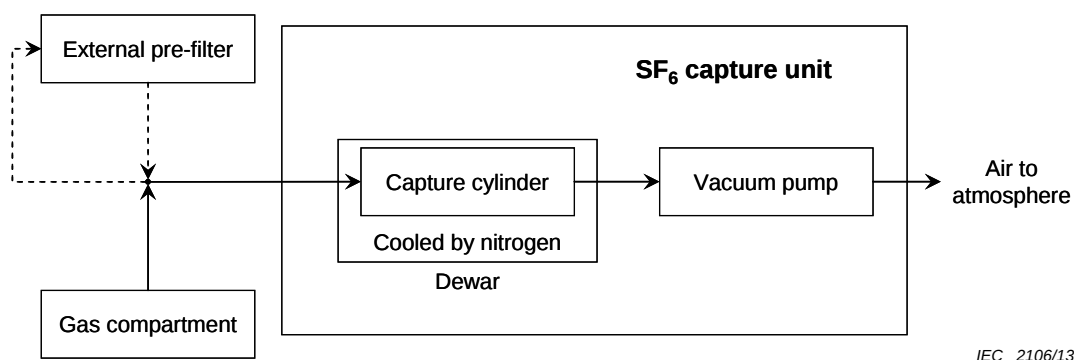


Figure I.2 – Typical cryogenic reclaimer for SF_6 recovery on site

The procedure for operation of the manual process is as follows:

- the whole reclaimer is evacuated with the vacuum pump;
- the capture cylinder is chilled with liquid nitrogen and the vacuum in the cylinder itself is maintained by the freezing of SF_6 which is continuously drawn in;
- the impure gas entering the process can be directed through a filter if it contains a significant amount of solid contaminants as in the case of heavily arced gas;
- once the gas capture capacity has been reached, the upstream valves are closed and the downstream valves opened;
- the vacuum pump can be used to evacuate and draw off all the gaseous components above the frozen SF_6 i.e. oxygen and nitrogen;
- the downstream valves are closed and the cylinder can be removed, warmed up and transported.

Figure I.3 is the flow chart of a cryogenic reclaimer suitable for removing contaminants.

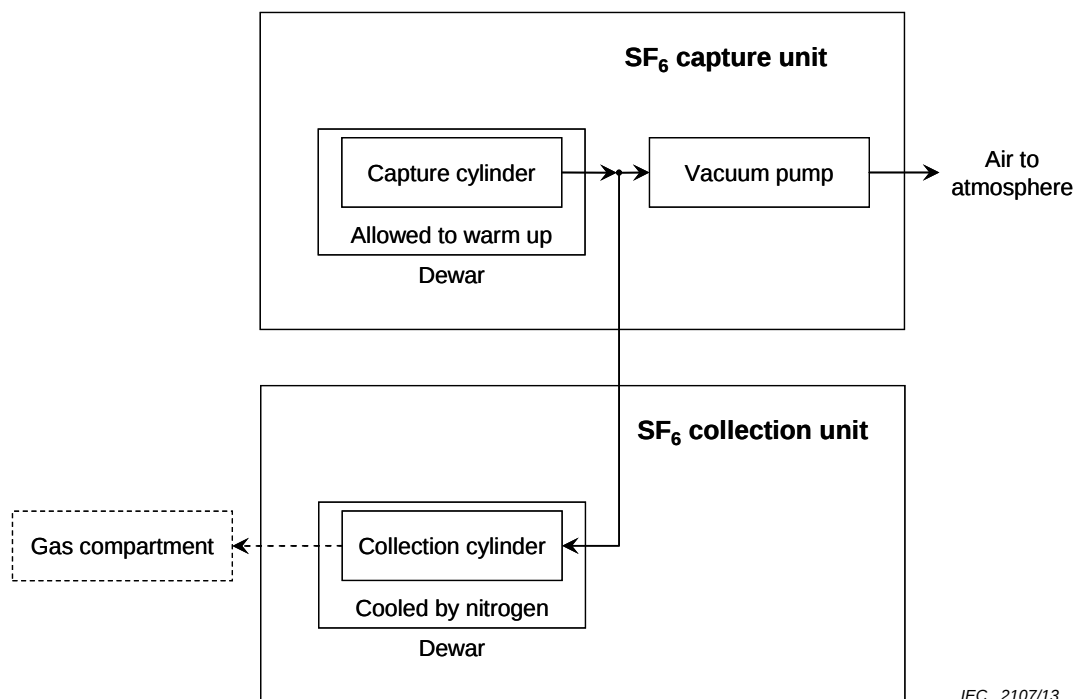


Figure I.3 – Typical cryogenic reclaimer for removing contaminants

The procedure for operation of the manual process is as follows:

- the capture cylinder and the collection cylinder are chilled with liquid nitrogen;
- the vacuum pump can be used to evacuate and draw off all the gaseous components above the frozen SF₆ i.e. oxygen and nitrogen;
- the capture cylinder is then allowed to warm up to the selected upper temperature limit (e.g. –45 °C);
- pure SF₆ is transferred into the collection cylinder as a consequence of the temperature difference.

The capture cylinder is likely to end up containing solid contaminants from heavily arced SF₆ and requires cleaning after use.

Annex J (normative)

Handling of SF₆ mixtures

J.1 General

SF₆ mixtures are used in electric power equipment mainly for cold ambient applications, typically under –40 °C. Other applications at normal ambient temperature include gas insulated transmission lines and gas insulated transformers. SF₆ is mixed with a complementary gas, typically N₂ or CF₄, in the percentage as specified by the Original Equipment Manufacturer in the operating instruction manual, typically from 10 % to 75 % volume.

The scope of this annex is to address the particularities for handling SF₆ mixtures during installation, commissioning, service life and disposal at the end-of-life of electric power equipment.

J.2 Filling gas compartments with SF₆ mixtures

Clause 3.2 of the present International Standard applies with the exception of step 7 in Table 1 which is replaced by:

- Connect the SF₆ container and fill the gas compartment until the rated SF₆ partial filling pressure/density is reached. Use a safety valve and a calibrated gauge to avoid overfilling [NOTES 1 and 2].
- Top-up the gas compartment to the rated filling pressure/density (see 3.3) with the complementary gas [NOTE 3].

NOTE 1 Unless otherwise specified by the Original Equipment Manufacturer in the Operating Instruction Manual, the vacuum duration can be prolonged in order to better remove moisture when for example the ambient temperature is freezing.

NOTE 2 SF₆ to be introduced into the gas compartment can be either technical grade SF₆ or used SF₆ suitable for reuse on site.

NOTE 3 Specifications for the complementary gas are given by the Original Equipment Manufacturer in the operating instruction manual.

Alternatively, gas mixing devices (see D.8) or premixed gases may be used to speed-up the process and reduce the probability of accidental mistakes.

NOTE 4 Premixed gases can be obtained from gas suppliers.

J.3 Re-filling gas compartments with SF₆ mixtures to the rated filling pressure/density

Clause 4.1 of the present International Standard applies with the exception of step 3 in

Table 3 which is replaced by:

- Evaluate the intermediate pressure/density p_i as

$$p_i = x \times p_{rm} + (1 - y) \times p_a \quad (\text{J.1})$$

where

- x is the nominal SF₆ percentage of the SF₆ mixture;
- p_{rm} is the rated filling pressure of the SF₆ mixture;
- y is the actual or measured SF₆ percentage of the SF₆ mixture in the gas-filled compartment (see 4.2.2);
- p_a is the actual or measured pressure of the SF₆ mixture in the gas-filled compartment [NOTE 1];
- Connect the SF₆ container and fill the compartment until the intermediate pressure/density p_i is reached. Use a safety valve and a calibrated gauge to avoid overfilling [NOTE 2].
- Top-up the compartment to the rated filling pressure/density p_{rm} (see 3.3) with the complementary gas [NOTE 4].

NOTE 1 To reduce the probability of mistakes, p_i is evaluated at the reference temperature of 20 °C. If required, the pressure is then reported at a different ambient temperature. p_a is the pressure measured at the ambient temperature reported at the reference temperature of 20 °C.

NOTE 2 SF₆ to be introduced into the gas compartment can be either technical grade SF₆ or used SF₆ suitable for reuse on site.

NOTE 3 Specifications for the complementary gas are given by the Original Equipment Manufacturer in the Operating Instruction Manual.

Alternatively, gas mixing devices (see D.8) or premixed gases may be used to speed-up the process and reduce the probability of accidental mistakes.

NOTE 4 Premixed gases can be obtained from gas suppliers.

J.4 Rectifying the composition of SF₆ mixtures

This subclause applies to compartments of pressure systems containing SF₆ mixed with a complementary gas in a percentage not complying with the specifications given by the Original Equipment Manufacturer in the Operating Instruction Manual.

Unless otherwise specified by the Original Equipment Manufacturer in the operating instruction manual, the following steps for rectifying the composition of the SF₆ mixture applies:

- Evaluate the recovery pressure/density p_{rec} as

$$\text{for } y < x \quad p_{rec} = P_r \times \frac{1 - x}{1 - y} \quad (\text{J.2})$$

$$\text{for } y > x \quad p_{rec} = P_r \times \frac{x}{y} \quad (\text{J.3})$$

where:

- p_{rm} is the rated filling pressure of the SF₆ mixture;
- x is the nominal SF₆ percentage of the SF₆ mixture;
- y is the actual or measured SF₆ percentage of the SF₆ mixture in the gas-filled compartment (see 4.2.2);
- recover the SF₆ mixture in the gas-filled compartment to the recovery pressure/density p_{rec} ;

- re-fill the gas compartment to the rated filling pressure/density (see J.3).

NOTE To reduce the probability of mistakes, p_{rec} is evaluated at the reference temperature of 20 °C. If required, the pressure is then reported at a different ambient temperature.

J.5 Checking the quality of SF₆ mixtures

J.5.1 General

Subclause 4.2 of the present International Standard applies.

NOTE When SF₆ is partially liquefied, the actual or measured SF₆ percentage can differ from the nominal SF₆ percentage of the SF₆ mixture. Clause J.7 covers the storage of SF₆ mixtures to avoid liquefaction.

J.5.2 Variation of the composition of SF₆ mixtures over time

The composition of an SF₆ mixture in a gas-filled compartment varies slightly over time due to the combination of the following causes:

- different leakage rates of SF₆ and the complementary gas;
- different decomposition rates of SF₆ and the complementary gas by arc;
- different quantities of SF₆ and the complementary gas trapped in the cavities of the adsorbers;
- many gas handling operations performed on the same gas-filled compartment.

J.5.3 Tolerance on the composition of SF₆ mixtures

The tolerance on the composition of an SF₆ mixture should be specified by the Original Equipment Manufacturer in the Operating Instruction Manual taking into account the possible use of “used SF₆ suitable for reuse on site” (see 2.15) and the incertitude associated to measurement devices (see D.4), typical gas handling and cold service conditions.

NOTE The incertitude regarding the SF₆ percentage associated to typical on-site gas handling is considered to be 6 %. In laboratory conditions, during type testing of switchgear, the incertitude regarding the SF₆ percentage is considered to be 1%.

J.6 Recovery and reclaim of SF₆ mixtures

Clause 5 of the present International Standard applies. See J.7 for storage.

J.7 Storage and transportation of SF₆ mixtures

J.7.1 General

Containers containing SF₆ mixtures shall be tagged with an identification label containing the SF₆ percentage and the complementary gas.

For storage and transportation of SF₆ mixtures Annex A of the present International Standard applies. In case of temporary storage (e.g. during maintenance, repair) the volume of the container should be large enough to assure that the SF₆ partial pressure remains below the SF₆ vapour pressure at the minimum storage temperature to avoid SF₆ liquefaction.

NOTE Heating elements can be applied to storage containers to increase the effective storage temperature and consequently pressure. The volume of the storage container is therefore substantially reduced.

J.7.2 Maximum storage pressure to avoid liquefaction

The maximum storage pressure for an SF₆ mixture p_m can be calculated according to the following equation

$$p_m = \frac{p_l}{x} \quad (\text{J.4})$$

where:

- p_l is the SF_6 vapour pressure at the minimum storage temperature (see Figure J.1);
- x is the nominal SF_6 percentage of the SF_6 mixture.

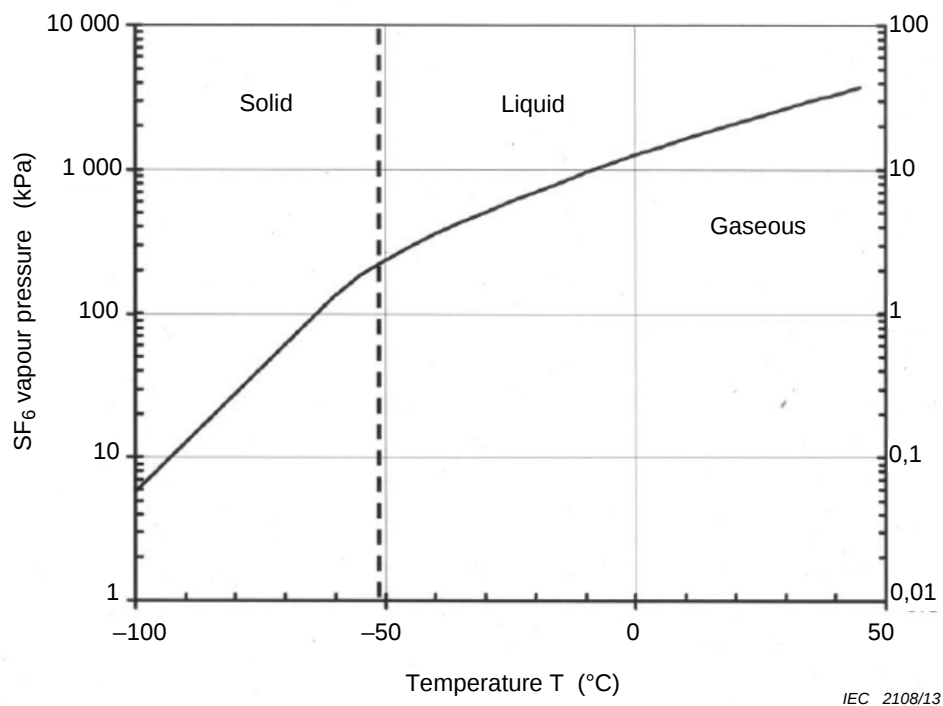


Figure J.1 – Vapour pressure of SF_6

J.7.3 Minimum storage volume to avoid liquefaction

The minimum storage volume for the SF_6 mixture v_m can be calculated according to the following equation

$$v_m = \frac{m_{\text{SF6}}}{\rho_l} \quad (\text{J.5})$$

where:

- m_{SF6} is the SF_6 quantity to be stored;
- ρ_l is the maximum SF_6 density to avoid SF_6 liquefaction at the minimum storage temperature (see Figure J.2).

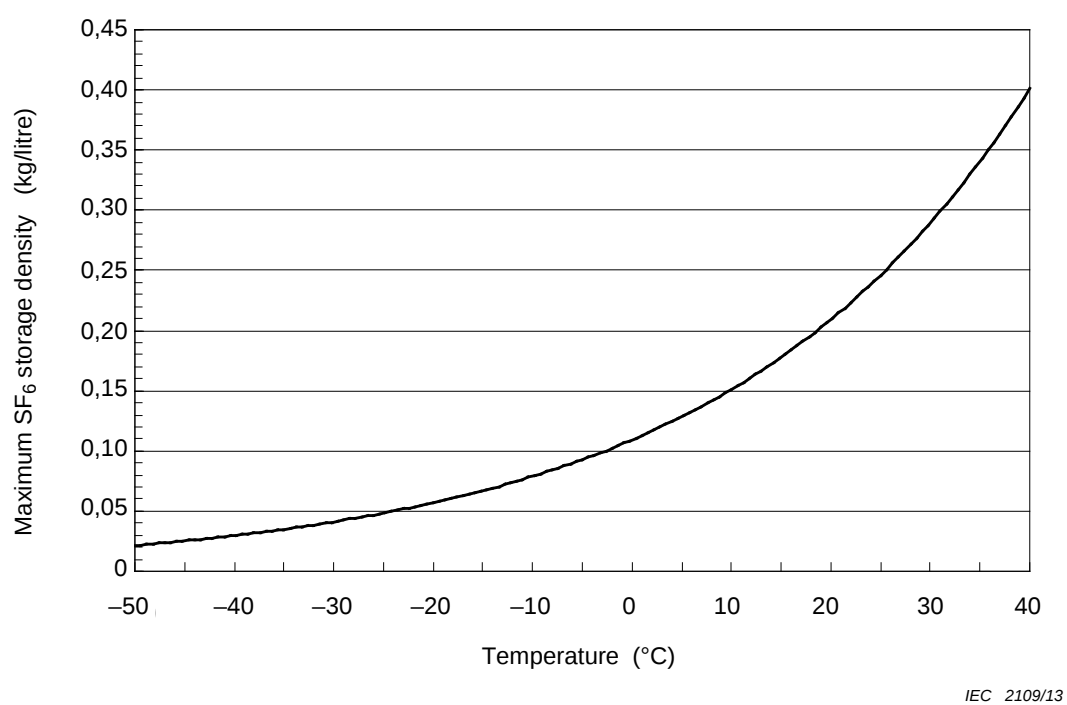


Figure J.2 – Maximum SF₆ storage density to avoid SF₆ liquefaction

Bibliography

- [1] IEC 62271-203:2011, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 203: Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV*
- [2] ISO 14040: 2006, *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*
- [3] EN 136, *Respiratory protective devices – Full face masks – Requirements, testing, marking*
- [4] EN 140, *Respiratory protective devices – Half masks and quarter masks – Requirements, testing, marking*
- [5] EN 141, *Respiratory protective devices – Gas filters and combined filters – Requirements, testing, marking*
- [6] EN 143, *Respiratory protective devices – Particle filters – Requirements, testing, marking*
- [7] EN 166, *Personal eye protection – Specifications*
- [8] CIGRE WG B3.02 TF SF₆, *Guide for the preparation of customised “Practical SF₆ handling instructions”*, CIGRE brochure N. 276, 2005
- [9] KEMA, *SF₆ Safety Regulations*, internal document for use in laboratories, 1982
- [10] The Electricity Association, *Engineering Recommendation G69*, UK, 1988
- [11] Standards Association of Australia, *Recommendations for the handling of contaminated SF₆ gas and associated arc by-products in or from electrical equipment*, AS-2791, 1989
- [12] G. Mauthe, K. Pettersson, et al., *Handling of SF₆ 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.
- [13] KEMA, *Het gebruik van middenspanning installaties met SF₆ als isolatie en/of blusmedium*, report No. 00067-DZO 87-1002, 17 February 1987 (in English).
- [14] J.A.J. Pettinga, *Gaslekzoekapparatuur toegepast voor het meten van SF₆ concentraties in lucht*. Electrotechniek 68, 1990.
- [15] J.A.J. Pettinga, *Studie naar de mogelijkheid van ruimtebewaking in onderstations waarin SF₆ schakel-materiaal is opgesteld*, n.v. KEMA report, 1986.
- [16] *Sulphur Hexafluoride brochure* (Solvay Fluor, 2006).
- [17] R. J. Lewis Sr., *Sax’s Dangerous Properties of Industrial Materials*, 11th edition, John Wiley and Sons Inc., Hoboken NJ, United States, 2004
- [18] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), *Fourth Assessment Report: Climate Change* 2007, http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml, 2007.
- [19] 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.
- [20] 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).

- [21] S. Wartmann and J. Harnisch, *Reductions of SF₆ emissions from high and medium voltage electrical equipment in Europe*, Ecofys GmbH, Nurnberg, Germany, 2005.
- [22] K. Yokotsu, Y. Ichikawa et al., *Recent practice for huge reduction of SF₆ gas emission from GIS & GCB in Japan*, CIGRE SC A3 & B3 Joint Colloquium and Tutorial in Japan, 26th – 28th Sep 2005, Tokyo, Japan, 2005.
- [23] United States Environmental Protection Agency (EPA), *Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020*, Washington DC, United States, 2006.
- [24] United States Environmental Protection Agency (EPA), *Global Mitigation of Non-CO₂ Greenhouse Gases*, Washington DC, United States, 2006.
- [25] CIGRE WG B3-02, *Template for Voluntary agreement on the use of SF₆ and on measures for SF₆ emission reduction in the national, regional electric industry*, 2003
- [26] CRADA, *Cooperative Research and Development Agreement, Investigation of S₂F₁₀ production and mitigation in compressed SF₆ insulated power system*, Technical Note No. 1, 22, December 1992.
- [27] F.Y. Chu, *SF₆ Decomposition in gas insulated equipment*, IEEE Trans, on Elec. Insul., EL-21, No. 5, October 1986.
- [28] R.J. Van Brunt, J.K. Olthoff, et al., *Production of S₂F₁₀ by electrical discharge in SF₆*, I.H.S. 1992, Swansea, U.K., Vol. 1, p. 418, 1992.
- [29] H.D. Morrison, V.P. Cronin, et al. *Production and decay of S₂F₁₀ in a disconnect switch*, 7th Int. Sym. Gaseous Dielectrics, Knoxville, TE, USA, 1994.
- [30] L. Niemeyer, *S₂F₁₀ in SF₆ insulated equipment*, 7th Intern. Sympos. on Gaseous Dielectrics, Knoxville TE, USA, 1994.
- [31] B. Belmadani, et al., *SF₆ decomposition under power arcs, physical aspects*, IEEE Trans. on Elec. Ins., Vol. 26, No. 6, 1991.
- [32] 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.
- [33] *Documentation of the threshold limit values and biological exposure indices*, 5th ed. Cincinnati, OH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Inc., 1986, 5: 272, 1986.
- [34] *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.
- [35] A. Stokes, C. Jones, et al., *New techniques for recapturing and recycling SF₆ gas and topping up energized equipment*, CIGRE SC A3 and B4 Joint Colloquium, Tokyo, Japan, 2005
- [36] *The patent family* (WO 2005/119149 A1 and applications derived therefrom). International Publication Number WO2005119149 A1, Gas Recovery of Sulphur Hexafluoride, World Intellectual Property Organization, International Publication Date: 15.12.2005
- [37] M. Blundell, C. Jones, et al., *Experience with using cryogenic techniques for recycling arced SF₆ gas for use in switchgear*, Australian Journal of Electrical & Electronics Eng., Vol. 3, No. 3, p 249, 2007.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	81
INTRODUCTION	83
1 Généralités	84
1.1 Domaine d'application	84
1.2 Références normatives	84
2 Termes et définitions	85
3 Manipulation du SF ₆ au cours de l'installation et de la mise en service	88
3.1 Généralités	88
3.2 Évacuation, remplissage et vérification de la qualité du SF ₆ après remplissage	88
3.3 Remplissage des compartiments pré-remplis de SF ₆ à la pression/densité de remplissage assignée	89
3.4 Remplissage des systèmes à pression scellés	91
4 Manipulation du SF ₆ pendant la durée de vie normale	91
4.1 Complément de remplissage à la pression/densité de remplissage assignée de SF ₆	91
4.2 Vérification de la qualité du SF ₆	92
4.2.1 Généralités	92
4.2.2 Mesure de la qualité du SF ₆ au moyen d'appareils portables	92
4.2.3 Échantillonnage et transport du SF ₆ pour une analyse hors site	93
5 Récupération et régénération du SF ₆ au cours des opérations de maintenance	94
5.1 Généralités	94
5.2 Récupération et régénération de SF ₆ contenu dans tout compartiment de systèmes à pression autonome ou entretenue contenant du SF ₆ très faiblement décomposé ou faiblement décomposé	94
5.3 Récupération et régénération de SF ₆ contenu dans tout compartiment de systèmes à pression autonome ou entretenue contenant du SF ₆ fortement décomposé	96
6 Démontage de l'appareillage électrique contenant du SF ₆ en fin de vie	98
6.1 Généralités	98
6.2 Fin du cycle de vie des systèmes à pression autonome ou entretenue	99
6.3 Fin du cycle de vie des systèmes à pression scellés	99
6.4 Récupération et régénération du SF ₆ en fin de vie des systèmes à pression scellés	100
6.5 Démontage de l'appareillage électrique en fin de vie	102
6.6 Produits de décomposition en fin de vie	103
Annexe A (informative) Stockage et transport du SF ₆	105
Annexe B (informative) Sécurité et premiers soins	109
Annexe C (informative) Formation et certification	116
Annexe D (informative) Description des appareils de manipulation du SF ₆	121
Annexe E (informative) Hexafluorure de soufre	129
Annexe F (informative) Effets du SF ₆ sur l'environnement	133
Annexe G (informative) Produits de décomposition du SF ₆	136
Annexe H (informative) Procédure d'évaluation des effets potentiels sur la santé des produits de décomposition du SF ₆	140
Annexe I (informative) Régénération cryogénique du SF ₆	147
Annexe J (normative) Manipulation de mélanges contenant du SF ₆	151

Bibliographie.....	156
Figure 1 – Evacuation, remplissage et vérification de la qualité du SF ₆ après remplissage	88
Figure 2 – Remplissage des compartiments pré-remplis de SF ₆ à la pression/densité de remplissage assignée	90
Figure 3 – Complément de remplissage à la pression/densité de remplissage assignée de SF ₆	91
Figure 4 – Vérification de la qualité du SF ₆ sur site	93
Figure 5 – Echantillonnage et transport du SF ₆	94
Figure 6 – Exemple de récupération et régénération de SF ₆ contenu dans tout compartiment de systèmes à pression autonome ou entretenue contenant du SF ₆ très faiblement décomposé ou faiblement décomposé	95
Figure 7 – Exemple de récupération et régénération du SF ₆ contenu dans tout compartiment de systèmes à pression autonome ou entretenue contenant du SF ₆ fortement décomposé	97
Figure 8 – Fin du cycle de vie des systèmes à pression autonome ou entretenue	99
Figure 9 – Fin du cycle de vie des systèmes à pression scellés	100
Figure 10 – Récupération et régénération du SF ₆ en fin de vie des systèmes à pression scellés	101
Figure 11 – Démontage d'un appareillage électrique.....	103
Figure D.1 – Appareil de récupération polyvalent.....	121
Figure D.2 – Dispositif de mélange de gaz.....	128
Figure E.1 – Caractéristiques de pression/température/densité du SF ₆ [16].....	130
Figure H.1 – Procédure d'évaluation des effets potentiels sur la santé dus à un arc.....	144
Figure H.2 – Procédure d'évaluation des effets potentiels sur la santé dus à des décharges de faible énergie.....	145
Figure I.1 – Pression de vapeur saturante de divers gaz en fonction de la température	148
Figure I.2 – Appareil de récupération cryogénique type pour récupération sur le site du SF ₆	149
Figure I.3 – Appareil de récupération cryogénique type pour éliminer les contaminants	150
Figure J.1 – Pression de vapeur de SF ₆	154
Figure J.2 – Densité maximale de SF ₆ de manière à éviter la liquéfaction du SF ₆	155
Tableau 1 – Evacuation, remplissage et vérification de la qualité du SF ₆ après remplissage	89
Tableau 2 – Remplissage des compartiments pré-remplis de SF ₆ à la pression/densité de remplissage assignée	90
Tableau 3 – Complément de remplissage à la pression/densité de remplissage assignée de SF ₆	92
Tableau 4 – Vérification de la qualité du SF ₆ sur site.....	93
Tableau 5 – Echantillonnage et transport du SF ₆	94
Tableau 6 – Exemple de récupération et régénération de SF ₆ contenu dans tout compartiment de systèmes à pression autonome ou entretenue contenant du SF ₆ très faiblement décomposé ou faiblement décomposé	96
Tableau 7 – Exemple de récupération et régénération du SF ₆ contenu dans tout compartiment de systèmes à pression autonome ou entretenue contenant du SF ₆ fortement décomposé	98

Tableau 8 – Récupération du SF ₆ en fin de vie des systèmes à pression scellés	102
Tableau 9 – Caractéristiques du SF ₆ et quantité de produits de décomposition attendues	104
Tableau A.1 – Méthodes de stockage du SF ₆	106
Tableau A.2 – Types de récipients et étiquetage exigé pour le stockage et le transport du SF ₆	106
Tableau A.3 – Règlements internationaux applicables au transport du SF ₆	108
Tableau B.1 – Mesures à appliquer pour toute tâche exécutée sur un appareillage électrique contenant du SF ₆	109
Tableau B.2 – Mesures de sécurité lors de l'ouverture ou de l'accès dans les compartiments de gaz	111
Tableau B.3 – Solutions neutralisantes	112
Tableau B.4 – Mesures de sécurité supplémentaires	114
Tableau D.1 – Modèles de filtres types utilisés lors de la régénération du SF ₆	122
Tableau D.2 – Dispositifs de mesure de gaz	125
Tableau E.1 – Principales caractéristiques chimiques du SF ₆ [16]	129
Tableau E.2 – Principales caractéristiques physiques du SF ₆ [16]	131
Tableau E.3 – Principales caractéristiques électriques du SF ₆ [16]	131
Tableau H.1 – OEL pour SO ₂ , HF et S ₂ F ₁₀	142
Tableau H.2 – Taux de production de SOF ₂	142

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

APPAREILLAGE À HAUTE TENSION –

**Partie 4: Utilisation et manipulation de l'hexafluorure de soufre (SF₆)
et des mélanges contenant du SF₆**

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de la CEI. La CEI n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de brevet. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 62271-4 a été établie par le sous-comité 17A: Appareillage à haute tension, du comité d'études 17 de la CEI: Appareillage.

Cette première édition annule et remplace la première édition de la CEI/TR 62271-303 parue en 2008.

Cette première édition constitue une révision technique. Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) remplacement de la description des effets potentiels sur la santé des produits de décomposition du SF₆ (anciennement Annexe D de la CEI/TR 62271-303:2008) par les méthodes de calcul pour évaluer les effets potentiels sur la santé des produits de décomposition du SF₆ (voir Annexe H);
- b) ajout d'informations concernant la régénération cryogénique du SF₆. (voir Annexe I);

- c) ajout de procédures de manipulation pour les mélanges contenant du SF₆ les plus courants (voir Annexe J).

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
17A/1044/FDIS	17A/1051/RVD

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

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

Une liste de toutes les parties de la série CEI 62271, publiées 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 stabilité indiquée sur le site web de la CEI sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

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

IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

INTRODUCTION

Comme convenu avec le CE 10, les annexes A, E, F, G, H et I seront retirées du présent document dès la publication des éditions révisées de la CEI 60376 et de la CEI 60480.

APPAREILLAGE À HAUTE TENSION –

Partie 4: Utilisation et manipulation de l'hexafluorure de soufre (SF₆) et des mélanges contenant du SF₆

1 Généralités

1.1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 62271 s'applique aux procédures de manipulation du SF₆ lors de l'installation, de la mise en service, du fonctionnement normal ou anormal, et de l'élimination en fin de vie de l'appareillage à haute tension.

Ces procédures sont considérées comme des exigences minimales pour garantir la sécurité du personnel travaillant avec du SF₆ (voir Annexe B) et pour minimiser l'émission de SF₆ vers l'environnement.

Cette norme s'applique également de façon générale aux mélanges de gaz contenant du SF₆. Les particularités de leur manipulation sont traitées en Annexe J.

NOTE 1 Dans l'ensemble de cette norme, l'utilisation du terme haute tension (référence CEI 60050-601:1985, 601-01-27) signifie une tension assignée supérieure à 1 000 V. Cependant, le terme moyenne tension (référence CEI 60050-601:1985, 601-01-28) est communément utilisé pour les réseaux de distribution avec des tensions supérieures à 1 kV et est généralement appliqué pour des tensions inférieures ou égales à 52 kV.

NOTE 2 Dans l'ensemble de cette norme, le terme «appareillage électrique» signifie «appareillage à haute tension et à moyenne tension».

NOTE 3 Dans l'ensemble de cette norme, le terme «pression» signifie «pression absolue».

1.2 Références normatives

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

CEI 60050-441, *Vocabulaire Électrotechnique International – Chapitre 441: Appareillage et fusibles*

CEI 60050-601, *Vocabulaire Électrotechnique International – Chapitre 601: Production, transport et distribution de l'énergie électrique – Généralités*

CEI 60376, *Spécifications de la qualité technique de l'hexafluorure de soufre (SF₆) pour utilisation dans les appareils électriques*

CEI 60480, *Lignes directrices relatives au contrôle et au traitement de l'hexafluorure de soufre (SF₆) prélevé sur le matériel électrique et spécification en vue de sa réutilisation*

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

EN 1089-3, *Bouteilles à gaz transportables. Identification de la bouteille à gaz (GPL exclu). Code couleur*

2 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans la CEI 60050-441 et dans la CEI 60050-601, ainsi que les suivants, s'appliquent.

2.1

rejet anormal de SF₆

rejet provenant du matériel en service, dû à une défaillance du système d'étanchéité ou à une erreur du processus de manipulation

Note 1 à l'article: Une fuite anormale de SF₆ est habituellement une émission non désirée et continue de gaz à un débit supérieur au débit de fuite du matériel par conception. Dès qu'une fuite anormale de SF₆ est détectée, il convient de mettre en place des mesures appropriées pour la localiser et l'éliminer.

2.2

manipulation du SF₆

tout processus pouvant impliquer un transfert de SF₆

2.3

évacuation

transfert d'un autre gaz que du SF₆ (par exemple air ou N₂) pouvant être libéré dans l'atmosphère. Cette opération est exécutée en utilisant une pompe à vide

2.4

récupération de SF₆

transfert de SF₆ du compartiment sous gaz dans un appareil de récupération ou un récipient de stockage

Note 1 à l'article: Cette opération est normalement exécutée en utilisant un compresseur de récupération.

2.5

remplissage avec du SF₆

remplissage d'un compartiment pré-rempli avec du SF₆ à la pression de remplissage assignée

Note 1 à l'article: Les compartiments pré-remplis sont des systèmes à pression autonome remplis chez le fabricant avant transport. Ils contiennent du SF₆ à une pression type comprise entre 0,12 MPa et 0,15 MPa permettant une mise en service sur le site plus rapide et plus aisée.

2.6

complément de remplissage avec du SF₆

remplissage d'un compartiment avec du SF₆ à la pression de remplissage assignée pour assurer la continuité du service

2.7

régénération du SF₆

série de manipulations de SF₆ incluant la récupération et un processus de raffinage minimal du SF₆, tels que le filtrage des poussières, des produits de décomposition, de l'humidité, de l'huile, etc.

Note 1 à l'article: Un appareil de récupération type est décrit à l'Annexe D; tandis qu'un appareil de récupération cryogénique est décrit à l'Annexe I.

Note 2 à l'article: Parfois les termes «retraitement» ou «régénération» peuvent être utilisés avec la même signification.

2.8

appareillage sous enveloppe métallique à isolation gazeuse

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

Note 1 à l'article: Ce terme s'applique généralement à un appareillage à haute tension.

[SOURCE: CEI 60050-441:1984, 441-12-05]

2.9

compartiment à remplissage de gaz

compartiment d'un appareillage 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 à l'article: Plusieurs compartiments à remplissage de gaz peuvent être connectés en permanence pour former un système de gaz commun (ensemble étanche au gaz).

Note 2 à l'article: La définition est identique à la CEI 62271-1.

2.10

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 à l'article: Les disjoncteurs à air comprimé ou les mécanismes de commande pneumatique sont des exemples de systèmes à pression entretenue.

Note 2 à l'article: Plusieurs compartiments à remplissage de gaz raccordés en permanence peuvent constituer un ensemble.

Note 3 à l'article: La définition est identique à la CEI 62271-1.

2.11

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 à l'article: Les disjoncteurs à simple pression de SF₆ sont des exemples de systèmes à pression autonome.

Note 2 à l'article: La définition est identique à la CEI 62271-1.

2.12

système à pression scellé

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

Note 1 à l'article: Les disjoncteurs à vide et certains disjoncteurs à SF₆ sont des exemples de systèmes à pression scellés.

Note 2 à l'article: Les systèmes à pression scellés sont entièrement montés et contrôlés en usine.

Note 3 à l'article: La définition est identique à la CEI 62271-1.

2.13

SF₆ de qualité technique

SF₆ ayant une très faible teneur en impuretés conformément à la CEI 60376

2.14

SF₆ usagé

gaz récupéré d'un appareillage électrique, initialement rempli de SF₆ conformément à la CEI 60376 ou à la CEI 60480

Note 1 à l'article: Si après remplissage, le gaz est récupéré pour une raison quelconque pendant la durée de vie de l'appareillage, par exemple pour une réparation, un entretien, une maintenance, celui ci sera transféré et est considéré comme du gaz usagé.

Note 2 à l'article: L'Annexe G fournit des informations sur les produits de décomposition du SF₆ usagé qui se présentent, sous forme gazeuse et solide.

2.15

SF₆ usagé pouvant être réutilisé sur site

SF₆ usagé présentant un niveau d'impureté maximal, conformément à la CEI 60480

Note 1 à l'article: Si nécessaire, il convient d'utiliser des unités de service comprenant des filtres et des matériaux adsorbants appropriés.

2.16

SF₆ usagé pouvant être réutilisé par le fabricant de gaz

SF₆ usagé dont le niveau d'impureté dépasse le niveau maximal acceptable défini dans la CEI 60480, adapté à une réutilisation par le fabricant de gaz

Note 1 à l'article: Si nécessaire, il convient d'utiliser des unités de service comprenant des filtres et des matériaux adsorbants appropriés.

2.17

SF₆ usagé non réutilisable

SF₆ usagé ne rentrant pas dans la catégorie définie en 2.15 ou 2.16

Note 1 à l'article: Le SF₆ usagé non réutilisable est éliminé selon les réglementations locales ou internationales portant sur la gestion des déchets.

2.18

SF₆ très faiblement décomposé

SF₆ usagé contenant environ moins de 1 ml/l (0,1 % en volume) de produits de décomposition gazeux

Note 1 à l'article: La présence de SF₆ très faiblement décomposé est généralement constatée dans tout compartiment après remplissage et préalablement à la mise sous tension ou après les essais de tenue diélectrique avant mise en service ou dans les compartiments dans lesquels il n'y a jamais eu d'arc.

2.19

SF₆ faiblement décomposé

SF₆ usagé contenant environ entre 1 ml/l (0,1 % en volume) et 10 ml/l (1 % en volume) de produits de décomposition gazeux

Note 1 à l'article: La présence de SF₆ faiblement décomposé est généralement constatée dans les disjoncteurs ou sectionneurs après des manoeuvres (charge ou panne).

Note 2 à l'article: Une petite quantité de produits de décomposition solides, principalement des fluorures métalliques et des oxyfluorures de tungstène, peut également être présente.

2.20

SF₆ fortement décomposé

SF₆ usagé contenant environ plus de 10 ml/l (1 % en volume) de produits de décomposition gazeux

Note 1 à l'article: La présence de SF₆ fortement décomposé est généralement constatée dans les compartiments sous gaz après l'apparition d'un arc interne ou dans les disjoncteurs ou sectionneurs après un défaut d'interruption ou dans les disjoncteurs après des interruptions satisfaisantes de plusieurs courts-circuits à une amplitude élevée en rapport aux caractéristiques assignées.

Note 2 à l'article: Une grande quantité de produits de décomposition solides, principalement des fluorures métalliques et des oxyfluorures de tungstène, est également attendue.

2.21

mélange contenant du SF₆

mélange gazeux formé par du SF₆ et un gaz complémentaire, généralement N₂ ou CF₄.

3 Manipulation du SF₆ au cours de l'installation et de la mise en service

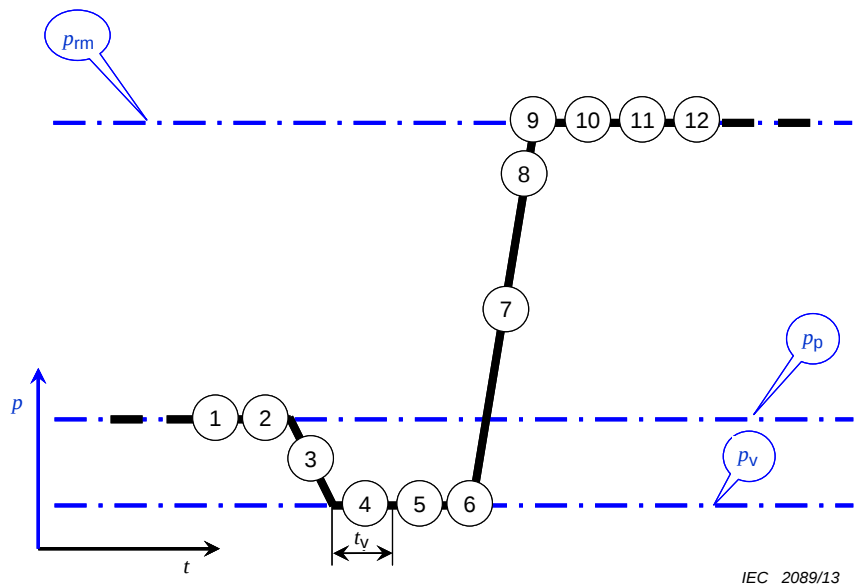
3.1 Généralités

Cet article fournit des directives pour toute tâche exécutée avec du SF₆, de qualité technique, conformément à la CEI 60376 ou avec du SF₆ usagé pouvant être réutilisé sur site, conformément à la CEI 60480, c'est-à-dire lorsqu'un compartiment de gaz est rempli, après installation de l'appareillage sur le site.

3.2 Évacuation, remplissage et vérification de la qualité du SF₆ après remplissage

Ce paragraphe s'applique aux compartiments des appareillages des systèmes à pression qui contiennent un gaz différent du SF₆ (généralement air ou N₂) à pression ambiante ou à une légère surpression (généralement 0,1 MPa à 0,15 MPa).

La séquence d'opérations nécessaire à l'évacuation de l'air/N₂ et au remplissage de SF₆ dans chaque compartiment doit être exécutée conformément à la Figure 1 et au Tableau 1, sauf spécification contraire dans la procédure de manipulation détaillée par le fabricant du matériel d'origine dans le manuel d'instructions d'exploitation.



1	Préparation des appareils de manipulation du SF ₆	9	Inspection du capteur de pression/densité
2	Installation des adsorbants	10	Inspection de l'étanchéité
3	Évacuation	11	Vérification de la qualité du SF ₆
4	Phase de stabilisation du vide	12	Documentation
5	Phase de maintien du vide (étape facultative)	p_{rm}	Pression assignée de remplissage du SF ₆
6	Documentation	p_p	Pression initiale dans le compartiment de gaz
7	Remplissage de SF ₆	p_v	Pression d'évacuation < 2 kPa
8	Documentation	t_v	Temps de stabilisation du vide ≥ 30 min

Figure 1 – Evacuation, remplissage et vérification de la qualité du SF₆ après remplissage

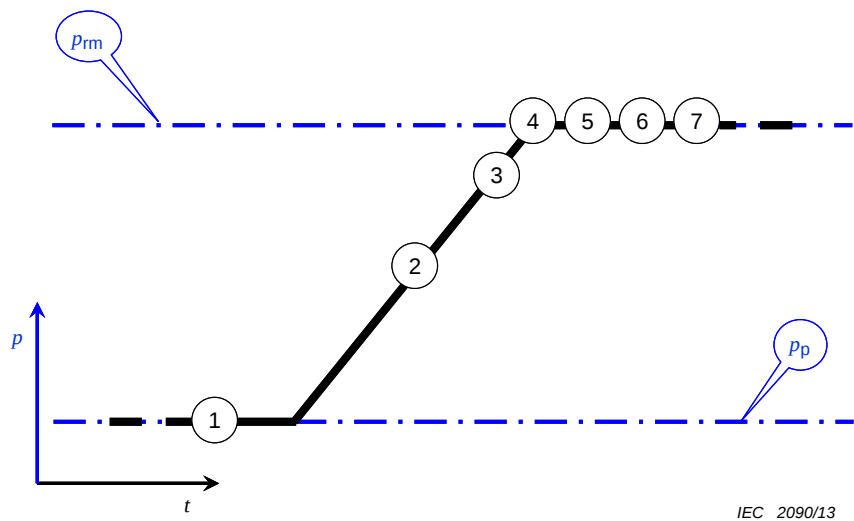
Tableau 1 – Évacuation, remplissage et vérification de la qualité du SF₆ après remplissage

Étape		Procédure
1	Préparation des appareils de manipulation du SF ₆	Vérifier que les appareils de manipulation du SF ₆ fonctionnent correctement et que les connexions de gaz sont propres et sèches de manière à éviter toute contamination. Vérifier la validité de l'étalonnage des instruments soumis à étalonnage.
2	Installation des adsorbants	Insérer rapidement les matériaux adsorbants dans le compartiment. Commencer l'évacuation immédiatement après l'opération précédente.
3	Évacuation	Connecter la pompe à vide et la laisser fonctionner jusqu'à atteindre 2 kPa.
4	Phase de stabilisation du vide	Laisser fonctionner la pompe à vide pendant au moins 30 min et ensuite la déconnecter en fermant le robinet. Lire le manomètre. ^a
5	Phase de maintien du vide (étape facultative)	Il convient que la pression dans le compartiment reste inférieure à 2 kPa pendant la durée pouvant être exigée par le fabricant du matériel d'origine dans le manuel d'instructions d'exploitation.
6	Documentation	Consigner au moins le nom du fabricant, la référence du type du matériel, le numéro de série et la référence du compartiment pour identifier le compartiment de gaz, la pression d'évacuation (c'est-à-dire, la teneur résiduelle en air), la température ambiante et la date pour référence ultérieure.
7	Remplissage de SF ₆	Connecter le récipient de SF ₆ et remplir le compartiment jusqu'à ce que la pression de remplissage assignée de SF ₆ soit atteinte. Utiliser une soupape de sûreté, un régulateur pour permettre une bonne régulation du processus de remplissage et un manomètre étalonné de manière à éviter un remplissage excessif. ^{b c}
8	Documentation	Consigner au moins le nom du fabricant et le numéro de série pour identifier le compartiment de gaz, la pression de remplissage finale, la température ambiante et la date pour référence ultérieure.
9	Inspection du capteur de pression/densité	Vérifier le fonctionnement du capteur de pression/densité. L'opération peut être exécutée pendant l'opération de remplissage et elle ne doit pas être considérée comme un étalonnage.
10	Inspection de l'étanchéité	Vérifier l'étanchéité d'au moins toutes les connexions permanentes effectuées sur le site comme demandé par le fabricant du matériel d'origine dans le manuel d'instructions d'exploitation.
11	Vérification de la qualité du SF ₆	Attendre le temps spécifié par le fabricant du matériel d'origine dans le manuel d'instructions d'exploitation avant de mesurer la teneur en humidité et le pourcentage de SF ₆ . ^d
12	Documentation	Consigner au moins le nom du fabricant et le numéro de série pour identifier le compartiment de gaz, le fonctionnement du capteur de pression/densité, la teneur en humidité, la teneur en SF ₆ , la température ambiante et la date pour référence ultérieure.
^a La durée du vide peut être prolongée pour obtenir une meilleure élimination de l'humidité, par exemple lorsque la température ambiante est au gel, sauf spécification contraire du fabricant du matériel d'origine dans le manuel d'instructions d'exploitation. ^b Le SF₆ devant être introduit dans le compartiment de gaz peut être, soit du SF₆ de qualité technique, soit du SF₆ usagé pouvant être réutilisé sur site. ^c Aucune vérification du SF₆ n'est requise si le gaz provient du fournisseur dans des récipients scellés ou si le gaz a été stocké dans des récipients étanches avec une étiquette ou un certificat approprié pour garantir que le gaz est réutilisable. Dans tous les autres cas, la qualité du SF₆ peut être vérifiée avant l'opération de remplissage (voir 4.2). ^d Si le compartiment de gaz est de faible volume, une nouvelle opération de remplissage après vérification de la qualité du SF₆ peut être requise.		

3.3 Remplissage des compartiments pré-remplis de SF₆ à la pression/densité de remplissage assignée

Ce paragraphe s'applique aux compartiments des appareillages des systèmes à pression pré-remplis chez le fabricant avant transport. Ils contiennent du SF₆ à une pression supérieure à la pression atmosphérique (généralement de 0,12 MPa à 0,15 MPa) permettant une mise en service sur le site plus rapide et plus aisée.

La séquence d'opérations nécessaire au remplissage du SF₆ dans chaque compartiment pré-rempli doit être exécutée conformément à la Figure 2 et au Tableau 2, sauf spécification contraire dans la procédure de manipulation détaillée par le fabricant du matériel d'origine dans le manuel d'instructions d'exploitation.



- | | | | |
|---|--|----------|--|
| 1 | Préparation appareils de manipulation du SF ₆ | 6 | Vérification de la qualité du SF ₆ |
| 2 | Remplissage de SF ₆ | 7 | Documentation |
| 3 | Documentation | p_{rm} | Pression assignée de remplissage du SF ₆ |
| 4 | Inspection du capteur de pression/densité | p_p | Pression initiale de SF ₆ dans le compartiment à remplissage de gaz |
| 5 | Inspection de l'étanchéité | | |

Figure 2 – Remplissage des compartiments pré-remplis de SF₆ à la pression/densité de remplissage assignée

Tableau 2 – Remplissage des compartiments pré-remplis de SF₆ à la pression/densité de remplissage assignée

Étape		Procédure
1	Préparation des appareils de manipulation du SF ₆	Vérifier que les connexions de gaz sont propres et sèches, que les tuyaux sont vidés et qu'il n'y a aucun rejet sur les connexions de liaison de manière à éviter toute contamination. Vérifier la validité de l'étalonnage des instruments soumis à étalonnage.
2	Remplissage de SF ₆	Connecter le récipient de SF ₆ et remplir le compartiment jusqu'à ce que la pression de remplissage assignée de SF ₆ soit atteinte. Utiliser une soupape de sûreté, un régulateur pour permettre une bonne régulation du processus de remplissage et un manomètre étalonné de manière à éviter un remplissage excessif. ^{a b}
3	Documentation	Consigner au moins le nom du fabricant, la référence du matériel, le numéro de série et la référence du compartiment pour identifier le compartiment de gaz, la pression de remplissage finale, la température ambiante et la date pour référence ultérieure.
4	Inspection du capteur de pression/densité	Vérifier le fonctionnement du capteur de pression/densité. L'opération peut être exécutée pendant l'opération de remplissage et elle ne doit pas être considérée comme un étalonnage.
5	Inspection de l'étanchéité	Vérifier l'étanchéité d'au moins toutes les connexions permanentes effectuées sur le site comme demandé par le fabricant du matériel d'origine dans le manuel d'instructions d'exploitation.
6	Vérification de la qualité du SF ₆	Attendre le temps spécifié par le fabricant du matériel d'origine dans le manuel d'instructions d'exploitation avant de mesurer la teneur en humidité et le pourcentage de SF ₆ . ^c
7	Documentation	Consigner au moins le nom du fabricant et le numéro de série pour identifier le compartiment de gaz, le fonctionnement du capteur de pression/densité, la teneur en humidité et la teneur en SF ₆ , la température ambiante et la date pour référence ultérieure.

- a Le SF₆ devant être introduit dans le compartiment de gaz peut être, soit du SF₆ de qualité technique, soit du SF₆ usagé pouvant être réutilisé sur site.
- b Aucune vérification du SF₆ n'est requise si le gaz provient du fournisseur dans des récipients scellés ou si le gaz a été stocké dans des récipients étanches avec une étiquette ou un certificat approprié pour garantir que le gaz est réutilisable. Dans tous les autres cas, la qualité du SF₆ peut être vérifiée avant l'opération de remplissage (voir 4.2).
- c Si le compartiment de gaz est de faible volume, une nouvelle opération de remplissage après vérification de la qualité du SF₆ peut être requise.

3.4 Remplissage des systèmes à pression scellés

La grande majorité des appareillages à moyenne tension utilise des systèmes à pression scellés, comme défini en 2.12. Ce type de matériel est généralement rempli de SF₆ chez le fabricant et aucune autre manipulation du SF₆ n'est requise pendant sa durée de vie attendue.

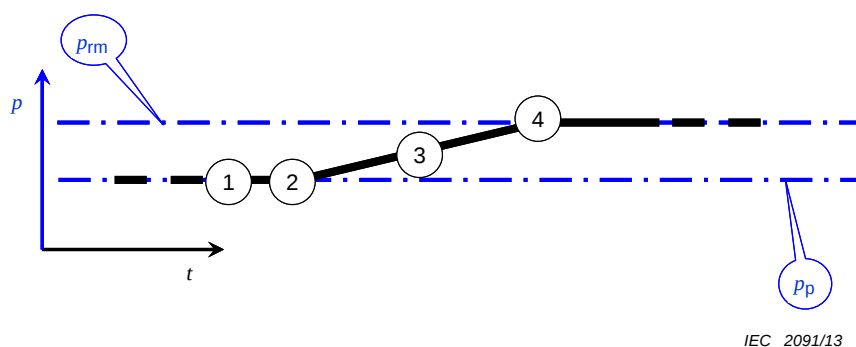
Dans certaines circonstances anormales (par exemple, en cas de détérioration) un nouveau remplissage ou une nouvelle mise en service de l'appareillage peut s'avérer nécessaire sur site. À cet effet, il convient de contacter le fabricant du matériel d'origine.

4 Manipulation du SF₆ pendant la durée de vie normale

4.1 Complément de remplissage à la pression/densité de remplissage assignée de SF₆

Ce paragraphe s'applique aux compartiments (indiqués habituellement par une première alarme/indication du capteur de pression/densité) des systèmes à pression autonome pour assurer la continuité du service. En cas de fuite anormale, des mesures correctrices appropriées visant à localiser et à éliminer la fuite doivent être immédiatement mises en œuvre.

La séquence d'opérations nécessaires à un nouveau remplissage du SF₆ dans chaque compartiment pré-rempli doit être exécutée conformément à la Figure 3 et au Tableau 3, sauf spécification contraire dans la procédure de manipulation détaillée par le fabricant du matériel d'origine dans le manuel d'instructions d'exploitation.



IEC 2091/13

- | | | | |
|---|--|----------|--|
| 1 | Identification de la nature de la fuite | 4 | Documentation |
| 2 | Préparation des appareils de manipulation du SF ₆ | p_{rm} | Pression assignée de remplissage du SF ₆ |
| 3 | Nouveau remplissage de SF ₆ | p_p | Pression initiale de SF ₆ dans le compartiment à remplissage de gaz |

Figure 3 – Complément de remplissage à la pression/densité de remplissage assignée de SF₆

Tableau 3 – Complément de remplissage à la pression/densité de remplissage assignée de SF₆

Étape		Procédure
1	Identification de la nature de la fuite	Vérifier la date du dernier complément de remplissage pour comprendre si la fuite est anormale.
2	Préparation des appareils de manipulation du SF ₆	Vérifier que les connexions de gaz sont propres et sèches, que les tuyaux sont vidés et qu'il n'y a aucune fuite sur les connexions de liaison de manière à éviter toute contamination. Vérifier la validité de l'étalonnage des instruments soumis à étalonnage.
3	Nouveau remplissage de SF ₆	Connecter le récipient de SF ₆ et remplir le compartiment jusqu'à ce que la pression de remplissage assignée de SF ₆ soit atteinte. Utiliser une soupape de sûreté, un régulateur pour permettre une bonne régulation du processus de remplissage et un manomètre étalonné de manière à éviter un remplissage excessif. ^{a b}
4	Documentation	Consigner au moins le nom du fabricant, la référence du type du matériel, le numéro de série et la référence du compartiment pour identifier le compartiment de gaz, la pression de remplissage finale, la température ambiante et la date pour référence ultérieure.
^a Le SF₆ devant être introduit dans le compartiment de gaz peut être, soit du SF₆ de qualité technique, soit du SF₆ usagé pouvant être réutilisé sur site. ^b Dans la mesure où la quantité de SF₆ utilisée pour un complément de remplissage est très faible comparée à la quantité de SF₆ dans le compartiment correspondant, il n'est pas nécessaire d'effectuer une vérification de la qualité du SF₆ après le complément de remplissage.		

4.2 Vérification de la qualité du SF₆

4.2.1 Généralités

La mesure de la qualité du SF₆ est habituellement effectuée sur site en utilisant des appareils portables. 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 vérifications de la qualité du SF₆ effectuées conformément à la CEI 60480 sont généralement la teneur en humidité (par exemple, la teneur en eau en mg/kg), le pourcentage de SF₆ et la quantité totale de produits de décomposition gazeux réactifs donnant lieu à une teneur en acidité résiduelle (par exemple, la quantité totale de gaz réactifs en µl/l).

NOTE Des corrections adéquates pour des mesures effectuées à des températures différentes de 20 °C sont spécifiées par le fabricant du matériel d'origine dans le manuel d'instructions d'exploitation.

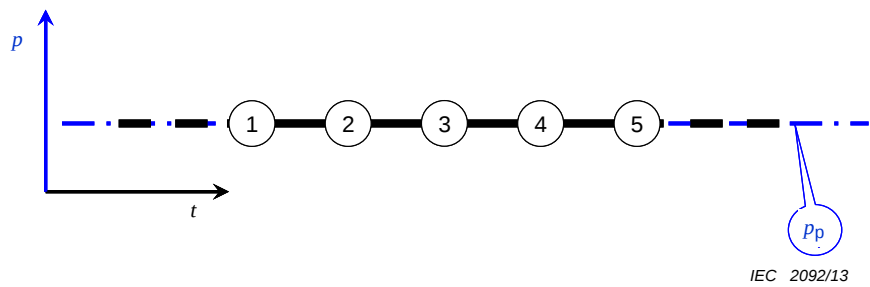
Le total des produits de décomposition gazeux réactifs doit être d'abord vérifié de manière à éviter d'endommager d'autres appareils portables, si l'historique du compartiment à remplissage de gaz est inconnu.

4.2.2 Mesure de la qualité du SF₆ au moyen d'appareils portables

Ce paragraphe s'applique aux compartiments à remplissage de SF₆ des systèmes à pression autonome et entretenue ou aux récipients remplis de SF₆ pour contrôler la qualité du gaz au moyen d'appareils portables.

La séquence d'opérations nécessaire à une vérification sur le site de la qualité du SF₆ doit être exécutée conformément à la Figure 4 et au Tableau 4, sauf spécification contraire dans la procédure de manipulation détaillée par le fabricant du matériel d'origine dans le manuel d'instructions d'exploitation.

Les caractéristiques des appareils portables sont décrites à l'Annexe D.



- | | | | |
|---|-------------------------------------|-------|---|
| 1 | Préparation des appareils portables | 4 | Déconnexion des appareils portables |
| 2 | Connexion des appareils portables | 5 | Documentation |
| 3 | Lecture des appareils portables | p_p | Pression de SF ₆ dans le compartiment à remplissage de gaz |

Figure 4 – Vérification de la qualité du SF₆ sur site

Tableau 4 – Vérification de la qualité du SF₆ sur site

Étape		Procédure
1	Préparation des appareils portables	Vérifier que les appareils portables fonctionnent correctement, que les conditions ambiantes se trouvent dans la plage de travail, par exemple la température, ^a que les connexions de gaz sont propres et sèches, que les tuyaux sont vidés et qu'il n'y a aucune fuite sur les connexions de liaison de manière à éviter toute erreur de mesure. Vérifier la validité de l'étalonnage des instruments soumis à étalonnage. Utiliser des connexions courtes pour minimiser le rejet de SF ₆ .
2	Connexion des appareils portables	Connecter les appareils portables. Rendre les connexions étanches et établir l'écoulement gazeux. ^b
3	Lecture des appareils portables	Se référer au manuel d'instructions d'exploitation fourni par le fabricant des appareils portables.
4	Déconnexion des appareils portables	Arrêter le flux de gaz et déconnecter les appareils portables. ^c
5	Documentation	Consigner au moins le nom du fabricant, la référence du type du matériel, le numéro de série et la référence du compartiment pour identifier le compartiment de gaz, le relevé et la date pour référence ultérieure.
^a Les plages types de températures pour les appareils portables sont données dans le Tableau D.2.		
^b Il convient de récupérer le SF ₆ échantillonné, ou de le pomper en retour dans le compartiment rempli de gaz		
^c Si le compartiment de gaz est de faible volume, une nouvelle opération de remplissage après vérification de la qualité du SF ₆ peut être requise.		

4.2.3 Échantillonnage et transport du SF₆ pour une analyse hors site

Ce paragraphe s'applique aux compartiments à remplissage de SF₆ des systèmes à pression autonome ou entretenue ou aux récipients remplis de SF₆, afin de procéder à une contre-vérification des mesures non satisfaisantes de la qualité du SF₆ obtenues sur site.

La séquence d'opérations nécessaire à l'échantillonnage et au transport du SF₆ doit être exécutée conformément à la Figure 5 et au Tableau 5, sauf spécification contraire dans la procédure de manipulation détaillée par le fabricant du matériel d'origine dans le manuel d'instructions d'exploitation.

Les caractéristiques des bouteilles contenant les échantillons de SF₆ sont décrites à l'Annexe D.

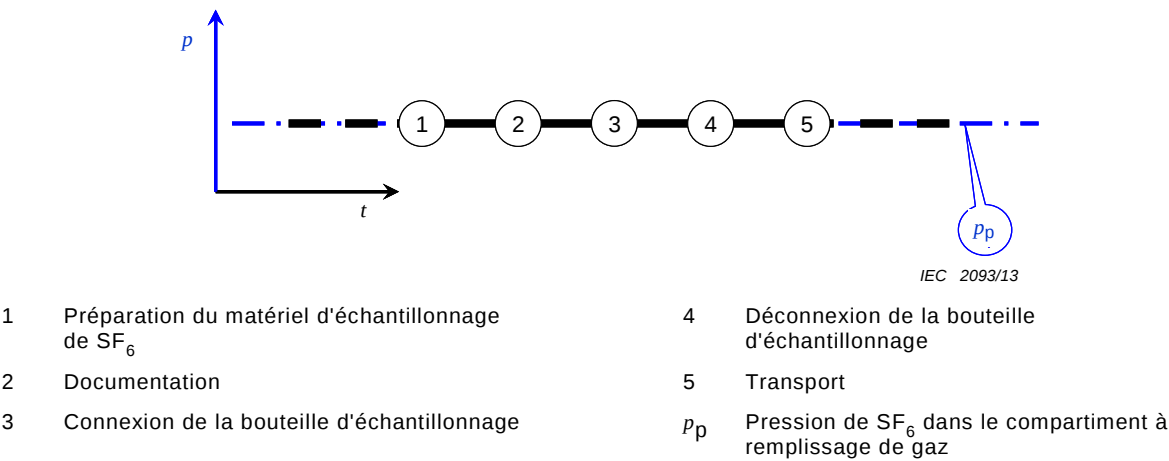


Figure 5 – Echantillonnage et transport du SF₆

Tableau 5 – Echantillonnage et transport du SF₆

Étape		Procédure
1	Préparation du matériel d'échantillonnage de SF ₆	Vider la bouteille d'échantillonnage. ^a Vérifier que les connexions de gaz sont propres et sèches, que les tuyaux sont vidés et qu'il n'y a aucune fuite sur les connexions de liaison de manière à éviter toute contamination de l'échantillon et utiliser des connexions courtes pour minimiser le rejet de SF ₆ .
2	Documentation	Apposer une étiquette sur la bouteille d'échantillonnage comportant au moins les informations suivantes et en conserver un enregistrement: nom du fabricant, référence du type du matériel, numéro de série et référence du compartiment pour identifier le compartiment de gaz, pression de SF ₆ , température ambiante, et date pour référence ultérieure.
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 le flux de gaz et déconnecter la bouteille d'échantillonnage. ^b
5	Transport	Le transport jusqu'au laboratoire est effectué conformément à la réglementation locale et internationale, comme décrit à l'Annexe A.
^a		L'Article D.7 fournit des informations sur les bouteilles appropriées à l'échantillonnage de gaz.
^b		Si le compartiment de gaz est de faible volume, une nouvelle opération de remplissage après vérification de la qualité du SF ₆ peut être requise.

5 Récupération et régénération du SF₆ au cours des opérations de maintenance

5.1 Généralités

Cet article contient les procédures de récupération et de régénération du SF₆ depuis n'importe quel compartiment à remplissage de gaz au cours des opérations de maintenance.

Lorsque le SF₆ a été récupéré et régénéré, il peut, soit être réutilisé sur le site, soit stocké, soit transporté hors site pour réutilisation ou élimination ultérieure, conformément à la CEI 60480.

5.2 Récupération et régénération de SF₆ contenu dans tout compartiment de systèmes à pression autonome ou entretenue contenant du SF₆ très faiblement décomposé ou faiblement décomposé

Ce paragraphe s'applique à tout compartiment des systèmes à pression autonome ou entretenue contenant du SF₆, très faiblement décomposé ou faiblement décomposé lorsqu'il est récupéré pour une maintenance.

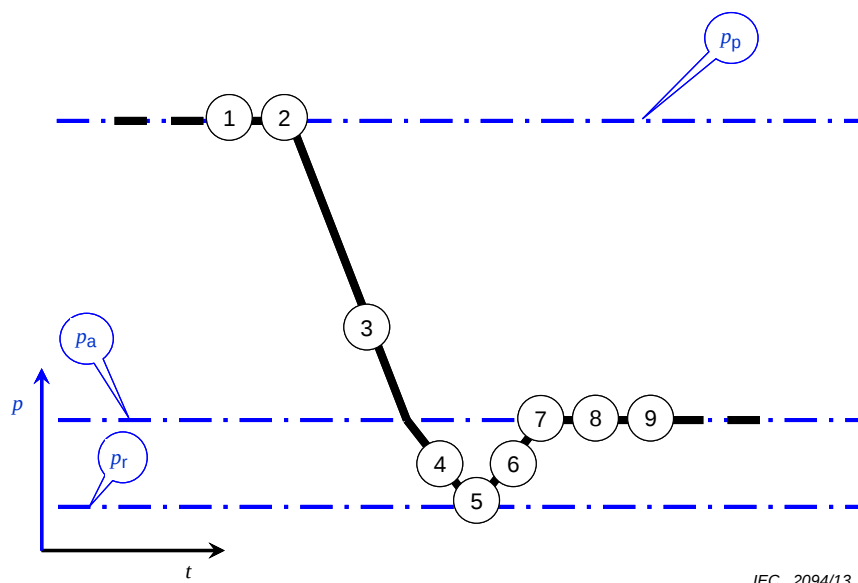
La pression partielle de SF_6 dans le compartiment de gaz avant immersion à l'air (sec) et ouverture doit être inférieure à 2 kPa.

La Figure 6 et le Tableau 6 peuvent être considérés comme des exemples de séquence d'opérations nécessaire à la récupération et la régénération du SF_6 contenu dans tout compartiment de systèmes à pression autonome ou entretenue contenant du SF_6 très faiblement décomposé ou faiblement décomposé, sauf spécification contraire dans la procédure de manipulation détaillée par le fabricant du matériel d'origine dans le manuel d'instructions d'exploitation.

Il existe des cas dans lesquels la pression résiduelle de SF_6 de 2 kPa ne peut pas être atteinte en utilisant la procédure indiquée à la Figure 6 et dans le Tableau 6, malgré l'utilisation d'installations de récupération adéquates (par exemple, en raison d'une fuite de l'appareillage, de petites vannes de remplissage dans l'appareillage). Dans de tels cas, d'autres méthodes peuvent être appliquées pour atteindre la pression partielle de SF_6 de 2 kPa (par exemple, une méthode de dilution) dans le compartiment de gaz avant ouverture.

NOTE La pression partielle de SF_6 est la pression de SF_6 occupant seule la totalité du volume du compartiment de gaz. Pour du SF_6 pur, si l'on suit la procédure détaillée à la Figure 6 et dans le Tableau 6, le SF_6 est le seul gaz dans le compartiment de gaz et en conséquence, la pression partielle de SF_6 est pratiquement égale à la pression résiduelle de SF_6 .

Il convient de suivre les règles de sécurité données à l'Annexe B.



IEC 2094/13

- | | | | |
|---|--|-------|---|
| 1 | Préparation des appareils de manipulation du SF_6 | 7 | Ouverture du compartiment de gaz |
| 2 | Connexion des pré-filtres externes (étape facultative) | 8 | Élimination des produits de décomposition solides et des adsorbants s'ils sont présents |
| 3 | Récupération du SF_6 | 9 | Neutralisation si nécessaire |
| 4 | Minimisation de la teneur en SF_6 résiduel | p_p | Pression de SF_6 dans le compartiment à remplissage de gaz |
| 5 | Documentation | p_a | Pression atmosphérique |
| 6 | Immersion à l'air (sec) | p_r | pression résiduelle de $\text{SF}_6 < 2 \text{ kPa}$ |

Figure 6 – Exemple de récupération et régénération de SF_6 contenu dans tout compartiment de systèmes à pression autonome ou entretenue contenant du SF_6 très faiblement décomposé ou faiblement décomposé

Tableau 6 – Exemple de récupération et régénération de SF₆ contenu dans tout compartiment de systèmes à pression autonome ou entretenue contenant du SF₆ très faiblement décomposé ou faiblement décomposé

Étape		Procédure
1	Préparation des appareils de manipulation du SF ₆	Vérifier le bon fonctionnement des appareils de manipulation du SF ₆ , que les filtres et pré-filtres sont toujours actifs et connectés et que les connexions de gaz sont propres et sèches, que les tuyaux sont vidés et qu'il n'y a aucune fuite sur les connexions de liaison de manière à éviter toute contamination. Vérifier que la capacité et que l'état des récipients de stockage sont compatibles avec les compartiments de gaz à récupérer. Vérifier la validité de l'étalonnage des instruments soumis à étalonnage.
2	Connexion des pré-filtres externes (étape facultative)	Connecter un ou plusieurs pré-filtres externes entre le compartiment à remplissage de gaz et l'entrée des appareils de manipulation du SF ₆ .
3	Récupération du SF ₆	Connecter le compartiment à remplissage de gaz. Utiliser l'étage de compresseur principal dès que la pression résiduelle de SF ₆ dans le compartiment s'approche de la pression dans le récipient de stockage. Utiliser une soupape de sûreté et un manomètre étalonné de manière à éviter un remplissage excessif du récipient de stockage. ^a
4	Minimisation de la teneur en SF ₆ résiduel	Connecter l'étage du compresseur auxiliaire lorsque la pression résiduelle de SF ₆ dans le compartiment s'approche de 100 kPa et le laisser fonctionner jusqu'à atteindre une pression inférieure à 2 kPa.
5	Documentation	Consigner au moins le nom du fabricant, la référence du type du matériel, le numéro de série et la référence du compartiment pour identifier le compartiment de gaz, la pression résiduelle p_r de SF ₆ , la quantité résiduelle de SF ₆ , la température ambiante et la date pour référence ultérieure.
6	Immersion à l'air (sec)	Déconnecter le compresseur et laisser l'air entrer lentement dans le compartiment de gaz. ^b
7	Ouverture du compartiment de gaz	Appliquer les règles de sécurité selon l'Annexe B. Ouvrir avec précaution le compartiment de gaz.
8	Élimination des produits de décomposition solides et des adsorbants s'ils sont présents	Utiliser immédiatement un aspirateur ou essuyer avec un chiffon non pelucheux pour recueillir les produits de décomposition solides, s'il y a lieu. Mettre les adsorbants dans un sac en plastique. Fermer hermétiquement le sac en plastique avec un ruban adhésif et l'étiqueter.
9	Neutralisation si nécessaire	Si des produits de décomposition solides ont été recueillis, utiliser une solution de soude de 10 % en poids ou équivalent pour laver et neutraliser toutes les pièces, puis laver avec de l'eau pure, conformément à l'Annexe B.
^a		Dans le cas d'un stockage en phase liquide, le poids du récipient de stockage est contrôlé de manière à éviter un remplissage excessif. Le facteur de remplissage est inférieur à 0,8 kg/l pour des raisons de sécurité.
^b		On peut introduire de l'air sec ou du N ₂ en bouteille dans le compartiment pour diminuer la contamination par l'humidité.

5.3 Récupération et régénération de SF₆ contenu dans tout compartiment de systèmes à pression autonome ou entretenue contenant du SF₆ fortement décomposé

Ce paragraphe s'applique à tout compartiment des systèmes à pression autonome ou entretenue contenant du SF₆, fortement décomposé lorsqu'il est récupéré pour une maintenance.

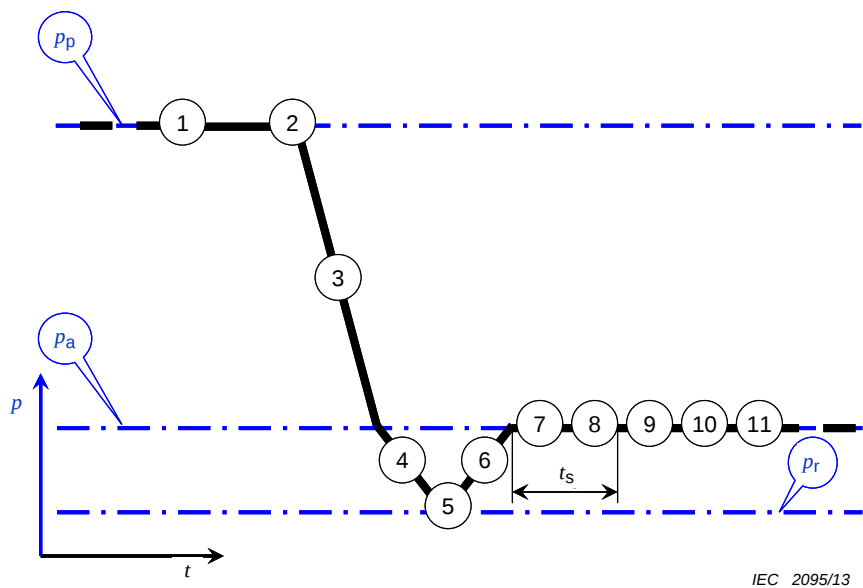
La pression partielle de SF₆ dans le compartiment de gaz avant immersion à l'air (sec) et ouverture doit être inférieure à 2 kPa.

La Figure 7 et le Tableau 7 peuvent être considérés comme des exemples de séquence d'opérations nécessaire à la récupération et à la régénération du SF₆ contenu dans tout compartiment de systèmes à pression autonome ou entretenue contenant du SF₆ fortement décomposé, sauf spécification contraire dans la procédure de manipulation détaillée par le fabricant du matériel d'origine dans le manuel d'instructions d'exploitation.

Il existe des cas dans lesquels la pression résiduelle de SF₆ de 2 kPa ne peut pas être atteinte en utilisant la procédure indiquée à la Figure 7 et dans le Tableau 7, malgré l'utilisation d'installations de récupération adéquates (par exemple, en raison d'une fuite de l'appareillage, de petites vannes de remplissage dans l'appareillage). Dans de tels cas, d'autres méthodes peuvent être appliquées pour atteindre la pression partielle de SF₆ de 2 kPa (par exemple, une méthode de dilution) dans le compartiment de gaz avant ouverture.

NOTE La pression partielle de SF₆ est la pression de SF₆ occupant seule la totalité du volume du compartiment de gaz. Pour du SF₆ pur, si l'on suit la procédure détaillée à la Figure 7 et dans le Tableau 7, le SF₆ est le seul gaz dans le compartiment de gaz et en conséquence, la pression partielle de SF₆ est pratiquement égale à la pression résiduelle de SF₆.

Il convient de suivre les règles de sécurité données à l'Annexe B.



1	Préparation des appareils de manipulation du SF ₆	9	Élimination des produits de décomposition solides, des adsorbants et des pièces amovibles
2	Connexion de pré-filtres externes	10	Neutralisation
3	Récupération du SF ₆	11	Documentation
4	Minimisation de la teneur en SF ₆ résiduel	p_p	Pression initiale de SF ₆ dans le compartiment à remplissage de gaz
5	Documentation	p_a	Pression atmosphérique
6	Immersion à l'air (sec)	p_r	Pression résiduelle de SF ₆ < 2 kPa
7	Décantation des produits de décomposition solides	t_s	Temps de décantation ≥ 1 h
8	Ouverture du compartiment de gaz		

Figure 7 – Exemple de récupération et régénération du SF₆ contenu dans tout compartiment de systèmes à pression autonome ou entretenue contenant du SF₆ fortement décomposé

Tableau 7 – Exemple de récupération et régénération du SF₆ contenu dans tout compartiment de systèmes à pression autonome ou entretenue contenant du SF₆ fortement décomposé

Étape		Procédure
1	Préparation des appareils de manipulation du SF ₆	Vérifier le bon fonctionnement des appareils de manipulation du SF ₆ , que les filtres et pré-filtres sont toujours actifs et connectés et que les connexions de gaz sont propres et sèches, que les tuyaux sont vidés et qu'il n'y a aucune fuite sur les connexions de liaison de manière à éviter toute contamination. Vérifier que la capacité et que l'état des récipients de stockage sont compatibles avec les compartiments de gaz à récupérer. Vérifier la validité de l'étalonnage des instruments soumis à étalonnage.
2	Connexion de pré-filtres externes	Connecter un ou plusieurs pré-filtres externes en série entre le compartiment à remplissage de gaz et l'entrée des appareils de manipulation du SF ₆ .
3	Récupération du SF ₆	Connecter le compartiment à remplissage de gaz. Utiliser l'étage de compresseur principal dès que la pression résiduelle de SF ₆ dans le compartiment s'approche de la pression dans le récipient de stockage. Utiliser une soupape de sûreté et un manomètre étalonné. Utiliser un récipient de stockage externe et éviter un remplissage excessif. ^a
4	Minimisation de la teneur en SF ₆ résiduel	Connecter l'étage du compresseur auxiliaire lorsque la pression résiduelle de SF ₆ dans le compartiment s'approche de 100 kPa et le laisser fonctionner jusqu'à atteindre une pression inférieure à 2 kPa.
5	Documentation	Consigner au moins le nom du fabricant, la référence du type du matériel, le numéro de série et la référence du compartiment pour identifier le compartiment de gaz, la pression résiduelle p_r de SF ₆ , la quantité résiduelle de SF ₆ , la température ambiante et la date pour référence ultérieure.
6	Immersion à l'air (sec)	Déconnecter le compresseur et laisser l'air entrer lentement dans le compartiment de gaz. ^b
7	Décantation des produits de décomposition solides	Attendre au moins 1 h pour laisser suffisamment de temps aux produits de décomposition solides pour se décanter dans le compartiment de gaz.
8	Ouverture du compartiment de gaz	Appliquer les règles de sécurité selon l'Annexe B. Ouvrir avec précaution le compartiment de gaz. ^c
9	Élimination des produits de décomposition solides, des adsorbants et des pièces amovibles	Utiliser immédiatement un aspirateur pour recueillir les produits de décomposition solides. Mettre les adsorbants et les pièces amovibles dans des sacs en plastique. Fermer hermétiquement les sacs en plastique avec un ruban adhésif et les étiqueter.
10	Neutralisation	Utiliser une solution de soude de 10 % en poids ou équivalent, puis laver et neutraliser toutes les pièces, puis laver avec de l'eau pure, conformément à l'Annexe B.
11	Documentation	Consigner toutes les informations pertinentes concernant le comportement en service. Inclure des images.
^a Dans le cas d'un stockage en phase liquide, le poids du récipient de stockage est contrôlé de manière à éviter un remplissage excessif. Le facteur de remplissage est inférieur à 0,8 kg/l pour des raisons de sécurité. ^b On peut introduire de l'air sec ou du N ₂ en bouteille dans le compartiment pour diminuer la contamination par l'humidité. ^c Si le compartiment de gaz est déjà ouvert à l'atmosphère (par exemple, en raison du fonctionnement d'un disque de rupture ou d'une perforation de l'enveloppe) on peut suivre la procédure en partant de l'étape 8.		

6 Démontage de l'appareillage électrique contenant du SF₆ en fin de vie

6.1 Généralités

Cet article traite les différentes phases de démontage de l'appareillage électrique en fin de vie. Du point de vue de l'environnement, il s'agit d'une étape importante du cycle de vie d'un produit.

Le démontage en fin de vie est exécuté conformément aux réglementations locales sous la responsabilité du propriétaire / de l'utilisateur qui est assisté par le fabricant du matériel

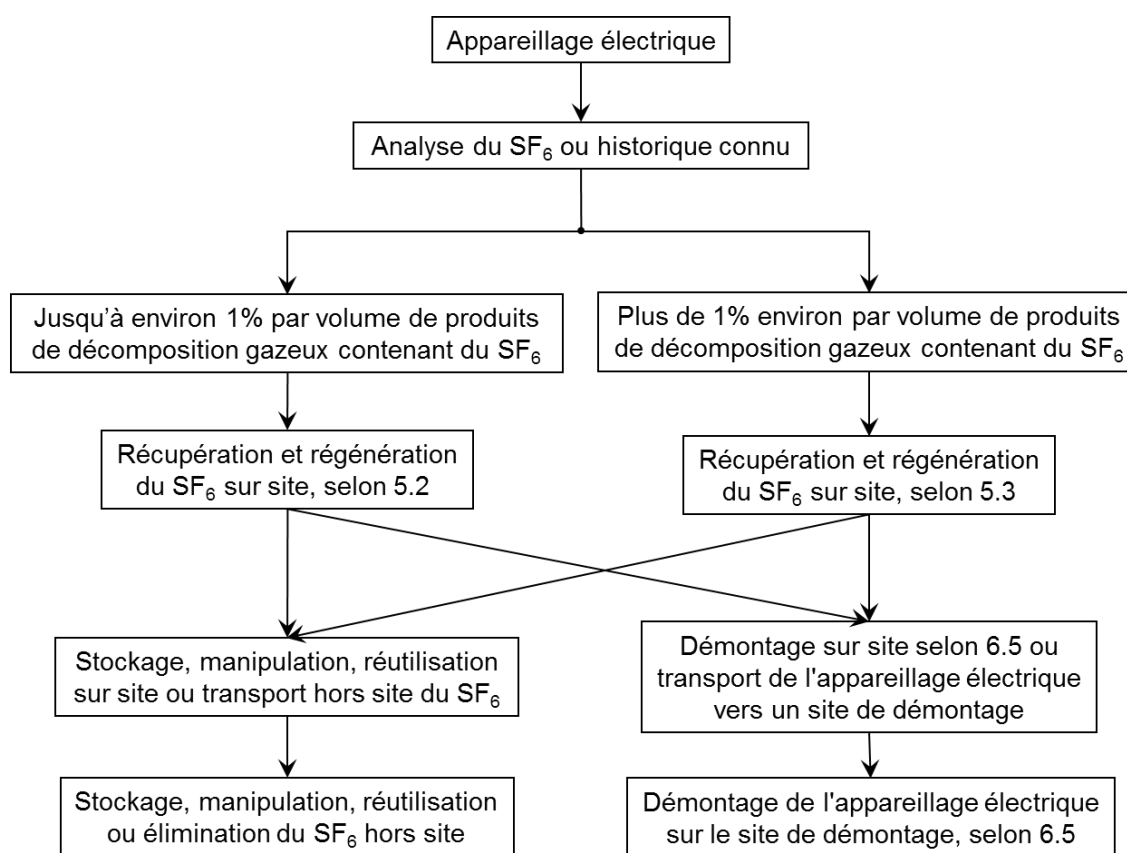
d'origine, car sa connaissance et son expérience sont essentielles. Des tierces parties, telles que des entreprises de service qualifiées, peuvent également effectuer le démontage en fin de vie. La fin de vie de l'appareillage électrique est prise en considération dès la phase de conception des équipements les plus récents.

NOTE Les procédures décrites dans cet article peuvent également s'appliquer pour la maintenance et la révision.

Le démontage d'un appareillage électrique et le traitement associé du SF₆ usagé, des compartiments de gaz, des poudres, des matériaux d'adsorbants et des effluents doivent être effectués en tenant compte de la sécurité du personnel et de l'environnement, comme décrit à l'Annexe B.

6.2 Fin du cycle de vie des systèmes à pression autonome ou entretenue

La Figure 8 décrit la procédure type à suivre pour la fin du cycle de vie des systèmes à pression autonome ou entretenue.



IEC 2096/13

Figure 8 – Fin du cycle de vie des systèmes à pression autonome ou entretenue

Si l'historique d'un compartiment à remplissage de gaz est inconnu, le gaz doit être analysé et manipulé dans des conditions sûres conformément à l'Article 5. Une fois que le SF₆ a été récupéré et régénéré, il peut, soit être réutilisé sur site, soit être stocké, soit être transporté hors site pour réutilisation ou élimination ultérieure, conformément à l'Annexe A. L'appareillage électrique peut être soit démonté sur site, soit transporté vers un site de démontage.

6.3 Fin du cycle de vie des systèmes à pression scellés

Les systèmes à pression scellés sont généralement transportés vers le site de démontage comme représenté à la Figure 9. Sur demande, la récupération et le démontage du SF₆

peuvent être effectués sur site. La procédure de récupération du SF₆ reste similaire et est indiquée en 6.4.

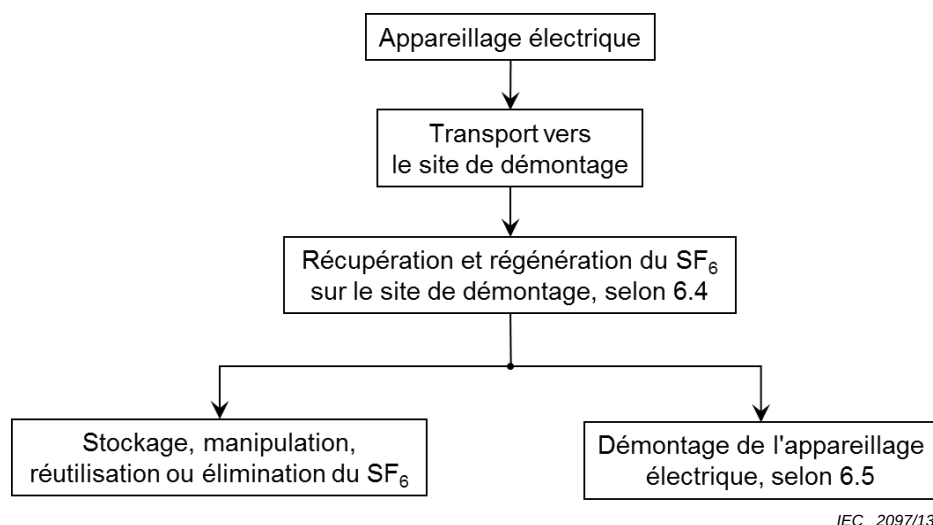


Figure 9 – Fin du cycle de vie des systèmes à pression scellés

Les systèmes à pressions scellés peuvent être transportés sur un site de démontage avant retrait du SF₆, cette opération étant généralement effectuée par des sociétés de service. Ces sociétés doivent mettre en œuvre les moyens de manipulation et de stockage nécessaires de manière à éviter les chocs pouvant fissurer ou briser l'enveloppe, en particulier les enveloppes à base de résine. L'expérience montre que le risque de dispersion de SF₆ dans l'environnement pendant la manipulation et le transport est extrêmement faible, si les instructions de transport données par le fabricant du matériel d'origine sont suivies.

6.4 Récupération et régénération du SF₆ en fin de vie des systèmes à pression scellés

La récupération et la régénération du SF₆ en fin de vie de tout système à pression scellé peuvent être effectuées sur le site de démontage. Lorsque les systèmes à pression scellés sont équipés d'accessoires de connexion, pour la récupération du SF₆, il convient d'utiliser les outils en conformité avec les spécifications données par le fabricant du matériel d'origine dans le manuel d'instructions d'exploitation. Sinon, des systèmes de perçage étanches doivent être utilisés.

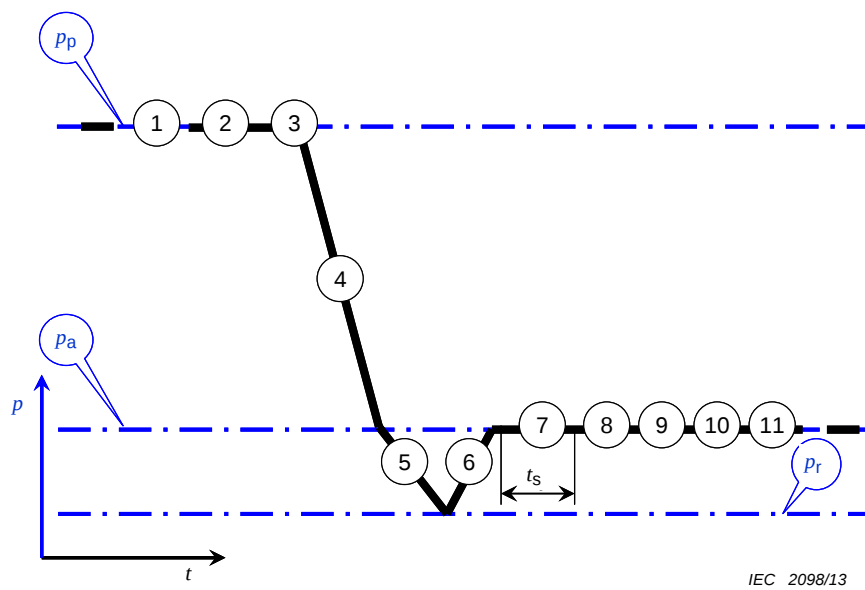
La pression partielle de SF₆ dans le compartiment de gaz avant ouverture doit être inférieure à 2 kPa.

La Figure 10 et le Tableau 8 peuvent être considérés comme des exemples de séquence d'opérations nécessaires à la récupération et à la régénération du SF₆ en fin de vie des systèmes à pression scellés, sauf spécification contraire dans la procédure de manipulation détaillée par le fabricant du matériel d'origine dans le manuel d'instructions d'exploitation.

Il existe des cas dans lesquels la pression résiduelle de SF₆ de 2 kPa ne peut pas être atteinte en utilisant la procédure indiquée à la Figure 10 et dans le Tableau 8, malgré l'utilisation d'installations de récupération adéquates (par exemple, en raison d'une fuite de l'appareillage, de petites vannes de remplissage dans l'appareillage). Dans de tels cas, d'autres méthodes peuvent être appliquées pour atteindre la pression partielle de SF₆ de 2 kPa (par exemple, une méthode de dilution) dans le compartiment de gaz avant ouverture.

NOTE La pression partielle de SF₆ est la pression de SF₆ occupant seul la totalité du volume du compartiment de gaz. Pour du SF₆ pur, si l'on suit la procédure détaillée à la Figure 10 et dans le Tableau 8, SF₆ est le seul gaz dans le compartiment de gaz et en conséquence, la pression partielle de SF₆ est pratiquement égale à la pression résiduelle de SF₆.

Il convient de suivre les règles de sécurité données à l'Annexe B.



- | | | | |
|---|--|-------|---|
| 1 | Préparation des appareils de manipulation du SF ₆ | 9 | Élimination des produits de décomposition solides, des pièces amovibles et des adsorbants s'ils sont présents |
| 2 | Connexion de pré-filtres externes, si nécessaire | 10 | Neutralisation si nécessaire |
| 3 | Connexion du compartiment de SF ₆ | 11 | Documentation |
| 4 | Récupération du SF ₆ | p_p | Pression initiale de SF ₆ dans le compartiment à remplissage de gaz |
| 5 | Minimisation de la teneur en SF ₆ résiduel | p_a | Pression atmosphérique |
| 6 | Immersion à l'air | p_r | Pression résiduelle de SF ₆ < 2 kPa |
| 7 | Décantation des produits de décomposition solides, si nécessaire | t_s | Temps de décantation ≥ 1 h, si nécessaire |
| 8 | Ouverture du compartiment de gaz | | |

Figure 10 – Récupération et régénération du SF₆ en fin de vie des systèmes à pression scellés

Tableau 8 – Récupération du SF₆ en fin de vie des systèmes à pression scellés

Étape		Procédure
1	Préparation des appareils de manipulation du SF ₆	Vérifier le bon fonctionnement des appareils de manipulation de SF ₆ , que les filtres et pré-filtres sont toujours actifs et connectés et que les connexions de gaz sont propres et sèches, que les tuyaux sont vidés et qu'il n'y a aucun rejet sur les connexions de liaison de manière à éviter toute contamination. Vérifier que la capacité et que l'état des récipients de stockage sont compatibles avec les compartiments de gaz à récupérer. Vérifier la validité de l'étalonnage des instruments soumis à étalonnage.
2	Connexion de pré-filtres externes, si nécessaire	Connecter un ou plusieurs pré-filtres externes entre le compartiment à remplissage de gaz et l'entrée du matériel de manipulation du SF ₆ .
3	Connexion du compartiment de SF ₆	Utiliser des outils dédiés et suivre les instructions du fabricant du matériel d'origine pour connecter le compartiment de SF ₆ . Dans les autres cas, on doit utiliser des systèmes de perçage étanches.
4	Récupération du SF ₆	Utiliser l'étage de compresseur principal pour transférer le gaz vers le récipient de stockage. Utiliser une soupape de sûreté et un manomètre étalonné. Utiliser un récipient de stockage externe approprié et éviter un remplissage excessif [NOTE].
5	Minimisation de la teneur en SF ₆ résiduel	Connecter l'étage du compresseur auxiliaire et le laisser fonctionner jusqu'à atteindre une pression inférieure à 2 kPa.
6	Immersion à l'air	Déconnecter le compresseur et laisser l'air entrer lentement dans le compartiment de gaz.
7	Décantation des produits de décomposition solides, si nécessaire	Attendre au moins 1 h pour laisser suffisamment de temps aux produits de décomposition solides pour se décanter dans le compartiment de gaz.
8	Ouverture du compartiment de gaz	Appliquer les règles de sécurité selon l'Annexe B. Ouvrir avec précaution le compartiment de gaz.
9	Élimination des produits de décomposition solides, des pièces amovibles et des adsorbants s'ils sont présents	Utiliser immédiatement un aspirateur ou essuyer avec un chiffon non pelucheux pour recueillir les produits de décomposition solides, s'il y a lieu. Mettre les adsorbants et les pièces amovibles dans un sac en plastique. Fermer hermétiquement les sacs en plastique avec un ruban adhésif et les étiqueter.
10	Neutralisation si nécessaire	Si des produits de décomposition solides ont été recueillis, utiliser une solution de soude de 10 % en poids ou équivalent pour laver et neutraliser toutes les pièces, puis laver avec de l'eau pure, conformément à l'Annexe B.
11	Documentation	Consigner au moins le nom du fabricant, la référence du type du matériel, le numéro de série et la référence du compartiment pour identifier le compartiment de gaz, la quantité résiduelle de SF ₆ , la température ambiante et la date pour référence ultérieure.
NOTE Dans le cas d'un stockage en phase liquide, le poids du récipient de stockage est contrôlé de manière à éviter un remplissage excessif. Le facteur de remplissage est inférieur à 0,8 kg/l pour des raisons de sécurité.		

6.5 Démontage de l'appareillage électrique en fin de vie

La Figure 11 décrit la procédure type de démontage d'un appareillage électrique en fin de vie.

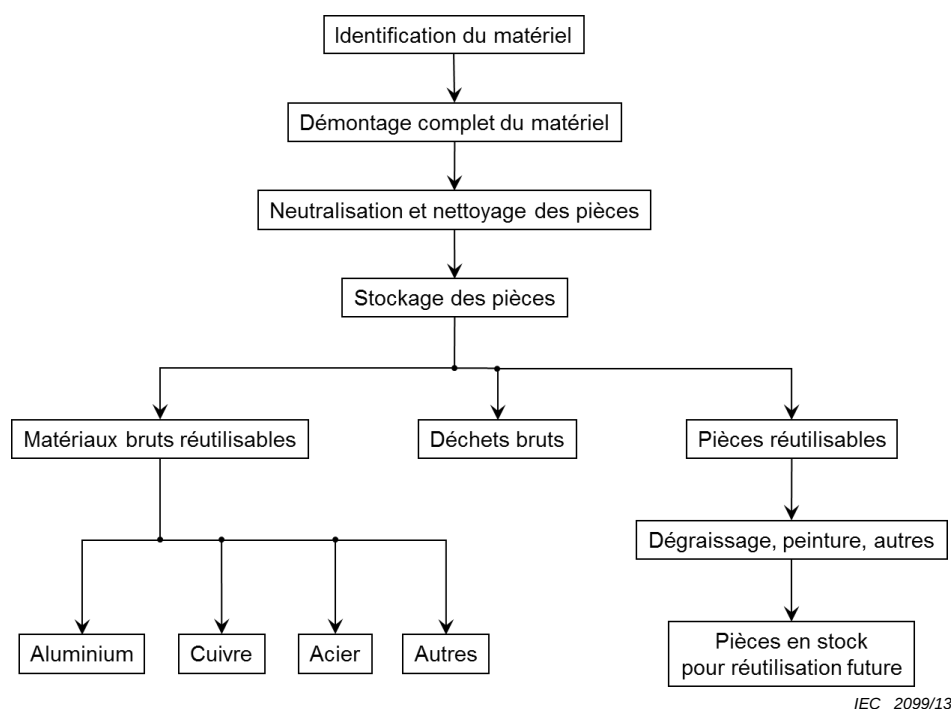


Figure 11 – Démontage d'un appareillage électrique

La première opération consiste à identifier chaque ensemble ou sous-ensemble parvenant au site de démontage. Une feuille d'identification est requise, contenant toutes les informations nécessaires pour le produit.

Les compartiments de gaz et les pièces internes peuvent contenir des produits de décomposition solides, qui sont neutralisés et nettoyés de telle sorte qu'ils puissent être manipulés, récupérés ou éliminés conformément à la réglementation locale ou aux normes internationales. Les procédures de neutralisation et de nettoyage sont simples à appliquer et ne requièrent que des matériels facilement disponibles, comme indiqué à l'Annexe B.

Il convient que les opérateurs connaissent les produits pendant la phase de démontage. Il convient de mettre à disposition des outils et des plans. Il convient de suivre les règles de sécurité données à l'Annexe B.

NOTE Un appareillage électrique type est constitué d'approximativement 75 % à 90 % en poids de métaux (aussi bien des métaux ferreux que non-ferreux) le reste étant constitué de matériaux diélectriques.

Lorsque du SF₆ est présent, il ne constitue qu'une très petite partie du poids total et sa présence contribue peu à l'effort nécessaire pour préparer le matériel pour la récupération, la réutilisation ou l'élimination. La majeure partie du poids du matériau diélectrique est constituée par des isolants solides (par exemple, résine coulée, plastiques, céramiques). Les métaux représentent la valeur récupérable la plus importante.

6.6 Produits de décomposition en fin de vie

La quantité de produits de décomposition dans un appareillage électrique dépend de l'énergie cumulée des arcs qui a été appliquée pendant sa durée de vie, en relation avec la quantité de SF₆ et la quantité et le type d'adsorbants. L'énergie cumulée des arcs dépend de l'historique du fonctionnement et de l'exploitation du matériel en question. Un interrupteur de charge contiendra des quantités beaucoup plus faibles de produits de décomposition qu'un disjoncteur à fort pouvoir de rupture ayant coupé fréquemment le courant de défaut.

Des exemples pratiques de calcul de la quantité de produits de décomposition sont donnés à l'Annexe G. Dans la grande majorité des cas, le degré de décomposition, même dans les disjoncteurs, est faible.

Les raisons en sont les suivantes:

- en moyenne, très peu de coupures à haute intensité se produisent en service;
- des matériaux adsorbeurs sont installés dans les compartiments de gaz.

Les caractéristiques attendues du SF₆ et la quantité de produits de décomposition pour divers types d'appareillage électrique sont données dans le Tableau 9.

Tableau 9 – Caractéristiques du SF₆ et quantité de produits de décomposition attendues

Désignation	Caractéristiques du SF ₆	Quantité attendue de produits de décomposition
Jeux de barres de poste à isolation gazeuse, boîtes à câble, disjoncteurs sous vide (milieu d'isolation, SF ₆)	SF ₆ très faiblement décomposé	De zéro à quelques ml/l (quelques dixièmes de pour cent par volume)
Sectionneur de mise à la terre et sectionneur d'un poste à isolation gazeuse	SF ₆ faiblement décomposé	Léger dépôt de poudre
Interrupteur de charge moyenne tension et artères		Léger dépôt de poudre
Disjoncteur moyenne tension et haute tension		Jusqu'à environ 10 ml/l (quelques pour cent par volume), légers dépôts de poudre
Disjoncteurs après des interruptions satisfaisantes de plusieurs courts-circuits à une amplitude élevée de courant ou tout compartiment à remplissage de gaz après défaut d'arc interne	SF ₆ fortement décomposé	Peut dépasser 150 ml/l (1 % en volume) dépôts de poudre moyens à importants

Annexe A (informative)

Stockage et transport du SF₆

A.1 Généralités

Le stockage et le transport du SF₆, soit dans des récipients, soit dans un appareillage électrique, doit toujours être exécuté conformément aux réglementations locales et internationales.

Un récipient de SF₆ vide peut toujours contenir une quantité résiduelle de SF₆. Il doit être stocké et transporté de la même manière que pour un récipient plein.

A.2 Stockage des récipients remplis de SF₆

On peut généralement stocker le SF₆ de deux manières, soit comme un gaz en dessous de 2 MPa, soit comme un liquide jusqu'à 5 MPa. Le stockage gazeux présente l'avantage de réduire les temps de récupération et de remplissage mais nécessite de grand volume de stockage et il est donc généralement limité à du matériel de petit volume ou utilisé dans des installations de manipulation de gaz à des emplacements fixes. Le stockage liquide donne la possibilité de diminuer les volumes de stockage et de transporter économiquement de grandes quantités de SF₆.

Il convient de manipuler avec précaution les récipients et de les stocker dans une zone fraîche, sèche, bien ventilée, à l'écart de tout matériau inflammable ou explosif. Il convient de les protéger de l'éclairage direct du soleil, de les monter à l'écart d'un sol humide et de les fixer de manière à éviter tout renversement. Il convient d'adopter des protections spéciales du robinet de manière à éviter tout dégât potentiel robinet lui-même.

Il convient que les récipients soient rechargeables (il convient d'interdire les récipients non rechargeables) et clairement étiquetés pour identifier leur contenu; il convient de séparer physiquement les récipients contenant du SF₆ de qualité technique et du SF₆ usagé pouvant être réutilisé sur site de ceux qui contiennent du SF₆ réutilisable par le fabricant du gaz ou du SF₆ non réutilisable.

Le Tableau A.1 donne une vue d'ensemble de toutes les méthodes de stockage possibles pouvant être utilisées pour un récipient de stockage.

Tableau A.1 – Méthodes de stockage du SF₆

Méthode	Exigences	Caractéristiques
Gazeux	Pression type inférieure à 2 MPa. Le SF ₆ reste à l'état gazeux	Nécessite un différentiel de pression de récupération relativement faible (généralement, 100:1) mais nécessite de plus grands volumes de stockage. Le gaz ne peut pas être liquéfié dans les récipients pour être transporté. Il est donc limité à de petites quantités (généralement 200 kg) et une utilisation fixe
Assistance par refroidissement de liquide	Pression type égale à 3 MPa Utilise un système de refroidissement supplémentaire pour refroidir le SF ₆ après compression, permettant de stocker le SF ₆ sous forme liquide	Nécessite un différentiel de pression de récupération relativement faible (généralement, 700:1) mais nécessite un agrégat de refroidissement. Les performances de l'agrégat de refroidissement peuvent avoir une influence sur la vitesse de traitement. Nécessite une maintenance supplémentaire. Volume de stockage limité nécessaire et ne convenant généralement pas au transport
Pression liquide seulement	Pression type égale à 5 MPa Le SF ₆ comprimé à 5 MPa ne se liquéfie que par pression	Nécessite un différentiel de récupération généralement de 1 000:1, mais élimine la nécessité d'agréats supplémentaires. Peut être utilisé avec tout récipient de stockage assigné à 5 MPa ou plus

Lorsque du SF₆ usagé est stocké sur le site, les récipients de stockage doivent satisfaire aux réglementations locales et internationales concernant les récipients sous pression. L'étiquetage du récipient doit également satisfaire aux réglementations locales et internationales.

Le Tableau A.2 donne une vue d'ensemble des types de récipients et de l'étiquetage exigé. À chaque fois que possible, il est recommandé d'utiliser des récipients de stockage transportables pour des raisons pratiques.

Tableau A.2 – Types de récipients et étiquetage exigé pour le stockage et le transport du SF₆

Gaz	Caractéristique	Type de récipient	Étiquetage du récipient ^a
SF ₆ de qualité technique	Gaz inerte liquéfié	Convient pour du gaz liquéfié jusqu'à une pression de 7 MPa. NOTE Le facteur de remplissage pour le SF ₆ de qualité technique atteint 1,04 kg/l. Recommandation: Il convient d'apposer une étiquette verte sur les récipients ou il convient de peindre le récipient en vert selon l'EN 1089-3.	Estampé sur le récipient: Hexafluorure de soufre UN 1080 Étiquette de danger 2.2
SF ₆ usagé pouvant être réutilisé sur site	Gaz inerte liquéfié	Convient pour du gaz liquéfié jusqu'à une pression de 7 MPa. NOTE: En raison de la teneur en gaz inerte (par exemple N ₂ , O ₂), le facteur de remplissage est inférieur à 0,8 kg/l. ^b Recommandation: Il convient de colorer les récipients d'une manière particulière de manière à éviter toute confusion entre SF ₆ de qualité technique et usagé (on suggère un ruban adhésif orange sur le tiers supérieur du récipient)	Estampé sur le récipient: Hexafluorure de soufre UN 3163, tétrafluorure de carbone ou air ou azote ^c Étiquette de danger 2.2
SF ₆ usagé réutilisable par le	Gaz inerte liquéfié	Le type et l'étiquetage du récipient sont les mêmes que pour le SF ₆ usagé pouvant être réutilisé sur site ^{f g}	

Gaz	Caractéristique	Type de récipient	Étiquetage du récipient ^a
	Gaz liquéfié contenant des produits de décomposition gazeux toxiques ^d	Comme pour le SF ₆ réutilisable sur le site ^{f g}	Estampé sur le récipient: Hexafluorure de soufre UN 3162, fluorure d'hydrogène, fluorure de thionyle ^c Étiquette de danger 2.3
	Gaz liquéfié contenant des produits de décomposition gazeux corrosifs et toxiques ^e	Récipients spéciaux approuvés pour le stockage et le transport du gaz corrosifs (par exemple acide fluorhydrique HF) avec robinet et adaptateur anticorrosion ^{f g}	Estampé sur le récipient: Hexafluorure de soufre UN 3308, fluorure d'hydrogène, fluorure de thionyle Étiquettes de danger 2.3 + 8

^a Les numéros UN sont assignés par le Comité d'experts sur le transport des matières dangereuses (TDG) et selon le Système mondial harmonisé de classification et d'étiquetage (GHS) de la Commission économique pour l'Europe des Nations Unies.

^b Le facteur de remplissage est le poids de SF₆ contenu dans le récipient divisé par le volume du récipient et il est habituellement spécifié en kg/l.

^c Seuls les deux contaminants les plus abondants doivent être spécifiés.

^d Tout SF₆ usagé contenant des produits de décomposition gazeux toxiques peut être récupéré sur le site pour éliminer les produits de décomposition gazeux toxiques afin de faciliter le transport.

^e Tout SF₆ usagé contenant des produits de décomposition gazeux toxiques et corrosifs peut être récupéré sur le site pour éliminer les produits de décomposition gazeux toxiques et corrosifs afin de faciliter le transport.

^f Il convient d'apposer une étiquette sur les récipients remplis de SF₆ usagé réutilisable par le fabricant du gaz au moyen de la phrase suivante: «Contient du SF₆ usagé réutilisable par le fabricant du gaz».

^g Il convient d'apposer une étiquette sur les récipients remplis de SF₆ usagé non réutilisable au moyen de la phrase suivante: «Contient du SF₆ usagé non réutilisable».

A.3 Transport des récipients remplis de SF₆

Des Règlements internationaux de transport de l'appareillage électrique contenant du SF₆ et des récipients de SF₆ sont disponibles pour le transport routier (ADR), ferroviaire (RID), maritime (code IMDG) et aérien (IATA – DGR). Ils sont similaires en ce qui concerne la numérotation UN, la classification, l'étiquetage des dangers, la classification finale et la documentation de transport. Les différentes langues officielles sont les suivantes:

- ADR: allemand, français, anglais;
- RID: anglais;
- Code IMDG: anglais;
- IATA – DGR: anglais.

Les Règlements internationaux pour le transport du SF₆ sont résumés dans le Tableau A.3.

Tableau A.3 – Règlements internationaux applicables au transport du SF₆

Gaz	Caractéristique	Classe	Classification finale ^a	Document de transport ^a
SF ₆ de qualité technique ^b	Gaz inerte liquéfié	2A	Gaz liquéfié UN 1080, n.o.s. 2.2	Gaz liquéfié UN 1080, n.o.s (hexafluorure de soufre) 2.2
SF ₆ usagé pouvant être réutilisé sur site	Gaz inerte liquéfié	La classe de transport et l'étiquette de danger sont les mêmes que pour le SF ₆ de qualité technique	Gaz liquéfié UN 3163, n.o.s. 2.2	Gaz liquéfié UN 3163, n.o.s. (hexafluorure de soufre et air ou azote ou tétrafluorure de carbone) 2.2
SF ₆ usagé réutilisable par le fabricant du gaz ou SF ₆ usagé non réutilisable	Gaz inerte liquéfié	Le numéro UN, la classe de transport, l'étiquette de danger, la classification finale et le document de transport sont les mêmes que pour le SF ₆ usagé pouvant être réutilisé sur site		
	Gaz liquéfié toxique (gaz contenant des produits de décomposition gazeux toxiques) ^c	2T	Gaz liquéfié toxique UN 3162, n.o.s. 2.3	Gaz liquéfié UN 3162, toxique, n.o.s. (hexafluorure de soufre et fluorure d'hydrogène et fluorure de thionyle) 2.3
	Gaz liquéfié toxique et corrosif (gaz contenant des produits de décomposition gazeux toxiques et corrosifs) ^d	2TC	Gaz liquéfié toxique et corrosif UN 3308, n.o.s. 2.3 + 8	Gaz liquéfié UN 3308, toxique, corrosif, n.o.s. (hexafluorure de soufre et fluorure d'hydrogène et fluorure de thionyle) 2.3 + 8
^a Les numéros UN sont assignés par le Comité d'experts sur le transport des matières dangereuses (TDG) et selon le Système mondial harmonisé de classification et d'étiquetage (GHS) de la Commission économique pour l'Europe des Nations Unies. ^b Éviter toute contamination des récipients dédiés au SF₆ de qualité technique. ^c Tout SF₆ usagé contenant des produits de décomposition gazeux toxiques peut être récupéré sur le site pour éliminer les produits de décomposition gazeux toxiques afin de faciliter le transport. ^d Tout SF₆ usagé contenant des produits de décomposition gazeux toxiques et corrosifs peut être récupéré sur le site pour éliminer les produits de décomposition gazeux toxiques et corrosifs afin de faciliter le transport.				

A.4 Stockage et transport de l'appareillage électrique contenant du SF₆

Les appareillages électriques à remplissage du SF₆ doivent être stockés et transportés conformément aux réglementations locales et internationales.

A.5 Responsabilités

Le propriétaire de l'appareillage électrique utilisant du SF₆ est responsable de la bonne utilisation, du transport et de l'élimination des matériels et du gaz. Il est également responsable de la conservation annuelle des enregistrements concernant le SF₆ contenus dans le matériel ou stocké dans des récipients ainsi que des taux d'émission. Ceci est pris en charge par le fabricant du matériel d'origine et le fournisseur de gaz au moyen des informations de base des manuels selon la CEI 62271-1.

Annexe B (informative)

Sécurité et premiers soins

B.1 Règles générales de sécurité

B.1.1 Généralités

Avant de commencer tout travail de maintenance/service sur un appareillage électrique, une inspection détaillée de l'état du matériel doit être effectuée et documentée. Outre les réglementations locales de sécurité, au moins les règles générales suivantes doivent être suivies:

- débrancher et isoler;
- empêcher la refermeture;
- vérifier que le matériel n'est plus alimenté;
- mettre à la terre et court-circuiter le matériel;
- couvrir ou protéger les parties proches sous tension.

Il convient que des documents écrits autorisant le travail sur les appareillages électriques soient acceptés et signés à la fois par le propriétaire/utilisateur du matériel et par le fournisseur de service.

Le Tableau B.1 donne la liste des principaux points à surveiller lorsqu'on travaille sur un appareillage électrique avec SF₆.

Tableau B.1 – Mesures à appliquer pour toute tâche exécutée sur un appareillage électrique contenant du SF₆

Élément	Travail au voisinage du matériel (exploitation du matériel, contrôle visuel, nettoyage du local)	Remplissage, récupération, évacuation des compartiments de gaz	Ouverture des compartiments de gaz, travail sur des compartiments ouverts
Fiches de caractéristiques de sécurité/manuels d'exploitation des matériaux	Non requis	Applicable	Applicable
Formation	Applicable ^a	Applicable	Applicable
Appareils de manipulation du SF ₆	Non requis	Applicable	Applicable
Matériel de nettoyage/neutralisation	Non requis	Non requis	Applicable
Équipement individuel de protection	Non requis	Non requis	Applicable
^a Il convient de spécifier les informations générales en fonction du type de travail et d'installation, en fonction des réglementations locales de sécurité.			

Lorsque du SF₆ est manipulé en tout lieu, il convient d'afficher une note stipulant l'interdiction des feux ouverts, des flammes nues (par exemple, allumettes), de fumer, d'utiliser des moteurs thermiques, un chauffage supérieur à 200 °C et le soudage sans précautions particulières, ainsi que des instructions de premiers soins (voir B.3).

Lorsqu'un compartiment de gaz est ouvert après avoir mis en service l'appareillage électrique, de manière à éviter tout contact avec les petits produits de décomposition solides pouvant être présents, il convient que le personnel porte des vêtements de protection appropriés. Il convient de prêter une attention particulière aux yeux et aux voies respiratoires. Il convient que le personnel travaillant à l'intérieur ou près de compartiments de gaz ouverts ayant contenu du SF₆ faiblement décomposé ou fortement décomposé:

- utilise des outils et du matériel adaptés;
- porte des vêtements de protection appropriés (voir Tableau B.2 et B.1.5);
- observe une hygiène personnelle très stricte;
- se lave ainsi que son matériel, en utilisant des matériaux jetables, avant de quitter la zone de travail;
- retire les vêtements de protection et les lave aussi bien que possible après avoir quitté la zone de travail;
- s'assure que les vêtements, les outils et les éléments ayant été en contact avec des produits de décomposition soient emballés en toute sécurité dans des sacs scellés ou d'autres récipients scellés et soient ensuite traités pour neutraliser tous les résidus.

B.1.2 Protection du personnel

Le SF₆ n'est manipulé que par du personnel habilité. On peut adopter différents modules de formation, en fonction du type de travail à effectuer sur l'appareillage électrique (voir Annexe C).

Une formation spécifique traitant la récupération du SF₆ usagé à partir d'un compartiment à remplissage de gaz est exigée pour le personnel ouvrant le compartiment de gaz ou y accédant. Il convient se conformer strictement au manuel d'instructions d'exploitation du matériel fourni par le fabricant du matériel d'origine.

Le Tableau B.2 donne une vue d'ensemble des risques potentiels, des mesures de sécurité ainsi que du matériel de sécurité et des outils exigés lors de l'ouverture ou de l'accès à un compartiment de gaz. Aucune différence substantielle entre les conditions d'entrée et de sortie n'est indiquée lorsque l'opérateur ouvre le compartiment ou y accède.

Tableau B.2 – Mesures de sécurité lors de l'ouverture ou de l'accès dans les compartiments de gaz

Élément	Tout compartiment ayant contenu du SF ₆ faiblement décomposé ou fortement décomposé	Tout compartiment ayant contenu du SF ₆ très faiblement décomposé
Risque potentiel	Fumées ou substances de nettoyage Privation d'O ₂ SF ₆ usagé restant Produits de décomposition gazeux réactifs résiduels Produits de décomposition solides et matériaux des adsorbants	Fumées ou substances de nettoyage Privation d'O ₂ SF ₆ usagé restant ou autres gaz du processus de fabrication
Mesures de sécurité	Élimination des produits de décomposition solides et matériaux des adsorbants Ventilation Mesure de la concentration en O ₂ à l'entrée Port d'équipement individuel de protection Protection des produits de décomposition solides contre l'hydrolyse	Ventilation Mesure de la concentration en O ₂ avant d'entrer
Matériel et outils de sécurité	Ventilateur d'aspiration ou aspirateur Dispositif de mesure de la concentration en O ₂ Tenue de protection à usage unique, chaussures de sécurité, protection capillaire Gants de sécurité à l'épreuve des acides Masque facial intégral (préférentiel) ou au moins masque de protection respiratoire Lunettes de sécurité Protection de l'environnement contre la pluie ou le vent (en extérieur seulement)	Ventilateur d'aspiration ou aspirateur Dispositif de mesure de la concentration en O ₂

Comme pour tout gaz à l'exception de l'oxygène, on considère qu'une concentration supérieure à 190 ml/l (19 % par volume) de SF₆ dans l'air constitue un risque potentiel d'asphyxie. Ceci est dû au fait qu'il diminue la concentration en oxygène à 160 ml/l (16 % en volume), constituant le seuil d'asphyxie généralement admis. Il est donc recommandé de mesurer la teneur en oxygène dans le compartiment de gaz avant d'y accéder. De plus, la teneur en oxygène dans l'environnement ambiant peut être vérifiée lorsqu'on travaille dans des espaces confinés.

Il est interdit de manger, de boire et de fumer lorsqu'on accède à un compartiment de gaz ou lorsque ce dernier est ouvert. Il est recommandé de changer de vêtements et de se laver la peau dès que possible après le travail de manière à éviter tout danger potentiel d'irritation ou de brûlure.

B.1.3 Manipulation de matériels et d'outils de sécurité contaminés

On considère que le matériel et les outils ayant été en contact avec des produits de décomposition solides ou des matériaux d'adsorbants sont contaminés. Ils sont récupérés ultérieurement et placés dans des sacs en plastique. Les sacs en plastique sont scellés et étiquetés. Leur élimination est effectuée conformément aux réglementations locales.

Il convient de laver le matériel et les outils réutilisables et de les neutraliser dans une solution eau/soude contenant 10 % en poids de soude ou équivalent, puis de les rincer à l'eau pure. Des exemples de solutions neutralisantes sont donnés dans le Tableau B.3.

L'élimination de la solution eau/soude et de l'eau de lavage est effectuée conformément aux réglementations locales.

Tableau B.3 – Solutions neutralisantes

Agent actif	Formule	Concentration kg/100 l	T_1^a heures	T_2^b heures	Références à la bibliogra- phie
Chaux	Ca(OH)_2	Saturé	Non applicable	24	[9]
Carbonate de sodium	Na_2CO_3	1,1 3 10 ^c 10-14 ^c 3	Non applicable Lavage non applicable 1 non applicable	24 non applicable 0,25 48 non applicable	[10] [9] [11] [12] [13]
Bicarbonate de sodium	NaHCO_3	1 ^d	Non applicable	Non applicable –	[11]
^a Il convient si possible de traiter par une solution neutralisante pendant une durée T_1 le matériel de sécurité réutilisable, les outils, les compartiments de gaz et les parties internes des compartiments ayant contenu du SF_6 faiblement décomposé. Il convient de les rincer ensuite à l'eau pure. ^b Il convient si possible de traiter par une solution neutralisantes pendant une durée T_2 le matériel de sécurité réutilisable, les outils, les compartiments de gaz et les parties internes des compartiments ayant contenu du SF_6 fortement décomposé. Il convient de les rincer ensuite à l'eau pure. ^c Lorsqu'on utilise des solutions alcalines à des concentrations aussi fortes, il convient de prendre soin à éviter tout contact avec la peau et les yeux. ^d Recommandé pour le lavage de la peau.					

B.1.4 Matériel et outils ou dispositifs de mesure sous pression

Comme pour tout gaz sous pression, une expansion de volume brutale produit une chute locale de la température et peut provoquer une congélation. Il convient de porter des gants isolés appropriés (par exemple en cuir et non en latex) lorsqu'on travaille sur des conduites, des robinets ou des connexions à haute pression, au cours des opérations de remplissage.

Tout le matériel et les outils utilisés pendant la manipulation du SF_6 sont susceptibles de contenir du SF_6 gazeux ou liquide à haute pression. Il convient de les manipuler avec soin.

B.1.5 Équipement de sécurité et de protection du personnel

L'utilisation d'équipement de sécurité et de protection du personnel n'est pas liée à la présence de l'appareillage électrique contenant du SF_6 lui-même. Pour accéder au voisinage de l'appareillage, des chaussures de sécurité standard, un casque et des lunettes de protection peuvent être exigés en fonction des réglementations locales.

En cas de rejet anormal de SF_6 dû à un feu externe ou à un arc interne, des règles de sécurité supplémentaires s'appliquent pour pénétrer dans un local d'appareillage, conformément à B.2.

Selon le type de travail à exécuter sur le site et conformément au Tableau B.2, les travailleurs impliqués dans la manipulation du SF_6 sont dotés du matériel de sécurité et de protection personnel suivant:

- gants de protection: gants adaptés, résistant aux acides par exemple en, néoprène, en PVC ou en caoutchouc;
- lunettes de protection: lunettes industrielles de type chimique selon les réglementations locales (par exemple la Norme européenne EN 166);
- masque de protection respiratoire: à utiliser en même temps que les gants de protection, le masque de protection respiratoire aide à protéger la bouche et le nez contre la

poussière et il convient de l'utiliser en cas d'exposition à des zones peu poussiéreuses seulement;

- masque facial intégral: pour une inspection de courte durée et un travail où une ventilation peut être assurée mais où la concentration en produits de décomposition peut dépasser le niveau maximum approprié, un masque facial avec filtre à charbon actif remplaçable est utilisé conformément aux réglementations locales (par exemple les Normes européennes EN 140, EN 141 et EN 143 spécifient respectivement des masques, filtres à gaz et filtres à particules. Des filtres combinés de type A2/B2/E2/ K2/P3 fabriqués selon ces normes sont disponibles et sont capables d'assurer une protection contre les produits de décomposition incluant des particules de dimension supérieure à 1 µm);
- tenue de protection à usage unique: vêtements de protection anti-poussière à porter au-dessus des vêtements normaux, couvre-chaussures, protection capillaire. Tenue jetable à capuche de qualité industrielle sans poches, non perméable (par exemple en polypropylène lié) comportant des serrages de chevilles et de poignets couvrant les chaussures et les gants;
- masque de protection: lors de l'entrée dans des applications intérieures après fuite majeure ou arc interne, lorsque la concentration en O₂ ou que la teneur en produits de décomposition sont à des niveaux dangereux, on utilise un masque de protection conforme aux réglementations locales (par exemple, la Norme européenne EN 136);
- dispositif de mesure de la concentration en O₂ pour surveiller en permanence la teneur en O₂ dans l'environnement;
- protection de l'environnement pour les emplacements de travail à l'extérieur: abris temporaires pour empêcher la pénétration de pluie et la dispersion par le vent de produits de décomposition solides (s'il y a lieu) lorsque le compartiment de gaz est ouvert;
- aspirateur: aspirateur dédié à haut rendement équipé d'un filtre capable de piéger des particules de l'ordre de 1 µm et d'une buse non métallique à extrémité ouverte conforme aux réglementations locales (par exemple, une machine de type H selon le supplément n° 1 de la BS 5415, 1986);
- ventilateur d'aspiration: matériel permettant de forcer la ventilation d'espaces fermés et d'autres zones inaccessibles. Ce matériel peut être portable ou installé de façon permanente, en fonction de la taille de l'installation.

B.1.6 Équipements et services

Lorsque l'on doit récupérer et ouvrir des compartiments de gaz contenant du SF₆ usagé, il est souhaitable de mettre à la disposition des travailleurs des équipements de lavage appropriés et une réserve d'eau pour préparer des solutions de nettoyage peut être exigée.

B.2 Mesures de sécurité supplémentaires dans le cas d'un rejet anormal de SF₆ dû à un feu extérieur ou à un arc interne

Les recommandations générales de sécurité à adopter lorsqu'on travaille avec du SF₆ sur le site sont données en B.1. Le présent Article B.2 décrit des mesures de sécurité supplémentaires dans le cas d'un rejet anormal de SF₆ dû à un feu extérieur ou à arc interne.

Dans ces circonstances, le personnel formé aux modules C1 ou C2 (voir respectivement C.2.5 et C.2.6) est autorisé à pénétrer dans le local où se trouve l'appareillage et à le nettoyer, ou à accéder à l'appareillage électrique. Le Tableau B.4 donne une vue d'ensemble des risques potentiels, des mesures de sécurité ainsi que du matériel de sécurité et des outils exigés.

NOTE Les équipes de lutte contre l'incendie peuvent pénétrer dans le local où se trouve l'appareillage selon les termes décrits dans les réglementations locales.

Tableau B.4 – Mesures de sécurité supplémentaires

Sujet	Echappement anormal de SF ₆ fortement décomposé	Echappement anormal de SF ₆ très faiblement décomposé ou faiblement décomposé
Risque potentiel	Fumées ou substances de nettoyage Privation d'O ₂ Echappement anormal de SF ₆ Produits de décomposition gazeux réactifs résiduels Produits de décomposition solides	Fumées ou substances de nettoyage Privation d'O ₂ Echappement anormal de SF ₆
Mesures de sécurité	Élimination des produits de décomposition solides Ventilation Mesure de la concentration en O ₂ à l'entrée Port d'équipement individuel de protection	Ventilation Mesure de la concentration en O ₂ à l'entrée
Matériel et outils de sécurité	Ventilateur d'aspiration ou aspirateur Dispositif de mesure de la concentration en O ₂ Vêtements de protection à usage unique, couvre-chaussures, protection capillaire Gants de sécurité à l'épreuve des acides Masque facial intégral (préférentiel) ou au moins masque de protection respiratoire et lunette de protection	Ventilateur d'aspiration ou aspirateur Dispositif de mesure de la concentration en O ₂

Les mêmes règles s'appliquent aux zones situées au-dessous du niveau auquel le rejet s'est produit, zones mal ventilées ou non ventilées (par exemple, tranchées de câbles, puits d'inspection, systèmes de drainage). Le matériel extérieur nécessite d'appliquer des mesures standard pour conditions extérieures (par exemple, protection contre la pluie, protection contre le vent). Une ventilation naturelle est normalement suffisante pour empêcher le risque potentiel de privation d'O₂.

Il convient qu'une deuxième personne en contact visuel et audible permanent soit présente, lors de la pénétration dans des zones pouvant présenter une concentration faible en oxygène.

B.3 Équipements et traitement de premiers soins

B.3.1 Généralités

L'équipement de premiers soins comporte:

- l'équipement industriel normal de premiers soins incluant un équipement de lavage des yeux contenant une solution saline,
- un moyen pour entrer en contact avec les services de secours;
- des directives de médecins.

Il convient que l'application des règles générales de sécurité (voir B.1) réduise au minimum la probabilité d'accident. En cas d'accident, il convient d'appliquer un traitement de premiers soins comme décrit dans les paragraphes suivants.

B.3.2 Irritation de la peau

En cas de signes d'irritation de la peau, le personnel est extrait de la zone. Les vêtements contaminés sont retirés et la partie affectée est lavée à l'eau courante fraîche. Il convient de rechercher les conseils de médecins.

NOTE Lors de la recherche de conseils de médecins, la partie affectée peut être traitée avec un gel de gluconate de calcium (gel antidote du HF) à titre de remède après lavage de l'acide fluorhydrique sur la peau.

B.3.3 Irritation des yeux

En cas de signes d'irritation des yeux, le personnel évacue la zone. Une irrigation de l'œil ou des yeux est effectuée immédiatement et sans interruption jusqu'à ce qu'un médecin conseille au patient de l'interrompre.

B.3.4 Difficultés respiratoires

Il convient que l'ensemble du personnel évacue immédiatement la zone affectée et se dirige vers de l'air frais. Il convient d'enlever les vêtements contaminés portés par une personne ayant des difficultés respiratoires et de couvrir cette personne d'une couverture en la maintenant au calme et sous observation continue. Une assistance médicale d'urgence doit être recherchée sans retard. Si le patient arrête de respirer, du personnel formé et qualifié doit immédiatement commencer à pratiquer la respiration artificielle.

Annexe C (informative)

Formation et certification

C.1 Généralités

En raison de la nature de la technique utilisée pour les appareillages électriques utilisant du SF₆, les aspects de sécurité fonctionnelle et d'environnement sont liés intrinsèquement et étroitement et il convient donc de les traiter en même temps.

Les articles suivants se concentrent sur la formation effectuée pour s'assurer que les exigences de sécurité fonctionnelle et les aspects concernant l'environnement sont satisfaits en ce qui concerne l'appareillage électrique utilisant du SF₆.

Le travail sur un appareillage électrique nécessitant la manipulation de gaz (par exemple, mise au point, fabrication, essai, mise en place, mise en service, maintenance, réparation, entretien et démontage en fin de vie) est réalisé, soit par du personnel certifié, soit sous le contrôle de personnel certifié. La formation est d'une importance primordiale pour le personnel impliqué. La formation peut être effectuée en différents lieux (par exemple, dans un centre spécial de formation de l'utilisateur, chez le fabricant ou sur le site lors de la mise en place, la mise en service et la maintenance du matériel installé).

Étant donnée la nature spécifique de l'industrie et de l'appareillage électrique, la sécurité et la continuité du service sont très importants. À l'exception du module de formation générale (module A, sensibilisation, voir C.2.2), le domaine d'application de la formation concerne une conception spécifique (par exemple, disjoncteur de circuit oscillant sous haute tension, appareillage moyenne tension, appareillage à haute tension isolé au gaz) et des conceptions différentes nécessitent une certification par des formations différentes.

Dans tous les cas, il convient de fonder l'information sur les réglementations locales, les manuels d'instructions d'exploitation du matériel, les fiches de caractéristiques des matériels, les normes internationales et les brochures du CIGRE.

C.2 Exemple de modules de formation

C.2.1 Généralités

En fonction des différents systèmes à pression scellés conformément aux définitions données en 2.11 et 2.12, il convient de choisir en conséquence le programme de formation individuelle et sa composition en modules, en tenant compte du fait que par définition, les systèmes étanches sous pression ne nécessitent pas de manipulation de gaz pour la maintenance pendant toute leur durée de vie.

Les travailleurs manipulant du SF₆ doivent être habitués aux aspects de sécurité, de réglementation et d'environnement, aux propriétés des gaz, aux outils et matériels de manipulation de gaz et aux procédures permettant de garantir la continuité du service et de minimiser les émissions de SF₆.

La formation est organisée en modules avec l'intention de satisfaire aux besoins du type de travail à effectuer sur l'appareillage électrique. Ces modules sont les suivants:

- Module A: Sensibilisation;
- Module B1: Maintenance ne nécessitant pas de récupération de gaz;
- Module B2: Installation et mise en service;

- Module C1: Maintenance ou réparation impliquant la récupération du gaz (par exemple, extension pendant la durée de vie incluse);
- Module C2: Mise hors service de l'appareillage électrique en fin de vie.

Les modules sont décrits de manière détaillée dans les paragraphes qui suivent.

C.2.2 Module A – Sensibilisation

Ce module constitue le niveau de base de la formation exigée et s'applique à toutes les fonctions impliquées, en particulier pour:

- le personnel des entreprises auquel leur direction a confié la responsabilité des processus et le propre personnel ou celui des tierces parties associées travaillant sur du matériel rempli de SF₆ indépendamment du fait que la manipulation du SF₆ soit ou non impliquée;
- tout le personnel travaillant avec du matériel rempli de SF₆ indépendamment du fait que la manipulation du SF₆ soit ou non impliquée.

Aucun préalable n'est requis pour participer à la formation.

Il convient que tout le personnel travaillant à proximité de matériel rempli de SF₆ soit conscient des règles générales de sécurité indiquées en B.1.

La formation traite les aspects suivants:

- connaissance de base des questions liées à l'environnement (par exemple, modifications climatiques, protocole de Kyoto, potentiel de réchauffement de la planète, voir Annexe F);
- pertinence pour l'environnement des émissions de SF₆ et approches de limitation [19];¹
- caractéristiques physiques, chimiques et d'environnement du SF₆ (voir Annexe E);
- utilisation du SF₆ dans les appareillages électriques;
- existence de réglementations locales et de normes internationales;
- sécurité du personnel et premiers soins (par exemple, réglementations locales, plans d'urgence et instructions par exemple en cas d'asphyxie, d'arc interne); (voir Annexe B);
- manipulation, dangers et caractéristiques pour la santé du SF₆ (voir E.5);
- conception de l'appareillage électrique (propriétés et applications/fonctionnalités).

C.2.3 Module B1 – Maintenance n'impliquant pas de récupération du gaz

Ce module fournit le premier niveau intermédiaire de formation exigé pour le personnel qui doit:

- vérifier sur le site la qualité du SF₆;
- effectuer une opération de nouvelle opération de remplissage du SF₆.

Il convient que le personnel soit titulaire d'un certificat du module A pour prétendre à la formation du module B1. En variante, une session de formation combinée couvrant à la fois les modules A et B1 est acceptable.

La formation traite les aspects suivants:

- existence de réglementations locales et de normes internationales en relation avec les tâches;

¹ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

- qualité du SF₆ selon la CEI 60376 (SF₆ de qualité technique) et la CEI 60480 (SF₆ réutilisable);
- manuels d'instructions fournis par le fabricant du matériel d'origine en relation avec les tâches;
- sécurité du personnel et premiers soins (par exemple, matériel de sécurité exigé pour la protection du personnel), (voir Annexe B);
- types de compartiments à remplissage de SF₆ (voir 2.9, 2.10, 2.11 et 2.12);
- instruments et procédures pour vérifier la qualité du SF₆ (voir 4.2 et D.4);
- procédures de nouvelle opération de remplissage des systèmes à pression entretenue (voir 4.1 et Annexe D);
- méthodes de détection des fuites et techniques de réparation;
- catégories de récupération et de réutilisation du SF₆ (voir 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17, 2.18, 2.19 et 2.20);
- stockage et transport du SF₆ (voir Annexe A);
- surveillance du SF₆ gazeux et enregistrement approprié de données associées aux obligations locales pour l'environnement.

C.2.4 Module B2 – Installation et mise en service

Ce module fournit le deuxième niveau intermédiaire de formation exigé pour le personnel effectuant l'installation et la mise en service sur le site de l'appareillage électrique.

Il convient que le personnel soit titulaire d'un certificat du module B1 pour prétendre à la formation du module B2. En variante, une session de formation combinée couvrant à la fois les modules A, B1 et B2 est acceptable.

La formation traite les aspects suivants:

- existence de réglementations locales et de normes internationales en relation avec les tâches;
- manuels d'instructions fournis par le fabricant du matériel d'origine en relation avec les tâches;
- sécurité du personnel et premiers soins (par exemple, travail sur des compartiments de gaz ouverts en relation avec la tâche) (voir Annexe B);
- procédures d'évacuation de l'air et de remplissage du SF₆ (voir 3.2);
- procédures de remplissage avec du SF₆ (voir 3.3);
- procédure de récupération et de régénération de SF₆ très faiblement décomposé (voir 5.2);
- appareils de manipulation du SF₆ en relation avec les tâches (voir Annexe D).

C.2.5 Module C1 – Maintenance ou réparation impliquant la récupération du gaz

Ce module fournit le premier niveau avancé de formation exigé pour le personnel qui doit:

- exécuter la maintenance ou la réparation d'appareillage électrique utilisant du SF₆, ce qui inclut la récupération de gaz, la régénération ainsi que la manipulation appropriée des produits de décomposition;
- réaliser une extension supplémentaire de l'appareillage électrique pendant sa durée de vie.

Il convient que le personnel soit titulaire d'un certificat du module B1 pour prétendre à la formation du module C1. En variante, une session de formation combinée couvrant à la fois les modules A, B1 et C1 est acceptable. Le module B2 peut être ajouté en option.

La formation traite les aspects suivants:

- existence de réglementations locales et de normes internationales en relation avec les tâches;
- manuels d'instructions fournis par le fabricant du matériel d'origine en relation avec les tâches;
- sécurité du personnel et premiers soins (par exemple, matériel de sécurité exigé pour la protection du personnel, travaillant sur des compartiments de gaz ouverts en relation avec la tâche, neutralisation et manipulation des produits de décomposition);
- procédures pour pénétrer dans le local où se trouve l'appareillage en cas d'un rejet anormal de SF₆ due à un feu ou un arc interne (voir B.2);
- procédure de récupération et de régénération de SF₆ faiblement décomposé et fortement décomposé (voir 5.3);
- appareils de manipulation du SF₆ en relation avec la tâche (voir Annexe D).
- procédures de manipulation, neutralisation et élimination des produits de décomposition (voir B.1.3);
- manipulation du matériel et des outils de sécurité ayant été en contact avec des produits de décomposition solides (voir B.1.3).

C.2.6 Module C2 – Mise hors service de l'appareillage électrique en fin de vie

Ce module constitue le deuxième niveau avancé de formation exigé pour le personnel auquel il est demandé de mettre hors service l'appareillage électrique en fin de vie.

Il convient que le personnel soit titulaire d'un certificat du module C1 pour prétendre à la formation du module C2. En variante, une session de formation combinée couvrant à la fois les modules A, B1, C1 et B2 est acceptable. Le module B2 peut être ajouté en option.

La formation traite les aspects suivants:

- existence de réglementations locales et de normes internationales en relation avec les tâches;
- manuels d'instructions fournis par le fabricant du matériel d'origine en relation avec les tâches;
- transport de l'appareillage électrique jusqu'au site de démontage, s'il y a lieu (voir A.4);
- démontage du matériel et tri des pièces (voir Article 6);
- instructions fournies par le fabricant du matériel d'origine concernant l'utilisation de systèmes de perçage étanches pour récupérer le SF₆ de l'appareillage électrique, s'il y a lieu.

C.3 Certification

Réussite complète à la formation conduisant à une certification maison, où «certification maison» signifie un certificat de compétence ou autre confirmation écrite, délivré par un employeur à l'un de ses propres employés ou à des personnes externes ayant terminé avec succès un cours de formation relatif au travail correspondant. Des sessions d'examens théoriques et pratiques sont organisées pour prouver la compétence et l'aptitude obtenues. Toutefois, toute certification exigée par les réglementations locales a priorité sur la présente norme.

Il convient de conserver des archives concernant:

- l'enregistrement de la date à laquelle la formation a été effectuée ainsi que le contenu de la formation;

- l'identification de la tâche et du personnel de conception du matériel qui ont été certifiés (par exemple, récupération de SF₆).
- la limitation de performance de la tâche (par exemple, récupération de SF₆ pour une certaine conception) au personnel ayant été certifié (par exemple, modules C1 et C2);
- maintien d'un haut niveau d'expertise.

Annexe D (informative)

Description des appareils de manipulation du SF₆

D.1 Généralités

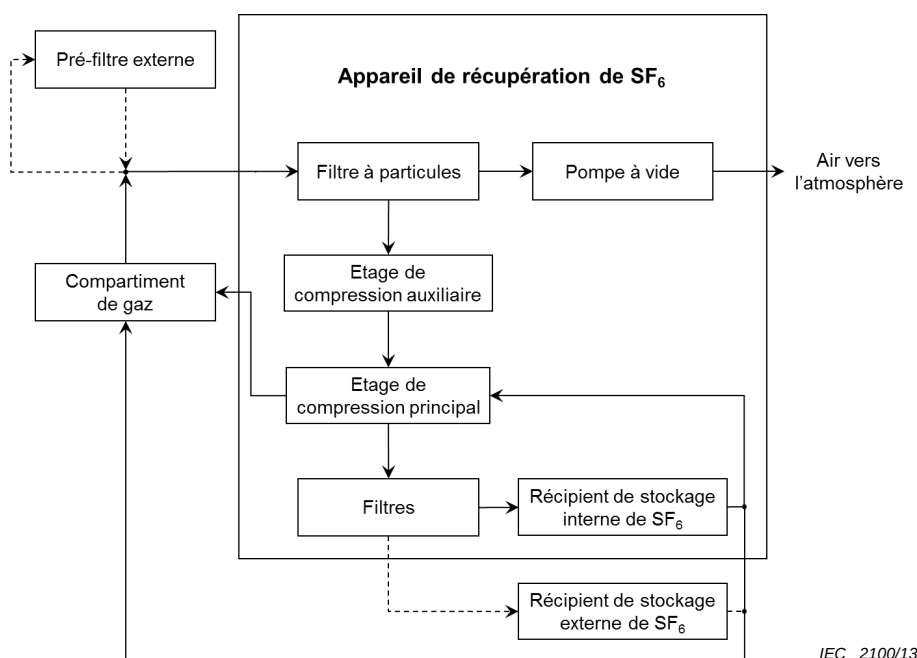
Cette annexe donne des informations concernant la fonctionnalité et les critères de performance minimums des appareils de manipulation du SF₆ et des composants spécifiques.

D.2 Appareil de récupération

D.2.1 Généralités

Il convient de choisir le type et la taille appropriés de l'appareil de récupération en fonction de la quantité de SF₆ à manipuler. La Figure D.1 représente l'aménagement fonctionnel de base d'un appareil de récupération polyvalent. Les fonctions type d'un appareil de récupération standard sont les suivantes:

- évacuation de l'air du compartiment de gaz;
- remplissage de SF₆ dans le compartiment de gaz;
- récupération du SF₆ du compartiment à remplissage de gaz;
- stockage et filtrage du SF₆;
- remplissage du compartiment de gaz avec l'air ambiant;
- transfert de bouteille à bouteille (ou réservoir de stockage).



IEC 2100/13

Figure D.1 – Appareil de récupération polyvalent

D.2.2 Pré-filtres externes

Un pré-filtre externe est exigé pour récupérer le SF₆ usagé. Les produits de décomposition gazeux réactifs sont des composés acides et peuvent endommager l'appareil de récupération ou le récipient de stockage de gaz. Les exigences de l'unité de pré-filtrage sont fondamentalement les mêmes que celles des unités de filtrage installées dans l'appareil de

récupération polyvalent, mais la capacité de pré-filtrage peut être considérablement supérieure. Si l'on s'attend à une contamination potentielle d'huile du SF₆ (récupération de gaz d'un disjoncteur à pression double ou due à un compartiment de gaz accidentellement contaminé), l'utilisation d'une unité de pré-filtrage au charbon actif est recommandée.

Les principales caractéristiques recommandées sont les suivantes:

- dimension des pores inférieure à 10 µm (faible résistance de flux de traversée);
- humidité résiduelle inférieure à 200 µl/l;
- produits de décomposition gazeux réactifs résiduels inférieurs à 200 µl/l.

D.2.3 Filtres

D.2.3.1 Généralités

Des filtres sont exigés pour éliminer les produits de décomposition gazeux réactifs, l'humidité et les particules solides ou les gouttelettes d'huile avant stockage du SF₆ dans un récipient, permettant ainsi sa réutilisation. Ces filtres sont installés dans l'appareil de récupération.

Le Tableau D.1 indique les types de filtres types utilisés pour la régénération du SF₆.

Tableau D.1 – Modèles de filtres types utilisés lors de la régénération du SF₆

Type de filtre	Tâche	Caractéristiques principales
Filtre à particules	Élimine les produits de décomposition solides et les autres particules à l'entrée de l'appareil de récupération.	Dimension des pores inférieure à 1 µm.
Filtre sec	Élimine les produits de décomposition gazeux réactifs et l'humidité.	Humidité résiduelle inférieure à 100 µl/l. SO ₂ +SOF ₂ résiduels inférieurs à 12 µl/l. Aptitude à la rétention de particules.
Filtre d'huile	Élimine l'huile si demandé.	Filtre spécial utilisant du charbon actif.

D.2.3.2 Filtre à particules

Certains produits de décomposition qui sont générés pendant les opérations de permutation sont constitués de fines particules solides (par exemple, des particules métalliques, des produits de décomposition solides). La face interne du filtre à particules est constituée de papier fait d'un tissu lié approprié capable de retenir les particules de dimension supérieure à 1 µm. Le filtre à particule est normalement installé à l'entrée et en amont de la sortie de l'appareil de récupération pour protéger les pièces de l'appareil de récupération ainsi que du récipient de stockage de gaz.

D.2.3.3 Filtre sec

Les filtres appropriés peuvent adsorber l'humidité et les produits de décomposition gazeux réactifs. Ils sont principalement utilisés en combinaison avec le filtre à particules. On utilise des tamis moléculaires dont la dimension des pores est inférieure à 0,5 nm. Si l'on utilise une plus grande taille de pores, dans certaines conditions, des réactions thermodynamiques exothermiques peuvent se produire, produisant une surchauffe importante du filtre.

Il convient de ne pas utiliser la chaux sodée (NaCO₃) comme matériau de filtrage pour le SF₆ car, le contact avec certains produits de décomposition gazeux réactifs produits du CO₂, qui est difficile à éliminer du SF₆.

D.2.3.4 Filtre d'huile

Il convient d'insérer un piège à huile dans le cycle de SF₆ si l'on utilise une machine lubrifiée par de l'huile, ou si un composant électrique isolé par de l'huile est inclus dans l'appareillage électrique utilisant le SF₆. L'élimination de l'huile est effectuée en plusieurs étapes de manière à éviter la diffusion de l'huile.

NOTE Pour réduire au minimum le risque de contamination de l'huile, l'utilisation de matériel lubrifié par de l'huile n'est pas recommandée. L'expérience a montré que la maintenance et l'inefficacité des filtres de séparation d'huile sur un tel matériel augmente d'une manière inacceptable le risque de contamination par de l'huile.

D.2.4 Pompe à vide

La pompe à vide est utilisée pour vider le compartiment/le récipient/la bouteille d'échantillon de gaz des gaz différents du SF₆, généralement de l'air ou du N₂ de manière à éviter de mélanger le SF₆ avec d'autres gaz.

Il convient que la pression résiduelle à l'entrée de la pompe à vide soit inférieure à 100 Pa. Pour accélérer le vidage des compartiments de gaz, l'utilisation de pompes à vide avec une pression résiduelle à l'entrée inférieure à 10 Pa est recommandée.

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 à vide thermique dépendent du type de gaz et ne sont pas recommandés car ils réagissent avec les vapeurs de SF₆ de manière différente, ce qui donne une lecture de vide erronée.

Un robinet est recommandé pour couper la liaison entre le compartiment de gaz et la pompe à vide. Il convient que le robinet se ferme automatiquement après avoir arrêté la pompe à vide de manière à éviter la diffusion d'huile dans le compartiment de gaz.

Il convient que la capacité de la pompe à vide soit appropriée au volume du compartiment de gaz et au temps de vidage. Le diamètre du connexion est également d'une grande importance. Pour un compartiment de gaz d'un volume de 1 000 l, un diamètre de connexion de 20 mm est recommandé. Si l'on utilise des diamètres plus petits, le processus de vidage dure beaucoup plus longtemps et peut difficilement être amélioré en utilisant une pompe à vide de plus grande capacité.

D.2.5 Compresseurs principal et auxiliaire

Lorsque la pression de SF₆ dans le compartiment à remplissage de gaz est supérieure à la pression dans le récipient de stockage, il est plus rapide de permettre une expansion directe du gaz. Dans tous les autres cas, un compresseur est nécessaire pour récupérer le gaz. Puisque la pression dans le compartiment à remplissage de gaz peut varier dans une très large gamme, il convient d'utiliser un système à deux compresseurs:

- le compresseur principal, utilisant habituellement un compresseur de type à piston, fonctionnant entre une pression d'entrée de gaz d'environ 100 kPa (généralement supérieure à 50 kPa) et la pression dans le récipient de stockage de gaz;
- le compresseur auxiliaire, relié en série si nécessaire, fonctionne entre la pression dans le compartiment à remplissage de gaz et la pression à l'entrée du compresseur principal.

NOTE 1 Presque tous les types de compresseur de type à piston peuvent être utilisés, toutefois, les compresseurs fonctionnant à sec sont préférés pour éliminer la possibilité de contamination par de l'huile. Les compresseurs les plus récents permettent d'obtenir une pression de 100 Pa à l'entrée.

NOTE 2 Une pression de sortie assignée de 2,5 MPa du compresseur suffit pour stocker du SF₆ sous forme gazeuse (une pression de 5 MPa est recommandée). Un dispositif de refroidissement supplémentaire peut être utilisé pour accélérer la récupération de SF₆.

D.2.6 Récipients de stockage de gaz externes et internes

Des récipients sous pression du commerce ou des récipients de stockages spéciaux pour SF₆ usagé sont disponibles en tant que récipients de stockage de gaz. Ils sont portables, fixes ou installés dans l'appareil de récupération. Seuls des récipients spécialement approuvés pour le stockage et le transport du SF₆ sont autorisés. Il convient que la pression maximale du récipient de stockage soit appropriée à la pression finale du compresseur. Les réglementations locales pour l'exploitation des récipients sous pression doivent être observées. Pour les récipients de stockage avec stockage de SF₆ liquide, une pression assignée de 5 MPa est utilisée.

D.2.7 Évaporateur et appareil de chauffage des récipients de stockage de gaz

Si le SF₆ est stocké sous forme liquide et utilisé en tant que gaz, des pertes thermiques dues à l'évaporation à l'intérieur du récipient peuvent provoquer le refroidissement du SF₆ lui-même jusqu'à une température à laquelle il ne s'évapore plus. Ceci peut habituellement être observé par un anneau/une ligne de givre visible sur le réservoir. Pour remplir rapidement de grands volumes, il convient de concevoir le ou les récipients de stockage de l'appareil de récupération de manière à extraire le SF₆ liquide qui est ensuite vaporisé à l'intérieur d'un évaporateur. L'évaporateur est conçu de telle sorte qu'aucun liquide ne puisse atteindre le compartiment de gaz.

Les appareils de chauffage du récipient de stockage de gaz sont conçus de manière à éviter une surchauffe accidentelle et pour ne pas dépasser une température de gaz de 60 °C.

D.2.8 Conduites de gaz et connexions de tuyauteries

Il convient de concevoir les conduites de gaz et les connexions de tuyauteries de façon à éviter les rejets et la corrosion. On peut utiliser à cet effet du cuivre et du laiton ou de l'acier inoxydable. Il convient que la conception à la fois de la tuyauterie et des connexions tiennent compte des vibrations de telle sorte que des opérations périodiques telles qu'un resserrage des connexions ne soient pas nécessaires.

D.2.9 Instruments de contrôle

Il convient de prévoir des jauges de contrôle pour indiquer la pression de gaz dans le compartiment à remplissage de gaz, le niveau de vide, la température du gaz, etc. Il convient de les disposer dans une position telle qu'elles puissent être observées lors du lancement des opérations de l'appareil de récupération polyvalent. Il convient que la précision et la résolution des jauges soient adéquates pour permettre la conservation des conditions de fonctionnement de sécurité.

D.2.10 Soupapes de sûreté

Des soupapes de sûreté sont utilisées dans le cycle de SF₆ pour limiter la pression. Les réglementations locales de sécurité sont suivies. Il convient d'utiliser des soupapes de sûreté qui ne libèrent pas directement le SF₆ vers l'atmosphère.

D.3 Connexions de tuyaux flexibles

L'appareil de récupération, le récipient de stockage de gaz et le compartiment de gaz sont reliés par l'intermédiaire de connexions de tuyaux flexibles. Il convient d'apporter un soin particulier de manière à éviter la présence d'air ou d'autres composés à l'intérieur des tuyaux afin de diminuer la possibilité de contamination du gaz. Pour cette raison, des connexions de tuyaux avec couplage à fermeture automatique et étanchéité au vide sont exigées. Des tuyaux appropriés, généralement réalisés en caoutchouc synthétique ou en acier inoxydable flexible, capables de supporter le vide et la perméation sont exigés.

D.4 Dispositifs portables de mesure de gaz

D.4.1 Généralités

Le Tableau D.2 fournit une étude des dispositifs de mesure de gaz incluant les valeurs recommandées pour la plage, la température de fonctionnement et la précision minimale. Ces grandeurs sont généralement déclarées par le fabricant de dispositifs portables pour la mesure des gaz dans la fiche technique.

Tableau D.2 – Dispositifs de mesure de gaz

Dispositif	Mesure	Gamme	Température de fonctionnement	Exactitude minimale
Appareil de mesure de point de rosée	Humidité	Point de rosée: -50 °C à 0 °C	-10 °C à 40 °C	± 2 °C
Mesure du pourcentage de SF ₆	Pourcentage de SF ₆ SF ₆ /N ₂ ou SF ₆ /air Pourcentage de SF ₆ SF ₆ /CF ₄	0 ml/l à 1 000 ml/l	-20 °C à 40 °C	± 10 ml/l ± 20 ml/l
Analyseurs de produits de décomposition gazeux réactifs	Les produits de décomposition sont par exemple SO ₂ un nuage d'huile	1 µl/l à 25 µl/l 0,16 µl/l à 1,6 µl/l	-10 °C à 40 °C	± 15 % de la pleine gamme
Manomètre de SF ₆	Pression	0 MPa à 1 MPa	-20 °C à 40 °C	± 10 kPa
Thermomètre	Température	-25 °C à 70 °C	-25 °C à 70 °C	± 1 °C

Les mesures de gaz sont généralement indiquées et rapportées à 20 °C. Les mesures prises à d'autres températures doivent être corrigées de façon adéquate.

Des mesures de qualité de gaz peuvent être effectuées dans les conditions de laboratoire et sur le site. Les paragraphes qui suivent décrivent les appareils portables les plus couramment utilisés sur le site pour la mesure de:

- la teneur en humidité dans les gaz;
- le pourcentage de SF₆/quantité de gaz inertes;
- la quantité totale de produits de décomposition gazeux réactifs conduisant à une teneur en acidité résiduelle.

Le matériel le plus récent permet de mesurer simultanément tous les paramètres des contaminants en utilisant un seul dispositif en prélevant un seul échantillon et il est également capable d'effectuer un pompage en retour du SF₆ dans le compartiment de gaz.

D.4.2 Appareil de mesure de point de rosée

La teneur en humidité peut être mesurée en utilisant différents principes de mesure et instruments de mesure. Cependant, un appareil de mesure de point de rosée est l'appareil portable le plus courant utilisé à cet effet. Cet appareil mesure le point de rosée du gaz, exprimé en °C, et il peut le convertir en concentration massique relative, exprimée en mg/ kg.

Les caractéristiques souhaitables sont les suivantes:

- capteur résistant aux traces d'huile et aux gaz corrosifs;
- tuyaux résistant à la perméation utilisant des connexions de robinet auto-obturants;
- tuyaux en acier inoxydable et connexions réalisées en matériaux hydrophobes, par exemple, PTFE;

- étalonnés ou capables d'étalonnage sur le site;
- aucun rejet de SF₆ gazeux vers l'environnement (par exemple, petit compresseur pour nouvelle opération de remplissage de gaz ou utilisation d'une bouteille vide);
- moins de 6 g de gaz utilisés par mesure;
- durée moyenne pour obtenir la lecture inférieure à 5 min.

D.4.3 Dispositif de mesure du pourcentage de SF₆

Des dispositifs qui comparent la vitesse du son ou la conductivité thermique dans le mélange de SF₆ gazeux avec du SF₆ pur sont utilisés pour déterminer le pourcentage de SF₆. Les systèmes basés sur la vitesse du son sont rapides (temps de réponse inférieur à 1 min), ne nécessitent pas de réétalonnage et n'utilisent qu'une quantité de gaz minimale. On y lit la concentration de SF₆ exprimée en % de volume. Ils sont principalement étalonnés pour des mélanges de SF₆ et de N₂ ou d'air ou peuvent être étalonnés pour des mélanges SF₆/CF₄.

Les caractéristiques souhaitables sont les suivantes:

- aucun rejet de SF₆ gazeux vers l'environnement (par exemple, petit compresseur pour nouvelle opération de remplissage de gaz ou utilisation d'une bouteille vide);
- moins de 3 g de gaz utilisés par mesure;

Il convient de ne pas utiliser les dispositifs mesurant la concentration des gaz non réactifs (par exemple, les capteurs d'oxygène) et calculant ensuite le pourcentage en volume de SF₆, car des gaz non réactifs différents tels que N₂ ou CF₄ peuvent être présents.

D.4.4 Analyseurs de produits de décomposition gazeux réactifs

Diverses méthodes sont disponibles pour l'essai des produits de décomposition gazeux réactifs. La pratique courante et recommandée consiste à effectuer l'essai du niveau de SO₂ dans le SF₆. Ces essais peuvent être réalisés en utilisant, soit des tubes réactifs (les tubes à réaction changent de couleur initiale si du SF₆ contenant du SO₂ les traverse), soit en utilisant un capteur électrochimique. Les capteurs électrochimiques ainsi que les tubes à réaction de SO₂ sont également sensibles au SOF₂.

Les caractéristiques souhaitables sont les suivantes:

- sensibilité connue au SO₂ et SOF₂;
- tuyaux de connexion résistant aux produits de décomposition gazeux réactifs et utilisant des connexions de robinet auto-obturants;
- aucun rejet de SF₆ gazeux vers l'environnement (par exemple, petit compresseur pour nouvelle opération de remplissage de gaz ou utilisation d'une bouteille vide);
- moins de 6 g de gaz environ utilisés par mesure.

L'utilisation de tubes à réaction sensibles au HF n'est pas recommandée, car le HF réagit très rapidement avec les surfaces métalliques en formant une couche de surface de fluorures métalliques.

D.5 Détecteurs de SF₆ portables

Les détecteurs de SF₆ portables appartiennent globalement à trois types:

- Les détecteurs à infrarouge photo-acoustiques sont basés sur les ondes de pression émises par les molécules de SF₆ lorsqu'elles sont éclairées par de la lumière infrarouge monochromatique. Des microphones spéciaux détectent le signal acoustique qui est directement proportionnel à l'énergie absorbée. On peut obtenir des sensibilités descendant jusqu'à 0,01 µV/l (10 ppbv) ce qui est bien supérieur aux autres méthodes.

D'autre part, le temps de réponse d'environ 15 s empêche d'utiliser le dispositif pour la localisation des fuites.

- Détecteur à capture d'électrons utilisant une source de particules β pour ioniser un échantillon pompé. On mesure le courant d'ions entre les électrodes. On utilise habituellement un support gazeux inerte. Ce type est beaucoup plus coûteux et considérablement moins portable que les cellules à décharge par effet couronne qui sont décrites ci-dessous. On peut atteindre des sensibilités de SF_6 dans l'air descendant jusqu'à $0,1 \mu\text{l/l}$ ($0,1 \text{ ppmv}$).
- Cellule à décharge par effet couronne utilisant une haute tension (1 kV à 2 kV) appliquée à une configuration d'électrode plane ponctuelle. On mesure le courant de décharge. Ce type de détecteur est utilisé dans une diversité d'unités hautement portables alimentées par batterie de coût relativement modique. On peut obtenir des sensibilités inférieures à $10 \mu\text{l/l}$ (10 ppmv), mais pas avec toutes les unités disponibles [14].

On utilise généralement des détecteurs photo-acoustiques et à capture d'électrons pour le suivi et la quantification des rejets.

Si elles sont suffisamment sensibles, les cellules à décharge par effet couronne peuvent être appropriées pour évaluer si une zone contient du SF_6 ou pour la détection des rejets.

D.6 Systèmes de détecteurs de SF_6 à alarme

Les systèmes d'alarme nécessitent des détecteurs ayant une très grande stabilité à long terme. La caractéristique d'absorption des infrarouges du SF_6 est utilisée comme base pour la majeure partie des détecteurs de ce type [15]. On utilise une source d'infrarouges pour chauffer un échantillon de gaz dans un dispositif de mesure de pression différentielle utilisant un transducteur sensible à la capacité. On mesure l'augmentation de pression.

On peut atteindre des sensibilités descendant jusqu'à $10 \mu\text{l/l}$ (10 ppmv). Des installations d'étalonnage automatique peuvent être incorporées. Dans certaines installations, des échantillons d'air sont prélevés par tuyau de divers points jusqu'à un détecteur central. Le point de détection active peut être choisi automatiquement ou manuellement.

Les systèmes d'alarme comportant des détecteurs de SF_6 ne sont généralement utilisés que lorsque de très grands volumes de SF_6 sont contenus dans du matériel logé en intérieur, par exemple, dans des installations de GIS haute tension.

D.7 Bouteilles pour échantillons de gaz

Des bouteilles d'acier inoxydable d'un volume inférieur à 1 l sont recommandées. Il convient que la quantité de gaz ne soit pas inférieure à 6 g. Il convient d'échantillonner directement le gaz depuis le récipient (par exemple, compartiments à remplissage de gaz, récipient de stockage de gaz de l'appareil de récupération) en utilisant des connexions appropriées. Si la pression dans le récipient de gaz dépasse la pression maximale admissible de la bouteille, il convient alors d'utiliser un régulateur de pression et un manomètre de pression.

D.8 Dispositif de mélange de gaz

La Figure D.2 est un dispositif de mélange de gaz utilisé pour mélanger du SF_6 avec un gaz complémentaire, généralement N_2 ou CF_4 , conformément à un rapport de gaz sélectionné à l'avance lors du remplissage de l'appareillage électrique.

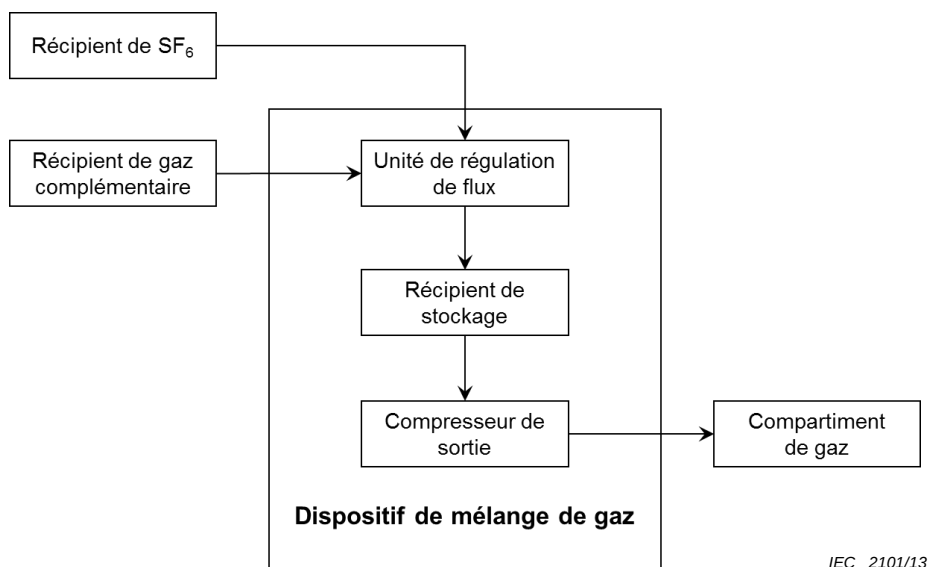


Figure D.2 – Dispositif de mélange de gaz

Le flux de SF_6 et de gaz complémentaire est commandé par l'unité de commande de flux de telle sorte que le récipient de gaz soit rempli du mélange présélectionné. La pression de sortie (c'est-à-dire, la pression de remplissage du compartiment de gaz) est régulée par le compresseur de sortie.

Les caractéristiques souhaitables sont les suivantes:

- pourcentage et pression de sortie (c'est-à-dire, pression de remplissage) de SF_6 réglables;
- rapport de mélange de gaz (c'est-à-dire, pourcentage de SF_6): 10 % à 80 % par volume;
- pression de sortie maximale: jusqu'à 1,0 MPa;
- entrée de SF_6 à l'état liquide;
- possibilité de mélange de petites quantités ainsi que de grandes quantités de gaz.

Annexe E (informative)

Hexafluorure de soufre

E.1 Généralités

L'hexafluorure de soufre (SF_6) est un gaz de synthèse formé de 6 atomes de fluor rassemblés autour d'un atome de soufre disposé de manière centrale. On sait que la liaison chimique entre le fluor et le soufre est l'une des liaisons atomiques existantes les plus stables. Six d'entre elles confèrent à la molécule une très grande stabilité chimique et thermique.

Le SF_6 est fortement électronégatif (c'est-à-dire qu'il a tendance à attirer les électrons libres). Il possède une combinaison unique de propriétés physiques: forte rigidité électrique (environ 3 fois celle de l'air), grande capacité d'interruption thermique (environ 10 fois celle de l'air) et haute performance de transfert de chaleur (environ deux fois celle de l'air).

Pour cette raison, le SF_6 a été utilisé avec succès par l'industrie électrique depuis le début des années 1960 dans le matériel d'alimentation pour la transmission et la distribution d'électricité haute tension (par exemple, appareillage à haute tension et moyenne tension, postes isolés au gaz, unités principales de boucle, disjoncteurs, transformateurs, câbles).

D'autres applications industrielles non électriques comportent la production d'aluminium, le coulage de magnésium, la fabrication des semi-conducteurs, la fabrication des écrans plats, le cycle des carburants nucléaires, les fenêtres à isolation acoustique, les pneumatiques, les radars haute performance, les gaz traceurs pour les mesures météorologiques et dans les installations de centrales électriques, et les applications militaires.

E.2 Propriétés chimiques

Le SF_6 est inodore, sans saveur, incolore, non toxique, ininflammable, très stable et inerte. Sa solubilité dans l'eau est 4 fois plus faible que celle de l'air. Sa compatibilité avec les matériaux utilisés dans les constructions électriques est similaire à celle du N_2 , jusqu'à des températures d'environ 180 °C.

Le Tableau E.1 donne la liste des principales caractéristiques chimiques.

Tableau E.1 – Principales caractéristiques chimiques du SF_6 [16]

Formule	SF_6
Numéro CAS	2551-62-4
Poids moléculaire	146,05 g/mole
Teneur en soufre	21,95 %
Teneur en fluor	78,05 %
Structure moléculaire	Octaèdre avec les atomes de fluor aux six coins
Liaisons	Covalentes
Section de collision	0,477 nm
Température de décomposition dans un récipient en quartz	500 °C

NOTE Le numéro CAS est attribué par le Chemical Abstracts Service, qui possède un registre des informations sur les substances chimiques. Il n'a pas de signification chimique. L'accès aux informations se fait par l'intermédiaire d'un service d'abonnement.

E.3 Propriétés physiques

Le SF_6 est l'un des gaz connu les plus lourds: dans les conditions normales, il est environ cinq fois plus lourd que l'air.

Le mélange avec de l'air par convection et diffusion est lent, mais dès que les gaz ont été mélangés, ils ne se séparent plus.

La conductivité thermique du SF_6 est inférieure à celle de l'air, les propriétés de transfert global de chaleur sont de deux à cinq fois meilleures en raison de sa plus faible viscosité et de sa plus grande densité.

Dans un appareillage électrique, la gamme de pressions normales du SF_6 est comprise entre 0,1 MPa et 1,0 MPa absolu. Les caractéristiques de pression/température/densité du gaz sont représentées à la Figure E.1.

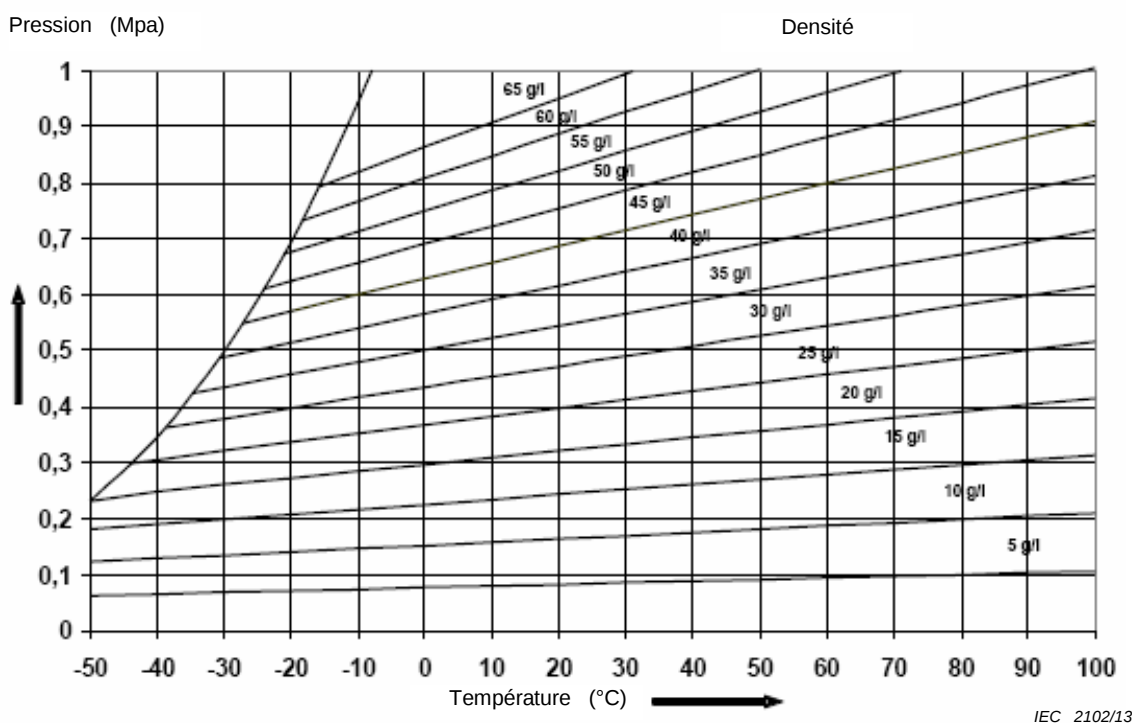


Figure E.1 – Caractéristiques de pression/température/densité du SF_6 [16]

Le Tableau E.2 donne la liste des principales caractéristiques physiques.

Tableau E.2 – Principales caractéristiques physiques du SF₆ [16]

Densité à 20 °C 100 kPa	6,07 kg/m ³
Conductivité thermique à 25 °C 100 kPa	0,013 W/(m.K)
Température critique	45,58 °C
Pression critique	3,759 MPa
Densité critique	740 kg/m ³
Solubilité dans l'eau à 20 °C	6,31 cm ³ SF ₆ / kg H ₂ O
Vitesse du son à 0 °C 100 kPa	129,06 m/s
Indice de réfraction	1,000 783
Chaleur de formation	- 1221,58 ± 1,0 kJ/mol
Entropie de réaction	-349,01 J/(mol.K)
Chaleur spécifique à pression constante à 20 °C 100 kPa	96,60 J/(mol.K)
Équation d'état	Voir Figure E.1

E.4 Propriétés électriques

Les excellentes propriétés diélectriques du SF₆ sont dues au fort caractère électronégatif de sa molécule. Elle possède une tendance prononcée à se lier avec des électrons libres formant des ions lourds avec une faible mobilité rendant très difficile le développement d'avalanche d'électrons.

La rigidité diélectrique du SF₆ est environ 3 fois plus grande que celle de l'air dans les mêmes conditions.

En raison de sa faible température de dissociation et de sa forte énergie de dissociation, le SF₆ est un excellent support d'extinction d'arc.

Lorsqu'un arc électrique se refroidit dans le SF₆, il reste conducteur à une température relativement basse, réduisant ainsi au minimum le découpage du courant avant un courant nul et évitant ainsi de fortes surtensions.

Le Tableau E.3 donne la liste des principales caractéristiques électriques du SF₆.

Tableau E.3 – Principales caractéristiques électriques du SF₆ [16]

Champ de claquage critique par rapport à la pression	89 V/(m × Pa)
Constante diélectrique relative à 25 °C et 0,1 MPa absolu	1,002 04
Facteur de perte (tan δ) à 25 °C et 0,1 MPa absolu	<2,0×10 ⁻⁷
Coefficient d'ionisation effective	$\frac{\alpha}{p} = A \frac{E}{p} - B$ α: m⁻¹ E: V/m p: Pa A: 2,8×10⁻²/V B: 89 V/(m×Pa)

E.5 Manipulation, dangers et caractéristiques sur la santé

SF₆ ne supporte pas la combustion. Puisque le gaz est beaucoup plus lourd que l'air, dans des conditions de mélange insuffisant avec l'air, le gaz a tendance à s'accumuler à de faibles niveaux. Les zones situées au-dessous du niveau du sol, les zones mal ventilées ou non ventilées (par exemple, les conduites de câble, les tranchées, les puits d'inspection, les systèmes de drainage), peuvent rester remplies de SF₆. Il convient que le personnel soit conscient du danger d'asphyxie à de tels emplacements. Il convient de ne pas pénétrer dans des chambres contenant du SF₆ sans une ventilation adéquate et un équipement individuel de protection.

Le SF₆ n'est pas toxique et est biologiquement inerte. Selon l'«American Conference of Governmental Industrial Hygienists» (ACGIH) la valeur limite de seuil (TLV) en termes de moyenne pondérée dans le temps (TWA) est de 1 000 µl/l (1 000 ppmv ou 6 100 mg/m³). Celle-ci est prévue pour des lieux de travail dans lesquels le personnel reste jusqu'à 8 h par jour, 5 jours par semaine [17]. Cette TLV est normalement adoptée pour tous les gaz inoffensifs qui ne sont pas présents dans l'atmosphère.

Le SF₆ est sans danger pour la vie ou l'écosystème mais il s'agit d'un gaz à effet de serre puissant et persistant, comme décrit à l'Annexe F.

Lorsqu'on manipule du SF₆, il est donc nécessaire d'adopter des procédures pour maintenir le gaz dans un cycle fermé, en évitant tout rejet délibéré dans l'environnement.

Du SF₆ de qualité technique est disponible dans le commerce, conformément à la CEI 60376.

Le SF₆ usagé est réutilisable sur le site, conformément à la CEI 60480.

Le SF₆ usagé est réutilisable par le fabricant du gaz, conformément à la spécification fournie par le fabricant du gaz. Si le gaz n'est pas conforme à la spécification, il est éliminé conformément aux réglementations locales ou internationales relatives à la gestion des déchets.

Annexe F (informative)

Effets du SF₆ sur l'environnement

F.1 Généralités

Toute activité humaine a un effet sur l'environnement; l'impact d'une activité particulière dépend de son importance sur les matériaux impliqués. Les activités dans lesquelles des gaz sont produits ou utilisés peuvent provoquer des rejets vers l'atmosphère. On considère trois aspects principaux:

- l'écotoxicologie: matériaux et gaz toxiques ayant un effet sur l'environnement et toutes les formes de vie;
- l'appauvrissement en ozone: augmentation des dimensions des trous dans la couche d'ozone stratosphérique;
- le réchauffement de la planète/changement climatique: augmentation de l'effet de serre.

F.2 Écotoxicologie

Le SF₆ n'est pas toxique et aucun potentiel d'écotoxicité aiguë ou chronique n'a été indiqué. Puisque sa solubilité dans l'eau est très faible, il ne présente aucun danger pour l'eau de surface et la nappe phréatique ou pour le sol. Il ne se produit pas d'accumulation biologique dans le cycle de nutrition. En conséquence, le SF₆ est inoffensif pour l'écosystème. Le SF₆ est:

- non cancérigène: il ne provoque pas de cancer;
- non mutagène: il n'endommage pas la constitution génétique;
- non nitrifiant: il n'enrichit pas la chaîne alimentaire;
- peu soluble dans l'eau.

F.3 Appauvrissement en ozone

Le SF₆ et ses produits de décomposition de l'application dans l'appareillage électrique ne contribuent pas à la destruction de la couche d'ozone stratosphérique [16], car ils ne contiennent ni chlore, ni brome.

F.4 Réchauffement de la planète/changement climatique (effet de serre)

La température mondiale moyenne sur la terre résulte d'un équilibre entre les effets d'échauffement du rayonnement solaire et le refroidissement associé au rayonnement infrarouge de la terre. Une partie du rayonnement infrarouge est réfléchi en retour vers la surface de la terre et l'effet de serre est un phénomène naturel contribuant à permettre la vie sur terre.

Il est dû aux gaz naturels à effet de serre (principalement l'humidité, le dioxyde de carbone, le méthane) qui sont transparents au rayonnement provenant du soleil mais absorbent le rayonnement infrarouge réfléchi en retour par la terre.

En l'absence de gaz à effet de serre, la chaleur du soleil serait rayonnée en retour dans l'espace et la température de la terre serait beaucoup plus basse.

La présence des gaz à effet de serre piège une partie de l'énergie solaire dans l'atmosphère. La conséquence est une température moyenne plus élevée de la planète par rapport à la température qui prédominerait si aucun effet de serre n'existait. Des estimations scientifiques évaluent l'augmentation jusqu'à 33 °C (de –18 °C jusqu'à 15 °C réels) [18].

Le phénomène naturel est aujourd'hui largement prédominant et les activités humaines n'apportent qu'une faible contribution à l'effet de serre total. Toutefois, puisque la contribution humaine est en croissance, il s'agit aujourd'hui d'un souci majeur. Selon plusieurs études, si la tendance annuelle n'était pas inversée, elle produirait une augmentation significative de la température moyenne de la planète, le climat mondial changerait.

Les gaz à effet de serre produits par l'homme et naturels contribuent à l'effet de serre. Le protocole de Kyoto [20] est un accord international destiné à réguler l'émission des gaz à effet de serre produits par l'homme.

L'ensemble des gaz à effet de serre devant être surveillés conformément au protocole de Kyoto est constitué du dioxyde de carbone (CO_2), du méthane (CH_4), de l'oxyde d'azote (N_2O), des hydrofluorocarbures (HFC), des perfluorocarbures (PFC) et de l'hexafluorure de soufre (SF_6). Ces trois dernières substances sont des gaz à effet de serre fluorés (ou gaz de F).

Les concentrations des différents gaz concernant l'environnement incluant ceux du protocole de Kyoto sont régulièrement surveillées par plusieurs entités scientifiques. En particulier, l'«Intergovernmental Panel on Climate Change» (IPCC) rédige périodiquement des rapports d'évaluation, met à jour les informations existantes concernant les émissions et l'évaluation de leur futur impact potentiel sur l'environnement conformément à différentes hypothèses relatives aux tendances de leurs émissions. Le dernier rapport publié est le quatrième rapport d'évaluation (AR4) à l'automne 2007 [18].

L'IPCC a été créé en 1988 par l'organisation météorologique mondiale (OMM) et le programme des Nations unies pour l'environnement (UNEP). Les gaz de F sont connus pour leur fort impact sur le réchauffement de la planète par rapport au CO_2 , principal contributeur à l'effet de réchauffement de la planète, et ils contribuent approximativement à 1,5 % de l'effet global des gaz à effet de serre. La forte absorption des infrarouges par le SF_6 et sa longue durée de vie dans l'environnement sont les causes de son potentiel de réchauffement de la planète (GWP) qui est 22 200 fois plus grand que celui du CO_2 , selon le troisième rapport d'évaluation. On a calculé le GWP pendant une période de 100 années de réchauffement potentiel de 1 kg de gaz en référence à 1 kg de CO_2 . Sa contribution globale à l'effet mondial des gaz à effet de serre de toutes les applications se monte au total à approximativement à 0,2 %.

Toutefois, le GWP du SF_6 seul n'est pas approprié à la mesure de l'impact sur l'environnement de l'appareillage électrique basé sur la technologie du SF_6 . Il convient d'évaluer l'impact sur l'environnement de toute application spécifique et de la comparer en utilisant l'approche de l'évaluation du cycle de vie, LCA, réglementée par l'ISO 14040 [2].

L'industrie électrique utilise le SF_6 dans un cycle fermé, en le limitant par exemple à des postes isolés au gaz (GIS), des disjoncteurs à gaz moyenne tension et haute tension (GCB), des lignes haute tension isolées au gaz (GIL), des transformateurs de tension isolés au gaz (GVT). En Asie, des quantités significatives de SF_6 sont également contenues dans des transformateurs d'alimentation isolés au gaz (GIT).

Bien qu'il ait été mentionné qu'il s'agit de l'utilisateur le plus important de SF_6 dans le monde, l'industrie électrique contribue faiblement à l'émission mondiale de SF_6 , bien au-dessous des autres industries ou utilisateurs ayant une «application ouverte» du gaz. Toutefois, son importance en tant que source varie substantiellement d'une région à une autre et d'un pays à un autre, selon les procédures de manipulation du SF_6 adoptées, la tolérance de l'appareillage électrique et la quantité de gaz contenu dans l'appareillage électrique.

Les taux d'émission moyens régionaux varient actuellement entre une valeur très inférieure à 1 % jusqu'à plus de 10 %. D'une manière générale, les taux d'émission ont diminué significativement depuis 1995. Les actions ciblées de l'industrie ont réduit les émissions de 50 % à 90 % en Europe [21], en Asie [22] et en Amérique du Nord [23] et [24]. Ces actions comportent:

- la conception de matériel nécessitant une plus petite quantité de SF₆ et ayant un degré de tolérance très étroit;
- l'amélioration des processus de manipulation et des appareils de manipulation pendant toutes les étapes du cycle de vie conformément au présent rapport technique.

F.5 Produits de décomposition

Des défaillances majeures provoquant des rejets de gaz sont extrêmement rares comme le montrent les enregistrements de 40 années d'expérience. Les quantités libérées dans de tels cas extrêmes sont de nouveau très limitées en raison du fait que la conception standard des produits est compartimentée, limitant le défaut à l'emplacement d'où il provient. Les quantités de gaz concernées sont donc de petites fractions de la quantité totale de gaz contenu dans un poste.

L'Annexe G montre que les produits de décomposition peuvent être convertis sans difficulté en produits neutres disponibles dans la nature. Les procédures permettant leur traitement, leur manipulation et leur élimination assurent qu'ils ont un impact négligeable sur l'environnement.

F.6 Politique de SF₆ compatible avec l'environnement

Il convient de manipuler le SF₆ dans un cycle fermé, de manière à éviter tout rejet délibéré dans l'environnement. Parmi les initiatives volontaires, la récupération et la réutilisation du gaz ont la plus haute priorité.

Des accords volontaires [25] impliquant les fabricants et les utilisateurs ont été signés dans certains pays, ayant pour but de réguler et de diminuer les émissions de SF₆ des appareillages électriques. Dans de tels accords, les politiques de compatibilité avec l'environnement mentionnent en général que pour l'élaboration, la fabrication, l'installation, l'exploitation, la maintenance et l'élimination en fin de vie des appareillages électriques utilisant du SF₆, les technologies et les procédures les plus récentes sont appliquées pour minimiser les émissions de SF₆.

Certains pays ont récemment introduit l'enregistrement et le rapport des émissions de SF₆ dans leur législation.

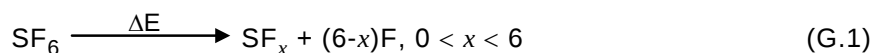
Annexe G (informative)

Produits de décomposition du SF₆

G.1 Décomposition du SF₆

G.1.1 Généralités

Lorsqu'un arc se produit dans du SF₆, dû à des opérations normales de commutation ou à l'élimination d'un défaut, ou dans le cas peu probable d'un défaut d'arc interne, différents produits de décomposition sont générés simultanément en quantité variable [12] et [16]. Lorsque la molécule de SF₆ est contrainte par la température, le rayonnement ou une décharge électrique et qu'une séparation des atomes de fluor se produit, un certain nombre de radicaux, d'ions ou de molécules neutres sont produits, selon le type d'excitation et l'énergie d'entrée, conformément à:



Lorsque l'apport d'énergie ΔE cesse, la majeure partie des atomes se recombinent pour former du SF₆, tandis que les autres se combinent avec différentes substances du système pour former une diversité de produits finaux stables. Ces substances comportent en particulier de l'oxygène et de l'eau ainsi que les matériaux utilisés dans la construction du matériel.

Ces produits de décomposition sont ici considérés en relation avec l'énergie délivrée au SF₆.

G.1.2 Comportement du SF₆ dans un arc électrique

Un arc de courant fort se produit normalement lors de la commutation d'un disjoncteur et des opérations d'élimination d'un défaut et anormalement en cas d'arc interne.

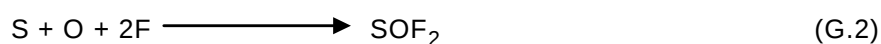
À partir de températures de 500 °C, le SF₆ commence à se décomposer en ses parties constituantes, le degré de décomposition étant directement proportionnel à la quantité d'énergie convertie. Dans le processus de dissociation défini dans la réaction (G.1), les molécules de SF₆ sont rompues en atomes de soufre et de fluor à 3 000 °C environ.

La grande quantité de chaleur adsorbée pendant ce processus est dissipée de la zone de l'arc par rayonnement et convection. Au-dessous d'une température de 1 000 °C environ, les atomes se recombinent ou réagissent avec d'autres substances, telles qu'un métal d'électrode vaporisé, la paroi du récipient, des plastiques ou des impuretés. Des produits de décomposition gazeux et solides peuvent apparaître, incluant des fluorures métalliques et des fluorures de soufre dont les plus importants sont CuF₂, AlF₃, WF₆, CF₄ et SF₄.

Ces produits, appelés généralement produits de décomposition primaires, sont formés pendant ou peu de temps après une décharge de l'ordre de moins d'une seconde. Les dépôts poussiéreux pouvant apparaître sur les surfaces des isolateurs en fonctionnement normal n'ont aucun effet défavorable sur leurs performances diélectriques.

Certains des produits de décomposition sont chimiquement stables; d'autres sont très instables, en particulier en présence d'eau.

En présence d'oxygène, des produits de décomposition peuvent apparaître comme suit:



est décomposé en décharges d'étincelles, les réactions indiquées par les lignes en tirets en (G.8) prédominent [26].

G.1.4 Décomposition catalytique du SF₆ (comportement à haute température)

Le SF₆ peut être chauffé à 500 °C dans des récipients en quartz sans se décomposer. Jusqu'à des températures d'environ 150 °C, tous les matériaux couramment utilisés, tels que les métaux, le verre, les céramiques, le caoutchouc et la résine polyester, résistent complètement au SF₆. Ce n'est qu'à des températures supérieures à 200 °C que certains métaux commencent à présenter un effet de décomposition sur le gaz, mais dans le cas des métaux et des alliages normalement utilisés, on n'observe pas cet effet à un degré marqué avant d'atteindre la plage de températures de 400 °C à 600 °C [16].

Puisque les températures de fonctionnement maximales à l'intérieur de l'appareillage électrique en l'absence d'arc sont bien inférieures à ces valeurs, aucune décomposition du SF₆ de ce type ne doit être attendue pendant le fonctionnement.

G.2 Comportement de corrosion du SF₆ et de ses produits de décomposition

SF₆ est un gaz entièrement non réactif. Il n'y a donc aucune possibilité pour qu'une corrosion soit directement produite par le SF₆ lui-même. Toutefois, en présence d'humidité, les produits de décomposition primaires et secondaires peuvent former des électrolytes corrosifs qui peuvent conduire à endommager une partie du matériau utilisé à l'intérieur de l'appareillage.

Les métaux couramment utilisés, tels que l'aluminium, l'acier, le cuivre et le laiton, sont difficilement attaqués mais les matériaux tels que le verre, la porcelaine, le papier isolant et analogue, sont plus vulnérables aux dégâts, en fonction de la concentration des substances corrosives concernées. D'autres matériaux isolants tels que la résine époxy, le polyester, le polyéthylène, l'oxyde de polyméthylène, le PTFE, le PVC, etc., ne sont pas affectés de manière significative.

Lors de la conception, il est important de prendre des mesures pour tenir compte des propriétés corrosives des produits de décomposition. On peut empêcher la corrosion par l'exclusion en profondeur de l'humidité et en utilisant des matériaux appropriés.

G.3 Mesures pour le retrait des produits de décomposition

L'humidité et les produits de décomposition situés à l'intérieur du matériel en service peuvent être réduits à des niveaux acceptables par adsorption. Des matériaux tels que l'alumine, les tamis moléculaires ou leurs mélanges conviennent à cet effet. Ils adsorbent très efficacement et pratiquement de manière irréversible les produits de décomposition réactifs gazeux et en même temps, assurent que le gaz conserve un faible point de rosée [16].

L'élimination des produits de décomposition enlevés du matériel est directe. Les composants acides (acide sulfurique et fluorure d'hydrogène) sont dégradés au moyen de composés alcalins.

La majeure partie des produits de réaction solides ne sont pas solubles dans l'eau ou ne peuvent être dissous qu'avec difficulté, mais certains fluorures métalliques peuvent réagir avec l'eau pour former de l'acide fluorhydrique. Il est donc nécessaire de traiter les produits de réaction solides avec de l'hydroxyde de calcium (chaux), par exemple, pour neutraliser les composants acides. La boue résultante peut ensuite être éliminée conformément aux réglementations locales.

G.4 Caractéristiques physiologiques des produits de décomposition

Les produits de décomposition peuvent produire une irritation de la peau, des yeux et des muqueuses, par exemple des voies respiratoires, et en forte concentration, peuvent provoquer un œdème pulmonaire, si le temps d'exposition est suffisant.

Du SF_6 contenant des produits de décomposition a une odeur âcre désagréable qui est associée en elle-même à un effet irritant. Les seuils olfactifs, en particulier pour SOF_2 , SO_2 et HF, sont du même ordre que pour les TLV. Du fait de ces caractéristiques, même de petites quantités de produits de décomposition gazeux peuvent conduire à des indications d'avertissement manifestes en quelques secondes, sans qu'aucun risque d'empoisonnement ne puisse apparaître [12].

Annexe H (informative)

Procédure d'évaluation des effets potentiels sur la santé des produits de décomposition du SF₆

H.1 Généralités

Cette annexe propose des procédures d'évaluation des risques pour la santé dus à des rejets de SF₆ dans l'atmosphère locale par fuite et en cas d'arc interne.

En fonctionnement normal, le SF₆ reste à l'intérieur de l'appareillage électrique et les produits de décomposition gazeux formés sont neutralisés par des tamis moléculaires ainsi que par des processus de recombinaison naturelle. Le SF₆ peut se retrouver présent dans l'atmosphère en raison d'une fuite ou si un compartiment à remplissage de gaz ne parvient pas à contenir le gaz, par exemple, un arc interne. Lors de l'évaluation du risque pour la santé, il est nécessaire d'effectuer une différenciation claire entre les conditions de fuite et les situations d'arc interne conduisant à un rejet brutal de SF₆.

En cas de fuite, il est nécessaire de tenir compte des effets d'une exposition à long terme aux produits de décomposition gazeux du SF₆. Il convient que les concentrations de ces produits de décomposition dans l'air restent suffisamment faibles pour ne présenter aucune menace pour le personnel non protégé pendant une période de travail normale, par exemple de 8 h.

En cas de rejet brutal de SF₆ dû à un arc interne, la procédure d'urgence exigée par la réglementation locale peut impliquer une exposition momentanée. Des concentrations en produits de décomposition de niveaux supérieurs tolérables pendant 8 h par exemple peuvent être tolérées si le temps d'exposition est considérablement réduit. Il convient manifestement dans ce cas de tenir compte de toutes les sources possibles d'émissions toxiques et ceci nécessite une connaissance détaillée de l'ensemble des produits de décomposition formés. À cet égard, il convient qu'un traitement complet tienne compte des contributions des vapeurs métalliques, des plastiques brûlés, de l'isolation des câbles, de la peinture, etc., sur une base légale à ce qui peut être attribué au SF₆.

Les articles suivants fournissent les procédures de calcul des risques associés à la présence de produits de décomposition de SF₆ dans l'atmosphère due à une fuite et à un arc interne ainsi que les principes adoptés pour exécuter ces calculs.

H.2 Formation et effets sur la santé des produits de décomposition du SF₆

H.2.1 Formation des produits de décomposition du SF₆

Pendant un arc de haute puissance dans le SF₆, le cœur de l'arc atteint des températures de l'ordre de 10 000 K. À ces températures, les molécules de gaz sont entièrement rompues en leurs atomes parents, soufre et fluor, comme indiqué en G.1.2. Toutes les impuretés présentes, telles que l'air ou l'humidité, sont dissociées d'une manière similaire. Le résultat en est une région localisée ne contenant que des atomes uniques de S, F, H, N, O et divers ions. Le chauffage des électrodes et des parties isolantes par l'arc ajoute à cette atmosphère des vapeurs de Cu, W, C et Al.

Après extinction de l'arc ou dans les régions où le refroidissement commence, ces atomes commencent à se lier à nouveau ensemble et reforment principalement du SF₆. Toutefois, des réactions chimiques se produisent avec les impuretés présentes et en particulier avec l'humidité et l'oxygène, donnant naissance à ce que l'on appelle produits de décomposition d'arc, comme indiqué à l'Annexe G. Les quantités formées sont directement associées à la puissance injectée dans le volume de gaz.

Dans le cas d'un arc de puissance, les produits de décomposition les plus fréquemment rencontrés sont: SOF_2 , SO_2 , HF et aussi CF_4 , SF_4 et SO_2F_2 [27]. Dans le cas de décharges électriques de faible énergie, du S_2F_{10} est également formé en quantité extrêmement faible [28], [29] et [30].

H.2.2 Effets sur la santé des produits de décomposition du SF_6

H.2.2.1 Généralités

Si du SF_6 , ayant été soumis à un arc ou à des décharges à faible énergie, est évacué sur le lieu de travail, le risque potentiel pour la santé dépendra de la concentration de chaque sous-produit dans l'air et donc du volume du local contenant le matériel. Il convient que les estimations de toxicité tiennent compte de la concentration de chaque sous-produit en relation avec les concentrations admissibles pendant la durée d'exposition appropriée. Il convient d'adopter l'Équation (H.1) pour calculer le risque total associé aux produits de décomposition.

$$\text{Risque}_{\text{tot}} = \sum_i \frac{\text{Concentration (sous - produit)}_i}{\text{Seuil (sous - produit)}_i} \leq 1 \quad (\text{H.1})$$

H.2.2.2 Effets sur la santé du SF_6 décomposé par un arc

Pour les mélanges de plusieurs composants, les toxicologues définissent trois cas généraux:

- chaque composant agit d'une manière différente ou sur des organes cibles différents; les effets ne sont donc pas cumulatifs et chaque composant est traité séparément;
- les composants agissent de manière similaire sur les mêmes organes cibles; leur effet est donc cumulatif et les calculs doivent en tenir compte;
- un composant surpasse largement la contribution des autres; il convient d'estimer l'effet toxique global en étudiant la concentration de ce seul composant.

Une étude de la majorité des travaux effectués au cours des dernières décennies sur la décomposition du SF_6 par un arc de forte puissance [27], [31], a conclu que le risque total pour la santé du personnel, dû au SF_6 décomposé par arc dépend de façon prédominante des concentrations en SOF_2 généré.

Une hydrolyse du SOF_2 peut se produire en présence de concentrations significatives d'humidité, produisant SO_2 et HF, comme indiqué en G.1.2. Jusqu'à présent, aucune OEL (Limite d'exposition professionnelle) n'a été définie pour le SOF_2 . On suppose pour cette raison qu'une hydrolyse a toujours lieu, fournissant HF et SO_2 . L'effet potentiel sur la santé est ensuite évalué sur ces produits de décomposition gazeux (voir Tableau H.1).

H.2.2.3 Durée d'exposition et dilution dans l'air

Les deux notions essentielles pour toute évaluation du risque pour la santé dû à des substances toxiques sont:

- la concentration dans le volume environnant;
- la durée d'exposition, conduisant à la sélection de la limite d'exposition appropriée.

Lorsqu'une situation de fuite est calculée, il convient d'utiliser la concentration d'OEL (Limite d'exposition professionnelle), définie par la TWA (Moyenne de temps pondérée, sur une limite d'exposition de 8 h par jour, 40 h par semaine).

Dans des conditions anormales, par exemple un arc interne, le personnel quitte immédiatement le local de l'appareillage électrique et l'exposition est ainsi momentanée. Dans ces conditions, il convient d'utiliser des concentrations définies par C (limite d'exposition plafond, valeurs à ne jamais dépasser). Lorsque la valeur de C n'est pas définie,

on peut adopter la STEL (Limite d'exposition à court terme). La STEL se réfère à une exposition moyenne de 15 min qu'il convient de ne pas dépasser pendant le temps de travail de 8 h.

Les limites d'exposition professionnelle (OEL) définies par l'«American Conference of Governmental Industrial Hygienists» (ACGIH) [33] pour SO_2 , HF et S_2F_{10} sont données dans le Tableau H.1.

Tableau H.1 – OEL pour SO_2 , HF et S_2F_{10}

OEL	SO_2	HF	S_2F_{10}
TWA ($\mu\text{l/l}$)	2	0,5	Non définie
STEL ($\mu\text{l/l}$)	5	Non définie	Non définie
C ($\mu\text{l/l}$)	Non définie	2	0,01
NOTE Aucune OEL n'a été définie jusqu'à présent pour SOF_2 .			

H.2.3 Estimation quantitative des produits de décomposition gazeux

H.2.3.1 Généralités

La quantité de produits de décomposition gazeux formés pendant une décharge électrique est généralement appelée énergie en joules dissipée dans le gaz. Celle-ci est appelée taux de production, r .

Les résultats expérimentaux sont généralement cités en mol/J mais une autre unité largement adoptée est le l/kJ. La conversion est basée sur le fait que 1 mole de gaz parfait occupe 24,37 l à 20 °C et à 100 kPa, et elle est donnée dans l'Équation (H.2).

$$1 \text{ mole/J} = 24,37 \times 10^3 \text{ l/kJ} \quad (\text{H.2})$$

L'estimation des taux de production de SOF_2 dus à un arc et de S_2F_{10} dus à une décharge de faible énergie, à la fois des décharges par étincelles et partielles dans le gaz, est respectivement indiquée dans les H.2.3.2, H.2.3.3 et H.2.3.4.

H.2.3.2 Estimation des taux de production de SOF_2 due à un arc

Le taux de production de SOF_2 est déterminé expérimentalement et dépend du matériau d'électrode utilisé et du type de décharge considéré. Les réactions exothermiques qui se produisent avec des électrodes en aluminium semblent améliorer le taux de production.

Les valeurs utilisées ici ont été moyennées sur la gamme de données actuellement disponible que l'on trouve dans les publications [27] et [31].

Tableau H.2 – Taux de production de SOF_2

Matériau d'électrode	Taux de production de SOF_2 (r)	
	mol/J	l/kJ
Cu, Fe, WCu	150×10^{-9}	$3,7 \times 10^{-3}$
Al	600×10^{-9}	15×10^{-3}
NOTE On évalue les électrodes d'aluminium uniquement pour les situations des barres omnibus GIS.		

H.2.3.3 Estimation du taux de production de S_2F_{10} due à une étincelle

La manœuvre des sectionneurs produits des étincelles, que l'on considère comme une décharge de faible énergie. Les paramètres moyens sont: une chute de tension d'arc de 1 kV, un courant capacitif de 0,25 A et une durée de 1 s, produisant 0,25 kJ pour chaque événement d'étincelle. Toutefois, des étincelles individuelles peuvent atteindre un courant de crête allant jusqu'à 3 kA pendant seulement quelques dizaines de microsecondes.

En l'absence de données publiées, on choisit un taux de production de $0,05 \times 10^{-9}$ mol/J (ou $1,22 \times 10^{-6}$ l/kJ) pour S_2F_{10} dû à des étincelles, ce qui représente une situation à l'extrémité inférieure de la gamme de décharge des étincelles mais plus de 2 000 fois plus grande que pour des arcs. On a confirmé que ceci était réaliste au moyen de mesures sur un sélectionneur réel dans des conditions de fonctionnement à forte accélération [29].

H.2.3.4 Estimation du taux de production de S_2F_{10} due à des décharges partielles

Les simples composants d'appareillage à haute tension ou de sous-ensembles dans lesquels ils sont contenus ne doivent pas dépasser le niveau maximum admissible de décharge partielle de $q = 5$ pC (voir 6.2.9.102 de la CEI 62271-203:2011).

À la tension assignée U_r , l'énergie dissipée pendant chaque événement de décharge partielle est donc de:

$$E = q \times \frac{U_r}{\sqrt{3}} \quad (\text{H.3})$$

qui se trouve toujours dans la plage des énergies comprises entre la microjoule et la nanojoule.

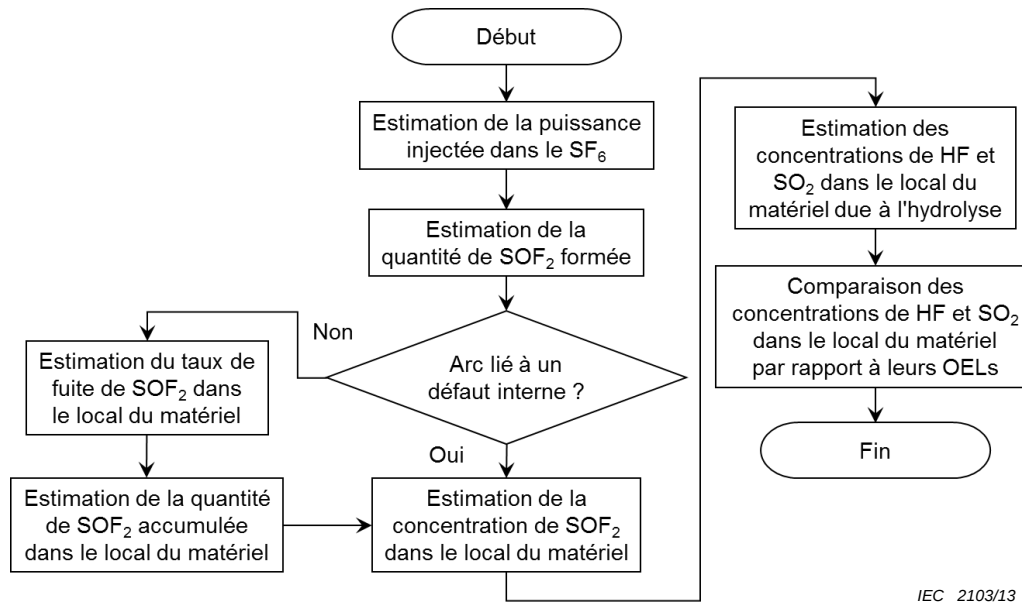
Le taux de production de S_2F_{10} due aux décharges partielles à fréquence industrielle n'est pas disponible dans les publications. On obtient une valeur de $0,2 \times 10^{-9}$ mol/J (ou $4,88 \times 10^{-6}$ l/kJ) par extrapolation des résultats expérimentaux pour les étincelles dans la région des très faibles énergies.

H.2.4 Procédure d'évaluation du risque pour la santé

Les procédures d'évaluation des effets potentiels sur la santé des produits de décomposition gazeux sont fondées sur les hypothèses suivantes:

- le local où se trouve le matériel est entièrement fermé et la ventilation est inopérante pendant la période d'intérêt;
- les adsorbeurs installés dans l'appareillage électrique ne diminuent pas la quantité de produits de décomposition gazeux pendant la période d'intérêt;
- le gaz émis se mélange uniformément avec l'air dans le local contenant l'appareillage électrique en une courte durée par rapport à la journée de travail ou à la durée d'exposition.

La Figure H.1 décrit la procédure type pour suivre l'évaluation des effets potentiels sur la santé des produits de décomposition formés pendant un arc (soit par interruption d'alimentation, soit par commutation capacitive) dans SF_6 . Elle est applicable dans les deux cas de fuite et d'arc interne.



IEC 2103/13

Figure H.1 – Procédure d'évaluation des effets potentiels sur la santé dus à un arc

Il convient d'évaluer la puissance injectée dans l'appareillage électrique pendant un seul événement. Selon les circonstances, par exemple, un arc de puissance, un arc capacitif, une décharge par effet couronne, celle-ci peut être considérée comme la chute de tension d'arc multipliée par le courant d'arc multiplié par la durée d'un arc ou comme la chute de tension multipliée par la charge transférée. On évalue ensuite la puissance cumulée en multipliant la puissance de l'événement unique par le nombre d'événements ayant lieu pendant la période de référence.

La quantité de SOF_2 formé dans l'appareillage électrique est la puissance elle-même multipliée par le taux de production de SOF_2 . Le taux de production de SOF_2 est une fonction non linéaire de la puissance, de la quantité de SF_6 , de la durée et du matériau de l'électrode. Les valeurs numériques sont déterminées par des expériences (voir H.2.3.2).

En cas d'arc interne, le disque explose et toute la quantité de SOF_2 est brutalement libérée dans le local de l'appareillage, ce qui constitue le scénario du cas le plus défavorable.

En cas de fuite, seule une petite partie de la quantité de SOF_2 formé dans l'appareillage électrique est transférée au local de l'appareillage et s'accumule pendant une certaine période de temps. Dans ces conditions, si $V_{\text{SOF}_2, \text{équipement}}$ est la quantité de SOF_2 formé dans l'appareillage électrique en litres et $F_{\text{p,rel}}$ est le taux de fuite de l'appareillage électrique en % p.a., la quantité de SOF_2 accumulé dans le local de l'appareillage pendant une journée est de:

$$V_{\text{SOF}_2, \text{local}} = \frac{V_{\text{SOF}_2, \text{équipement}} \times F_{\text{p,rel}}}{100 \times 365} \quad (\text{H.4})$$

La concentration en SOF_2 dans le local du matériel est la quantité de SOF_2 dans le local du matériel divisée par le volume du local de l'appareillage. Pour les installations extérieures, il convient d'effectuer la même évaluation en tenant compte du volume d'un local de matériel virtuel.

En raison de l'hydrolyse dans le local du matériel, la concentration en HF en $\mu\text{l/l}$ est le double de la concentration en SOF_2 en $\mu\text{l/l}$ et la concentration en SO_2 en $\mu\text{l/l}$ est égale à la concentration en SOF_2 en $\mu\text{l/l}$.

L'effet potentiel sur la santé des produits de décomposition est ensuite évalué en comparant les concentrations en HF et en SO_2 dans le local du matériel aux OEL (limites d'exposition professionnelle). Il convient de définir le risque total par R_{tot} :

$$R_{\text{tot}} = \frac{\text{Concentration}(\text{SO}_2)}{\text{TLV}(\text{SO}_2)} + \frac{\text{Concentration}(\text{HF})}{\text{TLV}(\text{HF})} \leq 1 \quad (\text{H.5})$$

On peut adopter une procédure similaire pour évaluer les effets potentiels sur la santé du S_2F_{10} dus à des décharges électriques de faible énergie. Dans ce cas, il ne se produit pas d'hydrolyse. La procédure est décrite à la Figure H.2.

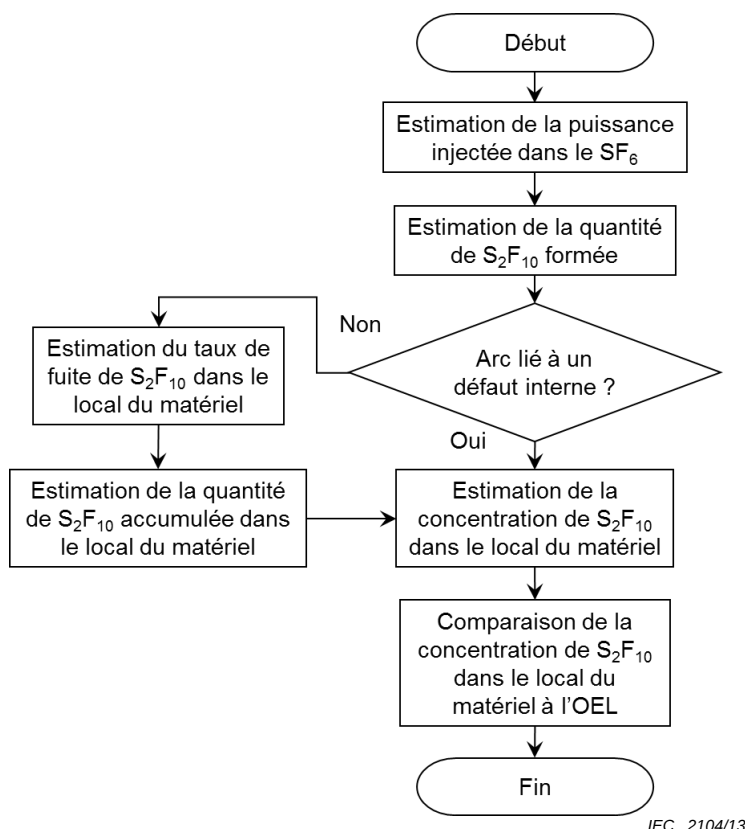


Figure H.2 – Procédure d'évaluation des effets potentiels sur la santé dus à des décharges de faible énergie

H.3 Conclusions

Les calculs basés sur l'état de la technique montrent que pour des situations de fuite, il n'y a pas de risque pour la santé dû à l'exposition à des produits de décomposition. Les produits de décomposition formés par arc et par décharges de faible énergie, libérés en raison d'une fuite de l'appareillage électrique rempli de SF_6 , atteignent des concentrations négligeables dans l'atmosphère du lieu de travail. Il n'y a donc aucune raison de se soucier et aucun besoin de précautions autres que les pratiques normales de ventilation pour les zones de court séjour. Ceci est toujours valable même dans le cas de situations de fuites anormales (un taux de fuite par exemple de 2 ordres de grandeur supérieur au taux normal).

Toutefois, dans le cas peu probable d'un défaut interne conduisant à un rejet de SF_6 , des concentrations significatives de produits de décomposition peuvent apparaître dans un local de matériel. Dans toute situation de ce type, les procédures de sécurité de base comportent les règles d'évacuation et sont conçues pour s'assurer qu'aucun membre du personnel n'est exposé à des matériaux qui se sont échappés pendant une durée aussi courte que possible.

De plus, la ventilation forcée et/ou l'évacuation assurent que les niveaux de concentration peuvent être réduits en quelques minutes.

Pour les installations extérieures, le volume d'air dans lequel s'échappe le SF₆ décomposé par arc est important, sinon infini. Les vents prédominants et la grande vitesse de rejet accélèrent également la dispersion.

On en conclut donc que dans la mesure où l'on suit les procédures de sécurité de base, le risque associé de manière spécifique à l'utilisation de SF₆ dans un appareillage électrique est réduit au minimum.

Annexe I (informative)

Régénération cryogénique du SF₆

I.1 Généralités

Cette annexe décrit un exemple de méthode utilisée en Australie pendant les 15 dernières années pour récupérer le SF₆ en se basant sur une technique cryogénique [35], [36] et [37].

I.2 Applications

La principale utilisation du processus cryogénique est l'élimination des contaminants du SF₆ usagé stockés dans des bouteilles renvoyées à l'usine de traitement principal depuis un site où elles ont été enlevées de l'appareillage électrique.

On peut utiliser ce processus pour:

- agréger le reste du SF₆ des récipients ayant été utilisés pour remplir l'appareillage électrique;
- récupérer du SF₆ de l'appareillage électrique à une pression inférieure à 100 Pa sans avoir besoin d'un compresseur de récupération;
- rétablir le SF₆, même si fortement décomposé ou contaminé par l'air à la norme du SF₆ de qualité standard ou technique;
- séparer le SF₆ d'un mélange de SF₆ et d'azote (N₂). Tout le SF₆ peut être récupéré et il n'en est essentiellement pas libéré vers l'atmosphère;
- obtenir du CF₄ à partir d'un mélange SF₆/CF₄.

I.3 Contexte physique

Le processus est basé sur la variation de la pression de vapeur saturante de SF₆ et de ses contaminants types avec la température (voir Figure I.1).

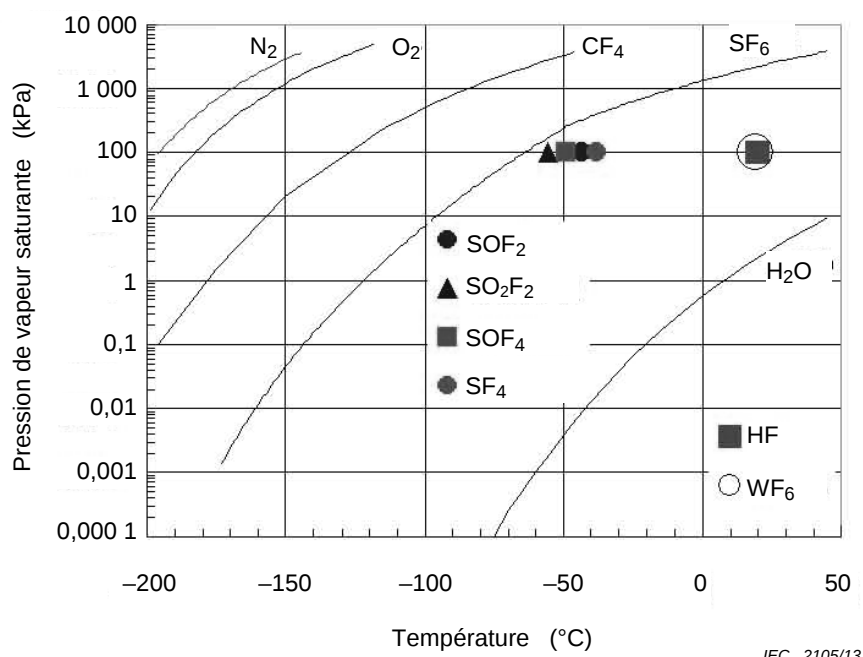


Figure I.1 – Pression de vapeur saturante de divers gaz en fonction de la température

I.4 Processus cryogéniques

Le SF₆ est récupéré en vidant et en refroidissant une bouteille appelée bouteille de capture. La différence de pression entre la bouteille et le compartiment à remplissage de gaz ou le récipient contenant le SF₆ à traiter provoque le transfert du SF₆ dans la bouteille où il se liquéfie ou se solidifie en raison des basses températures atteintes par l'hydrogène liquide, maintenant ainsi un différentiel de pression jusqu'à ce que la récupération soit terminée.

Le processus de collecte est adaptable. Un certain nombre de bouteilles peuvent être reliées en parallèle pour améliorer la capacité de collecte. On peut utiliser des bouteilles plus petites si les masses de SF₆ impliquées sont faibles. La vitesse de transfert massique est principalement limitée par le diamètre des tuyaux de connexion et avec une tuyauterie de dimension appropriée, la limite pratique donnée par la vitesse du son peut être atteinte.

On peut également utiliser ce processus pour séparer l'air du SF₆ car, à condition que le SF₆ soit suffisamment refroidi, le SF₆ gèle dans la bouteille de capture, permettant de libérer l'air ou de le vider par une pompe à vide classique.

Ce processus comprend une deuxième étape, où une deuxième bouteille appelée bouteille de collecte est refroidie par de l'azote liquide et connectée à la bouteille de capture qu'elle est autorisée à réchauffer. Le différentiel de pression entre les bouteilles provoque le transfert du SF₆ dans la bouteille de collecte tandis que les contaminants restent gelés dans la bouteille de capture. Pendant le transfert du SF₆, la bouteille de capture chauffe à environ -150 °C jusqu'à environ -45 °C et on peut obtenir la pression dans la bouteille de capture en fermant le robinet commandant le transfert de SF₆ et en lisant le manomètre en haut de la bouteille de capture. Cette pression (voir Figure I.1) est représentative de la partie de température la plus haute du SF₆ dans la bouteille de capture, même si des gradients de température peuvent être présents.

La limite de température supérieure dans la bouteille de capture (c'est-à-dire, approximativement -45 °C) est fixée pour limiter la concentration (point de rosée) de l'humidité transférée à la bouteille de collecte. Cette limite de température supérieure doit également être suffisamment faible pour empêcher également le transfert de produits de décomposition gazeux réactifs pouvant être présents dans la bouteille de capture.

La bouteille de capture peut être partiellement immergée dans un bain réfrigéré pour permettre une meilleure régulation de température.

I.5 Description d'un appareil de récupération cryogénique [36]

Un appareil de récupération cryogénique comprend les composants suivants:

- des bouteilles de gaz (voir D.2.6 en plus, adaptées à des températures cryogéniques);
- des Dewars isolés satisfaisant aux exigences locales de sécurité et capables de supporter $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- une pompe à vide (voir D.2.4);
- un filtre facultatif, utilisé pour récupérer du gaz fortement décomposé (voir D.2.3);
- un point d'échantillonnage (voir 4.2.3 et D.7);
- des robinets, connexions, manomètres et conduites de gaz (voir D.2.8, D.2.9, D.2.10 et D.3) adaptés de plus à des températures cryogéniques le cas échéant);
- de l'azote liquide acheté selon les besoins.

Les composants peuvent être assemblés selon des configurations différentes en fonction de la tâche exécutée.

La Figure I.2 est l'organigramme d'un appareil de récupération cryogénique adapté à la récupération du SF_6 sur le site.

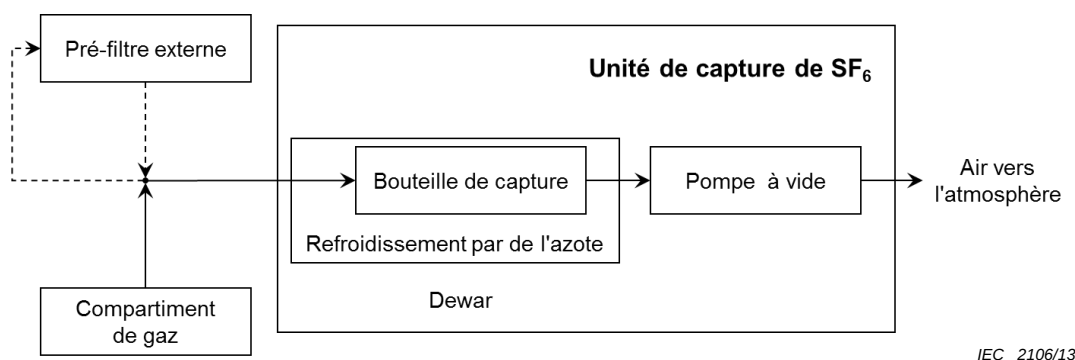


Figure I.2 – Appareil de récupération cryogénique type pour récupération sur le site du SF_6

La procédure d'exécution du processus manuel est la suivante:

- la totalité de l'appareil de récupération est vidée au moyen de la pompe à vide;
- la bouteille de capture est réfrigérée avec de l'azote liquide et le vide dans la bouteille elle-même est maintenu par la réfrigération du SF_6 qui est récupéré en continu à l'intérieur;
- le gaz impur pénétrant dans le processus peut être dirigé à travers un filtre s'il contient une quantité significative de contaminants solides comme dans le cas d'un gaz fortement décomposé;
- lorsque la capacité de capture du gaz a été atteinte, les robinets en amont sont fermés et les robinets en aval sont ouverts;
- on peut utiliser la pompe à vide pour vider et extraire tous les composants gazeux situés au-dessus du SF_6 congelé, c'est-à-dire l'oxygène et l'azote;
- les robinets en aval sont fermés et la bouteille peut être enlevée, réchauffée et transportée.

La Figure I.3 est l'organigramme d'un appareil de récupération cryogénique adapté à la suppression des contaminants.

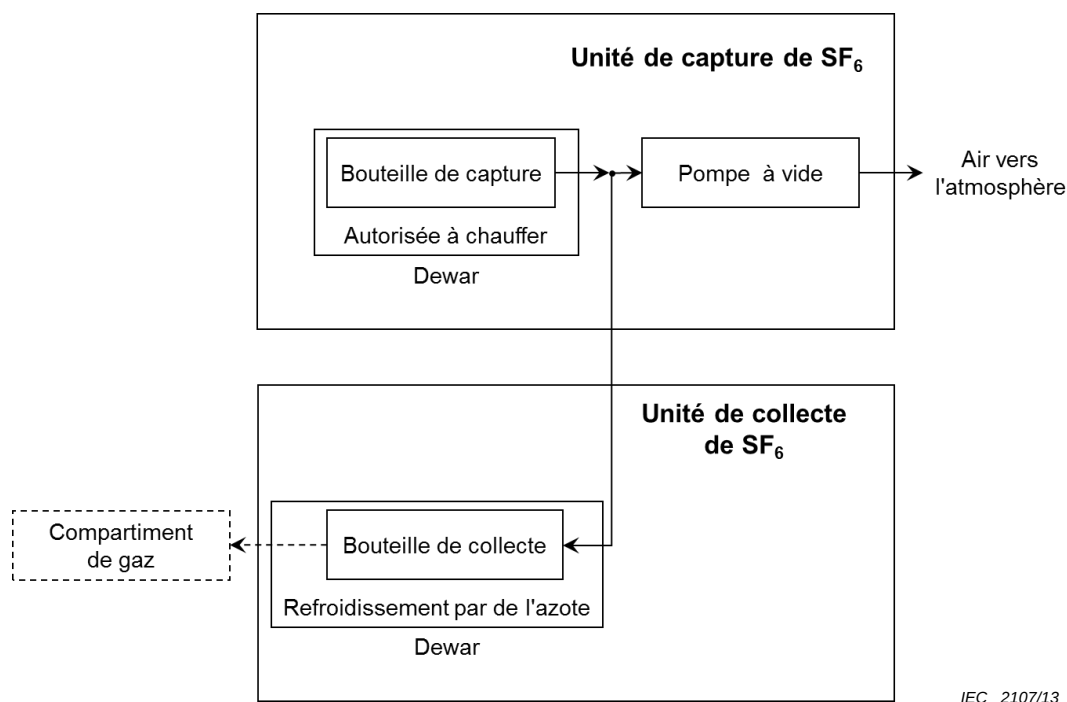


Figure I.3 – Appareil de récupération cryogénique type pour éliminer les contaminants

La procédure d'exécution du processus manuel est la suivante:

- la bouteille de capture et la bouteille de collecte sont réfrigérées avec de l'azote liquide;
- on peut utiliser la pompe à vide pour vider et extraire tous les composants gazeux situés au-dessus du SF₆ congelé, c'est-à-dire l'oxygène et l'azote;
- on laisse ensuite la bouteille de capture se réchauffer jusqu'à la limite de température supérieure sélectionnée (par exemple, -45 °C);
- du SF₆ pur est transféré dans la bouteille de collecte en conséquence de la différence de température.

La bouteille de capture finit probablement par ne plus contenir de contaminants solides du SF₆ fortement décomposé et nécessite un nettoyage après utilisation.

Annexe J (normative)

Manipulation de mélanges contenant du SF₆

J.1 Généralités

Dans l'appareillage électrique, on utilise des mélanges contenant du SF₆ principalement pour des applications à température ambiante froide, généralement en dessous de –40 °C. D'autres applications à température ambiante normale comportent des lignes de transmission isolées au gaz et des transformateurs isolés au gaz. Du SF₆ est mélangé avec un gaz complémentaire, généralement N₂ ou CF₄, selon un pourcentage spécifié par le fabricant du matériel d'origine dans le manuel d'instructions d'exploitation, généralement de 10 % à 75 % en volume.

Le domaine d'application de cette annexe consiste à traiter les particularités de manipulation des mélanges contenant du SF₆ pendant l'installation, la mise en service, la durée de vie utile et l'élimination en fin de vie de l'appareillage électrique.

J.2 Remplissage de compartiments de gaz avec des mélanges contenant du SF₆

Le 3.2 de la présente Norme internationale s'applique à l'exception de l'étape 7 du Tableau 1, qui est remplacée par:

- Relier le récipient de SF₆ et remplir le compartiment de gaz jusqu'à ce que la pression/densité assignée de remplissage partiel de SF₆ soit atteinte. Utiliser une soupape de sûreté et un manomètre étalonné de manière à éviter un remplissage excessif [NOTES 1 et 2].
- Remplir le compartiment de gaz à la pression/densité de remplissage assignée (voir 3.3) avec le gaz complémentaire [NOTE 3].

NOTE 1 Sauf spécification contraire du fabricant du matériel d'origine dans le manuel d'instructions d'exploitation, la durée du vide peut être prolongée pour obtenir une meilleure élimination de l'humidité, par exemple lorsque la température ambiante est au gel.

NOTE 2 Le SF₆ devant être introduit dans le compartiment de gaz peut être, soit du SF₆ de qualité technique, soit du SF₆ usagé pouvant être réutilisé sur site.

NOTE 3 Les spécifications du gaz complémentaire sont fournies par le fabricant du matériel d'origine dans le manuel d'instructions d'exploitation.

En variante, des dispositifs de mélange de gaz (voir D.8) ou des gaz prémélangés peuvent être utilisés pour accélérer le processus et diminuer la probabilité d'erreurs accidentelles.

NOTE 4 Les gaz prémélangés peuvent être obtenus auprès de fournisseurs de gaz.

J.3 Complément de remplissage des compartiments avec des mélanges contenant du SF₆ à la pression/densité de remplissage assignée

Le 4.1 de la présente Norme internationale s'applique à l'exception de l'étape 3 du Tableau 3, qui est remplacée par:

- Évaluer la pression/densité intermédiaire p_i

$$p_i = x \times p_{rm} + (1 - y) p_a \quad (J.1)$$

où

- x est le pourcentage nominal de SF_6 du mélange contenant du SF_6 ;
- p_{rm} est la pression de remplissage assignée du mélange contenant du SF_6 ;
- y est le pourcentage réel ou mesuré de SF_6 du mélange contenant du SF_6 dans le compartiment à remplissage de gaz (voir 4.2.2);
- p_a est la pression réelle ou mesurée du mélange contenant du SF_6 dans le compartiment à remplissage de gaz [NOTE 1];
- Relier le récipient de SF_6 et remplir le compartiment jusqu'à ce que la pression/densité intermédiaire p_i soit atteinte. Utiliser une soupape de sûreté et un manomètre étalonné de manière à éviter un remplissage excessif [NOTE 2].
- Remplir le compartiment de gaz à la pression/densité de remplissage assignée p_{rm} (voir 3.3) avec le gaz complémentaire [NOTE 4].

NOTE 1 Pour diminuer la probabilité d'erreurs, p_i est évaluée à la température de référence de 20 °C. Si nécessaire, la pression est ensuite rapportée à une température ambiante différente. p_a est la pression mesurée à la température ambiante rapportée à la température de référence de 20 °C.

NOTE 2 Le SF_6 devant être introduit dans le compartiment de gaz peut être, soit du SF_6 de qualité technique, soit du SF_6 usagé pouvant être réutilisé sur site.

NOTE 3 Les spécifications du gaz complémentaire sont fournies par le fabricant du matériel d'origine dans le manuel d'instructions d'exploitation.

En variante, des dispositifs de mélange de gaz (voir D.8) ou des gaz prémélangés peuvent être utilisés pour accélérer le processus et diminuer la probabilité d'erreurs accidentelles.

NOTE 4 Les gaz prémélangés peuvent être obtenu auprès de fournisseurs de gaz.

J.4 Rectification de la composition des mélanges contenant du SF_6

Ce paragraphe s'applique à des compartiments de systèmes de pression contenant du SF_6 mélangé avec un gaz complémentaire dans un pourcentage ne satisfaisant pas aux spécifications fournies par le fabricant du matériel d'origine dans le manuel d'instructions d'exploitation.

Sauf spécification contraire du fabricant du matériel d'origine dans le manuel d'instructions d'exploitation, les étapes suivantes pour rectifier la composition du mélange contenant du SF_6 s'appliquent.

- Évaluer la pression/densité de récupération p_{rec}

$$\text{pour } y < x \quad p_{\text{rec}} = P_{\text{r}} \times \frac{1-x}{1-y} \quad (\text{J.2})$$

$$\text{pour } y > x \quad p_{\text{rec}} = P_{\text{r}} \times \frac{x}{y} \quad (\text{J.3})$$

où:

- p_{rm} est la pression de remplissage assignée du mélange contenant du SF_6 ;
- x est le pourcentage nominal de SF_6 du mélange contenant du SF_6 ;
- y est le pourcentage réel ou mesuré de SF_6 du mélange contenant du SF_6 dans le compartiment à remplissage de gaz (voir 4.2.2);
- ramener le mélange contenant du SF_6 dans le compartiment à remplissage de gaz à la pression/densité de récupération p_{rec} ;
- remplir à nouveau le compartiment de gaz à la pression/densité de remplissage assignée (voir J.3).

NOTE Pour diminuer la probabilité d'erreurs, p_{rec} est évaluée à la température de référence de 20 °C. Si nécessaire, la pression est ensuite rapportée à une température ambiante différente.

J.5 Vérification de la qualité des mélanges contenant du SF₆

J.5.1 Généralités

Le 4.2 de la présente Norme internationale s'applique.

NOTE Lorsque le SF₆ est partiellement liquéfié, le pourcentage réel ou mesuré du SF₆ peut différer du pourcentage nominal de SF₆ du mélange contenant du SF₆. L'Article J.7 traite du stockage des mélanges contenant du SF₆ de manière à éviter la liquéfaction.

J.5.2 Variation dans le temps de la composition des mélanges contenant du SF₆

La composition d'un mélange contenant du SF₆ dans un compartiment à remplissage de gaz varie légèrement dans le temps en raison de la combinaison des causes suivantes:

- taux de fuite différents du SF₆ et du gaz complémentaire;
- taux de décomposition différents du SF₆ et du gaz complémentaire par arc;
- quantités différentes de SF₆ et du gaz complémentaire piégé dans les cavités des adsorbeurs;
- grand nombre d'opérations de manipulation de gaz exécutées sur le même compartiment à remplissage de gaz.

J.5.3 Tolérance sur la composition des mélanges contenant du SF₆

Il convient que la tolérance sur la composition d'un mélange contenant du SF₆ soit spécifiée par le fabricant du matériel d'origine dans le manuel d'instructions d'exploitation en tenant compte de l'utilisation possible de «SF₆ usagé réutilisable sur le site» (voir 2.15) et de l'incertitude associée aux dispositifs de mesure (voir D.4), des conditions type de manipulation du gaz et de service à froid.

NOTE On considère que l'incertitude concernant le pourcentage de SF₆ associée à une manipulation type du gaz sur le site est de 6 %. Dans les conditions de laboratoire, pendant l'essai de type de l'appareillage, on considère que l'incertitude concernant le pourcentage de SF₆ est de 1 %.

J.6 Récupération et régénération des mélanges contenant du SF₆

L'Article 5 de la présente Norme internationale s'applique. Voir J.7 pour le stockage.

J.7 Stockage et transport de mélanges contenant du SF₆

J.7.1 Généralités

Les récipients contenant des mélanges contenant du SF₆ doivent être marqués avec une étiquette d'identification contenant le pourcentage de SF₆ et le gaz complémentaire.

Pour le stockage et le transport de mélanges contenant du SF₆, l'Annexe A de la présente Norme internationale s'applique. En cas de stockage temporaire (par exemple, pendant une maintenance, une réparation) il convient que le volume du récipient soit suffisamment grand pour assurer que la pression partielle de SF₆ reste inférieure à la pression de vapeur de SF₆ à la température minimale de stockage de manière à éviter la liquéfaction du SF₆.

NOTE On peut appliquer des éléments de chauffage aux récipients de stockage pour augmenter la température de stockage effective et en conséquence la pression. Le volume du récipient de stockage est donc substantiellement réduit.

J.7.2 Pression maximale de stockage de manière à éviter la liquéfaction

La pression maximale de stockage pour un mélange contenant du SF₆, p_m , peut être calculée au moyen de l'équation suivante

$$p_m = \frac{p_l}{x} \quad (\text{J.4})$$

où:

- p_l est la pression de vapeur de SF_6 à la température minimale de stockage (voir Figure J.1);
- x est le pourcentage nominal de SF_6 du mélange contenant du SF_6 .

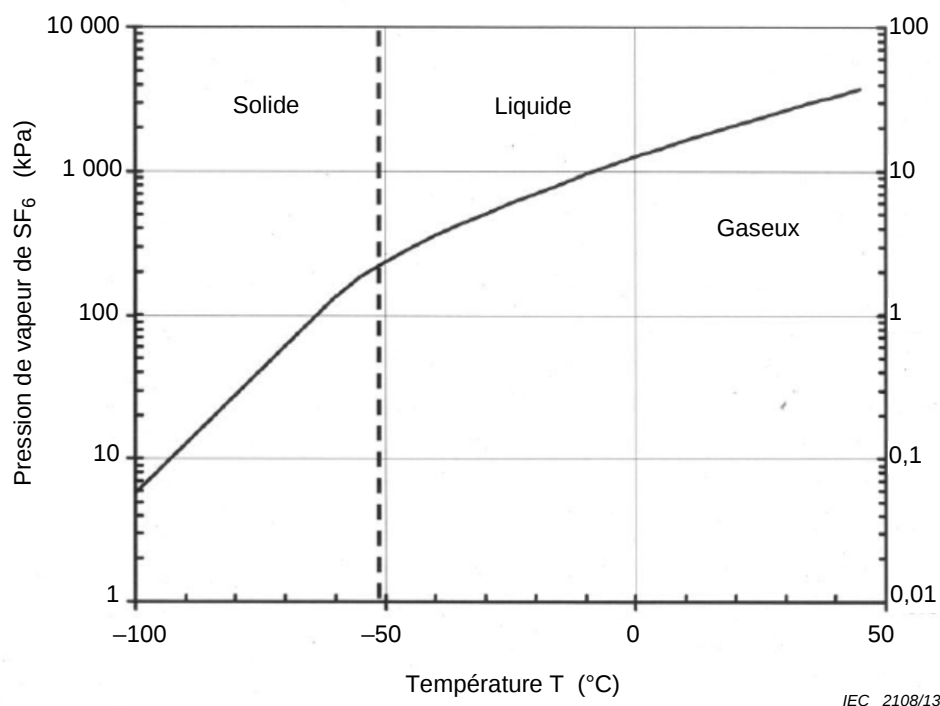


Figure J.1 – Pression de vapeur de SF_6

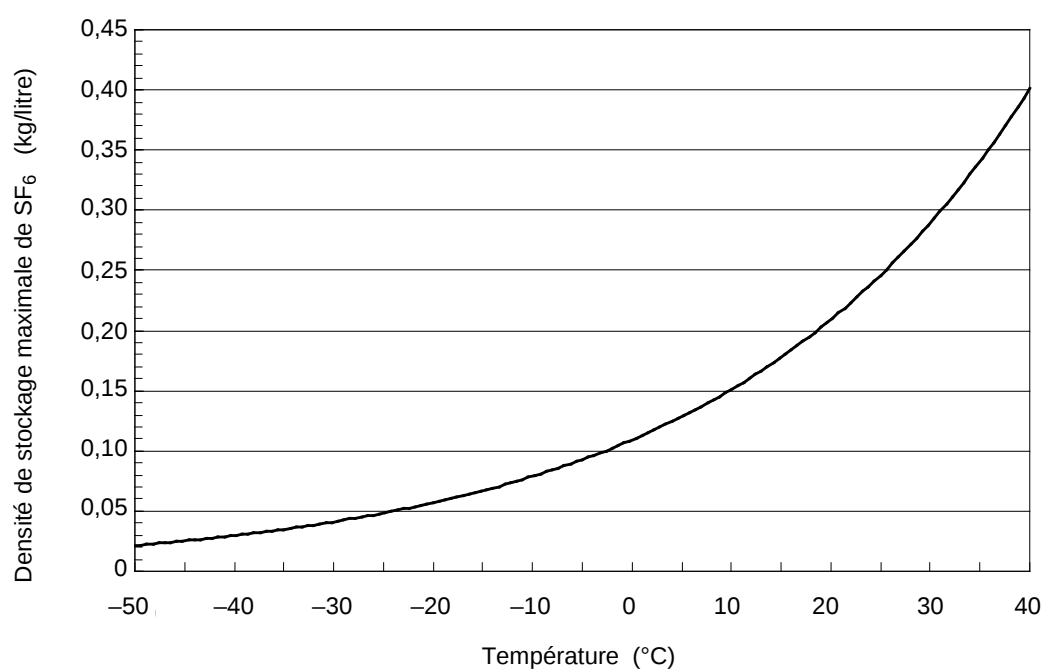
J.7.3 Volume de stockage minimum de manière à éviter la liquéfaction

Le volume de stockage minimum pour le mélange contenant du SF_6 , v_m , peut être calculé au moyen de l'équation suivante

$$v_m = \frac{m_{\text{SF}_6}}{\rho_l} \quad (\text{J.5})$$

où:

- m_{SF_6} est la quantité de SF_6 à stocker;
- ρ_l est la densité maximale de SF_6 de manière à éviter la liquéfaction du SF_6 à la température minimale de stockage (voir Figure J.2).



IEC 2109/13

Figure J.2 – Densité maximale de SF₆ de manière à éviter la liquéfaction du SF₆

Bibliographie

- [1] CEI 62271-203:2011, *Appareillage à haute tension – Partie 203: Appareillage sous enveloppe métallique à isolation gazeuse de tensions assignées supérieures à 52 kV*
- [2] ISO 14040:2006, *Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre*
- [3] EN 136, *Appareils de protection respiratoire – Masques complets – Exigences, essais, marquage*
- [4] EN 140, *Appareils de protection respiratoire – Demi-masques et quarts de masques – Exigences, essais, marquage*
- [5] EN 141, *Appareils de protection respiratoire – Filtres anti-gaz et combinés – Exigences, essais, marquage*
- [6] EN 143, *Appareils de protection respiratoire – Filtres à particules – Exigences, essais, marquage*
- [7] EN 166, *Protection individuelle de l'œil – Spécifications*
- [8] CIGRE WG B3.02 TF SF₆, *Guide for the preparation of customised "Practical SF₆ handling instructions"*, CIGRE brochure N. 276, 2005
- [9] KEMA, *SF₆ Safety Regulations, internal document for use in laboratories*, 1982
- [10] The Electricity Association, *Engineering Recommendation G69*, UK, 1988
- [11] Standards Association of Australia, *Recommendations for the handling of contaminated SF₆ gas and associated arc by-products in or from electrical equipment*, AS-2791, 1989
- [12] G. Mauthe, K. Pettersson, et al., *Handling of SF₆ 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.
- [13] KEMA, *Het gebruik van middenspanning installaties met SF₆ als isolatie en/of blusmedium*, report No. 00067-DZO 87-1002, 17 February 1987 (en anglais).
- [14] J.A.J. Pettinga, *Gaslekzoekapparatuur toegepast voor het meten van SF₆ concentraties in lucht*. Electrotechniek 68, 1990.
- [15] J.A.J. Pettinga, *Studie naar de mogelijkheid van ruimtebewaking in onderstations waarin SF₆ schakel-materiaal is opgesteld*, n.v. KEMA report, 1986.
- [16] *Sulphur Hexafluoride brochure* (Solvay Fluor, 2006).
- [17] R. J. Lewis Sr., *Sax's Dangerous Properties of Industrial Materials*, 11th edition, John Wiley and Sons Inc., Hoboken NJ, United States, 2004
- [18] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), *Fourth Assessment Report: Climate Change 2007*, http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml, 2007.
- [19] 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.
- [20] 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).

- [21] S. Wartmann and J. Harnisch, *Reductions of SF₆ emissions from high and medium voltage electrical equipment in Europe*, Ecofys GmbH, Nurnberg, Germany, 2005.
- [22] K. Yokotsu, Y. Ichikawa et al., *Recent practice for huge reduction of SF₆ gas emission from GIS & GCB in Japan*, CIGRE SC A3 & B3 Joint Colloquium and Tutorial in Japan, 26th – 28th Sep 2005, Tokyo, Japan, 2005.
- [23] United States Environmental Protection Agency (EPA), *Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020*, Washington DC, United States, 2006.
- [24] United States Environmental Protection Agency (EPA), *Global Mitigation of Non-CO₂ Greenhouse Gases*, Washington DC, United States, 2006.
- [25] CIGRE WG B3-02, *Template for Voluntary agreement on the use of SF₆ and on measures for SF₆ emission reduction in the national, regional electric industry*, 2003
- [26] CRADA, *Cooperative Research and Development Agreement, Investigation of S₂F₁₀ production and mitigation in compressed SF₆ insulated power system*, Technical Note No. 1, 22, December 1992.
- [27] F.Y. Chu, *SF₆ Decomposition in gas insulated equipment*, IEEE Trans, on Elec. Insul., EL-21, No. 5, October 1986.
- [28] R.J. Van Brunt, J.K. Olthoff, et al., *Production of S₂F₁₀ by electrical discharge in SF₆*, I.H.S. 1992, Swansea, U.K., Vol. 1, p. 418, 1992.
- [29] H.D. Morrison, V.P. Cronin, et al. *Production and decay of S₂F₁₀ in a disconnect switch*, 7th Int. Sym. Gaseous Dielectrics, Knoxville, TE, USA, 1994.
- [30] L. Niemeyer, *S₂F₁₀ in SF₆ insulated equipment*, 7th Intern. Sympos. on Gaseous Dielectrics, Knoxville TE, USA, 1994.
- [31] B. Belmadani, et al., *SF₆ decomposition under power arcs, physical aspects*, IEEE Trans. on Elec. Ins., Vol. 26, No. 6, 1991.
- [32] 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.
- [33] *Documentation of the threshold limit values and biological exposure indices*, 5th ed. Cincinnati, OH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Inc., 1986, 5: 272, 1986.
- [34] *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.
- [35] A. Stokes, C. Jones, et al., *New techniques for recapturing and recycling SF₆ gas and topping up energized equipment*, CIGRE SC A3 and B4 Joint Colloquium, Tokyo, Japan, 2005
- [36] *The patent family* (WO 2005/119149 A1 and applications derived therefrom). International Publication Number WO2005119149 A1, Gas Recovery of Sulphur Hexafluoride, World Intellectual Property Organization, International Publication Date: 15.12.2005
- [37] M. Blundell, C. Jones, et al., *Experience with using cryogenic techniques for recycling arced SF₆ gas for use in switchgear*, Australian Journal of Electrical & Electronics Eng., Vol. 3, No. 3, p 249, 2007.

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

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

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