

RAPPORT TECHNIQUE TECHNICAL REPORT

**CEI
IEC
1634**

Première édition
First edition
1995-04

**Appareillage à haute tension –
Utilisation et manipulation de gaz
hexafluorure de soufre (SF₆)
dans l'appareillage à haute tension**

**High-voltage switchgear and controlgear –
Use and handling of sulphur hexafluoride (SF₆)
in high-voltage switchgear and controlgear**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 1634: 1995

Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles auprès du Bureau Central de la CEI.

Les renseignements relatifs à ces révisions, à l'établissement des éditions révisées et aux amendements peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et dans les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
Publié annuellement
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement

Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 50: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI), qui se présente sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini. Des détails complets sur le VEI peuvent être obtenus sur demande. Voir également le dictionnaire multilingue de la CEI.

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit tirés du VEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Symboles graphiques et littéraux

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera:

- la CEI 27: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*;
- la CEI 417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*;
- la CEI 617: *Symboles graphiques pour schémas*;

et pour les appareils électromédicaux,

- la CEI 878: *Symboles graphiques pour équipements électriques en pratique médicale*.

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit tirés de la CEI 27, de la CEI 417, de la CEI 617 et/ou de la CEI 878, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Publications de la CEI établies par le même comité d'études

L'attention du lecteur est attirée sur les listes figurant à la fin de cette publication, qui énumèrent les publications de la CEI préparées par le comité d'études qui a établi la présente publication.

Validity of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available from the IEC Central Office.

Information on the revision work, the issue of revised editions and amendments may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**
Published yearly
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates

Terminology

For general terminology, readers are referred to IEC 50: *International Electrotechnical Vocabulary (IEV)*, which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field. Full details of the IEV will be supplied on request. See also the IEC Multilingual Dictionary.

The terms and definitions contained in the present publication have either been taken from the IEV or have been specifically approved for the purpose of this publication.

Graphical and letter symbols

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications:

- IEC 27: *Letter symbols to be used in electrical technology*;
- IEC 417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets*;
- IEC 617: *Graphical symbols for diagrams*;

and for medical electrical equipment,

- IEC 878: *Graphical symbols for electromedical equipment in medical practice*.

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC 27, IEC 417, IEC 617 and/or IEC 878, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

IEC publications prepared by the same technical committee

The attention of readers is drawn to the end pages of this publication which list the IEC publications issued by the technical committee which has prepared the present publication.

**RAPPORT
TECHNIQUE – TYPE 2
TECHNICAL
REPORT – TYPE 2**

**CEI
IEC
1634**

Première édition
First edition
1995-04

**Appareillage à haute tension –
Utilisation et manipulation de gaz
hexafluorure de soufre (SF₆)
dans l'appareillage à haute tension**

**High-voltage switchgear and controlgear –
Use and handling of sulphur hexafluoride (SF₆)
in high-voltage switchgear and controlgear**

© CEI 1995 Droits de reproduction réservés — Copyright — all rights reserved

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

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

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembé Genève, Suisse



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE **XC**

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	8
INTRODUCTION	12

SECTION 1: GÉNÉRALITÉS

Articles

1.1	Domaine d'application	16
1.2	Références normatives	16
1.3	Caractéristiques générales du gaz SF ₆	18
1.4	Utilisation du SF ₆ dans l'appareillage	18
1.5	Définitions	18
1.5.1	Tensions assignées	20
1.5.2	Construction	20
1.6	Types d'enveloppes contenant le gaz	22
1.7	Quantité de SF ₆ utilisée dans l'appareillage	22
1.8	Autres utilisations du SF ₆	22
1.9	Conseils d'utilisation du SF ₆ et de ses produits de décomposition	22
1.9.1	Cycle de vie de l'équipement – sections 2 à 6	24
1.9.2	Informations techniques	24

SECTION 2: MISE EN ŒUVRE DU SF₆ NEUF

2.1	Achat	24
2.2	Manipulation et stockage des bouteilles	24
2.3	Matériel pour la manipulation du SF ₆ neuf	26
2.4	Travailler avec du SF ₆ neuf	26
2.4.1	Travaux à l'intérieur	26
2.4.2	Travaux à l'extérieur	28
2.5	Remplissage des appareillages avec du SF ₆ neuf	28
2.5.1	Procédures de remplissage	28
2.5.2	Étanchéité des équipements remplis au SF ₆	30
2.5.3	Vérifications de la qualité du SF ₆ après remplissage	30
2.6	Echappement de SF ₆ dans l'atmosphère pendant le remplissage	32
2.6.1	Echappement de SF ₆ dans l'atmosphère pendant le remplissage d'un équipement moyenne tension	32
2.6.2	Echappement de SF ₆ dans l'atmosphère pendant le remplissage d'un équipement haute tension	32

CONTENTS

	Page
FOREWORD	9
INTRODUCTION	13

SECTION 1: GENERAL

Clause

1.1	Scope	17
1.2	Normative references	17
1.3	General characteristics of SF ₆ gas	19
1.4	Application of SF ₆ in switchgear and controlgear	19
1.5	Definitions	19
1.5.1	Rated voltage	21
1.5.2	Construction	21
1.6	Types of gas enclosure	23
1.7	Quantities of SF ₆ used in switchgear and controlgear	23
1.8	Other uses of SF ₆ gas	23
1.9	Guidance for working with SF ₆ gas and its decomposition products	23
1.9.1	Equipment life cycle – sections 2 to 6	25
1.9.2	Technical information	25

SECTION 2: WORKING WITH NEW SF₆ GAS

2.1	Purchasing	25
2.2	Handling and storage of cylinders	25
2.3	Equipment for handling new SF ₆	27
2.4	Working with new SF ₆	27
2.4.1	Indoor working	27
2.4.2	Outdoor working	29
2.5	Filling switchgear and controlgear with new SF ₆	29
2.5.1	Filling procedures	29
2.5.2	Gas tightness of equipment filled with SF ₆	31
2.5.3	Checks on SF ₆ gas quality after filling	31
2.6	Release of SF ₆ gas to the atmosphere during filling	33
2.6.1	Release of SF ₆ gas to the atmosphere during filling of medium-voltage equipment	33
2.6.2	Release of SF ₆ gas to the atmosphere during filling of high-voltage equipment	33

SECTION 3: FUITE DE SF₆ D'UN ÉQUIPEMENT EN SERVICE

3.1	Types d'enveloppes remplies au gaz	32
3.2	Implications des fuites	34
3.3	Fuite anormale	36
3.4	Sécurité du personnel	36
3.4.1	Installations à l'extérieur	36
3.4.2	Installations à l'intérieur	36
3.5	Implications des fuites sur l'environnement	38
3.5.1	Evaluation des fuites provenant des équipements moyenne tension	38
3.5.2	Evaluation des fuites provenant des équipements haute tension	38

SECTION 4: MANIPULATION DU SF₆ USAGÉ

4.1	Circonstances nécessitant la manipulation de SF ₆ usagé	40
4.2	Matériel requis pour manipuler le SF ₆ usagé	40
4.2.1	Matériel de manipulation de gaz	40
4.2.2	Matériel de sécurité du personnel	40
4.3	Travailler avec du SF ₆ usagé	42
4.3.1	Formation du personnel	42
4.3.2	Équipements et services	42
4.3.3	Travaux à l'extérieur	42
4.3.4	Travaux à l'intérieur	42
4.3.5	État du SF ₆ dans une enveloppe	44
4.3.6	Retirer le SF ₆ usagé d'une enveloppe	46
4.3.7	Ouverture et pénétration dans une enveloppe	48
4.4	Echappement de SF ₆ usagé dans l'atmosphère	50

SECTION 5: ÉCHAPPEMENT ANORMAL DE SF₆

5.1	Circonstances menant à un échappement anormal de SF ₆	50
5.2	Fuite anormale	50
5.3	Echappement anormal issu d'un défaut interne	52
5.3.1	Composition du SF ₆ et des produits de décomposition échappés	54
5.3.2	Installations à l'extérieur	54
5.3.3	Installations à l'intérieur	54
5.4	Echappement anormal de gaz dû à un incendie	54
5.4.1	Décomposition du SF ₆ échappé	56
5.4.2	Installations à l'extérieur	56
5.4.3	Installations à l'intérieur	56
5.4.4	Précautions à prendre pendant et après un incendie	58

SECTION 3: LEAKAGE OF SF₆ FROM EQUIPMENT IN SERVICE

3.1	Types of gas-filled enclosure	33
3.2	The implications of leakage	35
3.3	Abnormal leakage	37
3.4	Safety of personnel	37
3.4.1	Outdoor installations	37
3.4.2	Indoor installations	37
3.5	Environmental implications of leakage	39
3.5.1	Estimation of leakage from medium-voltage equipment	39
3.5.2	Estimation of leakage from high-voltage equipment	39

SECTION 4: HANDLING OF USED SF₆

4.1	Circumstances where handling of used SF ₆ is necessary	39
4.2	Equipment required when handling used SF ₆	41
4.2.1	Gas handling equipment	41
4.2.2	Personal safety equipment	41
4.3	Working with used SF ₆	41
4.3.1	Training of workers	43
4.3.2	Facilities and services	43
4.3.3	Outdoor working	43
4.3.4	Indoor working	43
4.3.5	Condition of the SF ₆ in an enclosure	45
4.3.6	Removing used SF ₆ from an enclosure	47
4.3.7	Opening and entering an enclosure	49
4.4	Release of used SF ₆ to the atmosphere	51

SECTION 5: ABNORMAL RELEASE OF SF₆

5.1	Circumstances leading to abnormal release of SF ₆	51
5.2	Abnormal leakage	51
5.3	Abnormal release due to internal fault	53
5.3.1	Composition of SF ₆ and by-products released	53
5.3.2	Outdoor installations	55
5.3.3	Indoor installations	55
5.4	Abnormal release due to external fire	55
5.4.1	Decomposition of released SF ₆	57
5.4.2	Outdoor installations	57
5.4.3	Indoor installations	57
5.4.4	Precautions during and following a fire	59

SECTION 6: FIN DE VIE DE L'ÉQUIPEMENT REMPLI AU SF₆

6.1	Généralités	58
6.2	Matériaux contenus dans l'appareillage	60
6.3	Quantité de produits de décomposition du SF ₆	60
6.4	Options pour le traitement de l'équipement en fin de vie	62
6.4.1	Option 1: Traitement complet par sous-traitance	62
6.4.2	Option 2: Retrait du SF ₆ par l'utilisateur; traitement par sous-traitance	62
6.4.3	Option 3: Traitement complet par l'utilisateur	62
6.5	Traitement de l'équipement rempli au SF ₆ en fin de vie	62
6.5.1	Retrait et traitement du SF ₆	64
6.5.2	Traitement de l'enveloppe à gaz	64
6.5.3	Solution neutralisante pour les produits de décomposition solides du SF ₆	64
6.5.4	Élimination des solutions usagées de nettoyage et de neutralisation	66
6.5.5	Traitement et élimination des dépôts de poudre et des adsorbants	66
6.5.6	Traitement des pièces retirées des enveloppes remplies au SF ₆	68
6.5.7	Traitement des outils et des vêtements	68

Annexes

A	Hexafluorure de soufre neuf	70
B	Produits de décomposition du SF ₆	78
C	Echappement du SF ₆ de l'appareillage – Effets potentiels sur la santé	86
D	Effets du SF ₆ sur l'environnement	132
E	Recommandations générales de sécurité, équipements de protection du personnel et de premiers soins	138
F	Détection et concentrations maximales recommandées de SF ₆ neuf ou usagé dans l'air	146
G	Bibliographie	154

SECTION 6: END OF LIFE OF SF₆-FILLED EQUIPMENT

6.1	General	59
6.2	Material content of switchgear and controlgear	61
6.3	Quantity of SF ₆ decomposition products	61
6.4	Options for treatment of equipment at end of life	63
6.4.1	Option 1: Complete treatment by a sub-contractor	63
6.4.2	Option 2: Removal of the SF ₆ by the user; treatment by a sub-contractor ..	63
6.4.3	Option 3: Complete treatment by the user	63
6.5	Treatment at end of life of SF ₆ -filled equipment	63
6.5.1	Removal and treatment of the SF ₆	65
6.5.2	Treatment of the gas enclosure	65
6.5.3	Solution for neutralisation of solid SF ₆ decomposition products	65
6.5.4	Disposal of cleaning and neutralising fluids	67
6.5.5	Treatment and disposal of powder deposits and adsorbents	67
6.5.6	Treatment of parts removed from SF ₆ -filled enclosures	69
6.5.7	Treatment of tools and clothing	69

Annexes

A	New sulphur hexafluoride	71
B	SF ₆ decomposition products	79
C	Release of SF ₆ from switchgear and controlgear – Potential effects on health	87
D	Environmental effects of SF ₆	133
E	General safety recommendations, equipment for personal protection and first aid	139
F	Detection and recommended maximum concentrations of new and used SF ₆ in air	147
G	Bibliography	155

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

APPAREILLAGE À HAUTE TENSION – UTILISATION ET MANIPULATION DE GAZ HEXAFLUORURE DE SOUFRE (SF₆) DANS L'APPAREILLAGE À HAUTE TENSION

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par les comités d'études où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 3) Ces décisions constituent des recommandations internationales publiées sous forme de normes, de rapports techniques ou de guides et agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

La tâche principale des comités d'études de la CEI est d'élaborer des Normes internationales. Exceptionnellement, un comité d'études peut proposer la publication d'un rapport technique de l'un des types suivants:

- type 1, lorsque, en dépit de maints efforts, l'accord requis ne peut être réalisé en faveur de la publication d'une Norme internationale;
- type 2, lorsque le sujet en question est encore en cours de développement technique ou lorsque, pour une raison quelconque, la possibilité d'un accord pour la publication d'une Norme internationale peut être envisagée pour l'avenir mais pas dans l'immédiat;
- type 3, lorsqu'un comité d'études a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales, cela pouvant comprendre, par exemple, des informations sur l'état de la technique.

Les rapports techniques de types 1 et 2 font l'objet d'un nouvel examen trois ans au plus tard après leur publication afin de décider éventuellement de leur transformation en Normes internationales. Les rapports techniques de type 3 ne doivent pas nécessairement être révisés avant que les données qu'ils contiennent ne soient plus jugées valables ou utiles.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**HIGH-VOLTAGE SWITCHGEAR AND CONTROLGEAR –
USE AND HANDLING OF SULPHUR HEXAFLUORIDE (SF₆)
IN HIGH-VOLTAGE SWITCHGEAR AND CONTROLGEAR**

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international cooperation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by technical committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 3) They have the form of recommendations for international use published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. In exceptional circumstances, a technical committee may propose the publication of a technical report of one of the following types:

- type 1, when the required support cannot be obtained for the publication of an International Standard, despite repeated efforts;
- type 2, when the subject is still under technical development or where for any other reason there is the future but not immediate possibility of an agreement on an International Standard;
- type 3, when a technical committee has collected data of a different kind from that which is normally published as an International Standard, for example "state of the art".

Technical reports of types 1 and 2 are subject to review within three years of publication to decide whether they can be transformed into International Standards. Technical reports of type 3 do not necessarily have to be reviewed until the data they provide are considered to be no longer valid or useful.

La CEI 1634, rapport technique de type 2, a été établie par le sous-comité 17A: Appareillage à haute tension, du comité d'études 17 de la CEI: Appareillage.

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

Projet de comité	Rapport de vote
17A(Sec)433 10(Sec)334 17C(Sec)155	17A/449/RVC

Les rapports de vote indiqués dans le tableau ci-dessus donnent toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de ce rapport technique.

Le présent document est publié dans la série des rapports techniques de type 2 (conformément au paragraphe G.4.2.2 de la partie 1 des Directives CEI/ISO) comme «norme prospective d'application provisoire» dans le domaine de l'appareillage à haute tension car il est urgent d'avoir des indications sur la meilleure façon d'utiliser les normes dans ce domaine afin de répondre à un besoin déterminé.

Ce document ne doit pas être considéré comme une «Norme internationale». Il est proposé pour une mise en œuvre provisoire, dans le but de recueillir des informations et d'acquérir de l'expérience quant à son application dans la pratique. Il est de règle d'envoyer les observations éventuelles relatives au contenu de ce document au Bureau Central de la CEI.

Il sera procédé à un nouvel examen de ce rapport technique de type 2 trois ans au plus tard après sa publication, avec la faculté d'en prolonger la validité pendant trois autres années, de le transformer en Norme internationale ou de l'annuler.

IECNORM.COM: Click to view the full text of IEC 1634:1995

IEC 1634, which is a technical report of type 2, has been prepared by sub-committee 17A: High-voltage switchgear and controlgear, of IEC technical committee 17: Switchgear and controlgear.

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

Committee draft	Report on voting
17A(Sec)433 10(Sec)334 17C(Sec)155	17A/449/RVC

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

This document is issued in the type 2 technical report series of publications (according to G.4.2.2 of part 1 of the IEC/ISO Directives) as a "prospective standard for provisional application" in the field of high-voltage switchgear and controlgear because there is an urgent requirement for guidance on how standards in this field should be used to meet an identified need.

This document is not to be regarded as an "International Standard". It is proposed for provisional application so that information and experience of its use in practice may be gathered. Comments on the content of this document should be sent to the IEC Central Office.

A review of this type 2 technical report will be carried out not later than three years after its publication, with the options of either extension for a further three years or conversion to an International Standard or withdrawal.

INTRODUCTION

Le SF₆ est utilisé dans l'appareillage depuis plus de 30 années. Il est principalement utilisé dans les équipements dont la tension assignée va de 1 kV jusqu'aux plus hautes tensions assignées pour lesquelles l'appareillage est fabriqué. On estime à plusieurs millions le nombre de différents types d'appareils remplis au SF₆ en service actuellement.

La longue expérience d'utilisation du SF₆ dans l'appareillage a démontré qu'il n'y avait aucun problème majeur quant à son utilisation, sous réserve du respect des précautions élémentaires et du suivi des procédures préalablement établies.

Un certain nombre de normes internationales et nationales et de règlements recouvrent les différents aspects relatifs au SF₆. De plus, de nombreux articles et mémoires techniques sont consacrés au SF₆ et à son utilisation. Une revue complète de la littérature existante a été réalisée par le WG 23.03 du CIGRE [1]*. Dans ce rapport, figurent les résultats d'une étude sur la sécurité du personnel travaillant sur des équipements isolés au gaz (GIS). Très peu d'accidents corporels ont été relevés, parmi lesquels un seul cas de dommages à caractère permanent. Le rapport précise: «Il est à noter qu'à chaque fois qu'un accident est survenu, les personnes ne portaient pas les vêtements de sécurité appropriés et ne respectaient pas les procédures de sécurité préconisées».

Le SF₆ est utilisé dans les systèmes à pression autonome, ou scellés. La faible quantité de SF₆ qui peut s'échapper dans l'atmosphère, n'altère pas la couche d'ozone, et n'a qu'une infime contribution sur l'effet de serre.

Les produits de décomposition issus du SF₆, résultant d'effets thermiques à l'intérieur de l'appareillage (échauffement, arcs, étincelles, décharges, etc.) peuvent présenter une certaine toxicité. Cependant, le risque réel, lié à la toxicité, dépend de la concentration dans la salle d'appareillage, ainsi que du temps d'exposition. En prenant ces facteurs en considération, il est démontré que la présence de SF₆ ne représente pas un plus grand risque pour un opérateur, aussi bien en fonctionnement normal qu'en cas d'incidents (défaut interne, incendie), que les autres matériaux employés (métaux, plastiques, etc.), qui sont utilisés dans tous les types d'appareillage.

Il convient d'estimer le risque global de toxicité et d'atteinte à la santé des personnes, provenant du SF₆ décomposé, en fonction de la quantité de fluorure de thionyle (SOF₂) généré. Le SOF₂ se décompose avec le temps en présence d'humidité, pour former du dioxyde de soufre (SO₂) et du fluorure d'hydrogène (HF). Les effets toxiques de ce mélange ne sont pas très différents de ceux du SOF₂.

Cinq situations liées à l'utilisation du SF₆ sont décrites ci-après:

- a) Utilisation de SF₆ neuf: remplissage.
- b) Conditions normales de fonctionnement de l'appareillage au SF₆: fuite.
- c) Intervention sur du SF₆ usagé, pouvant contenir des produits de décomposition du SF₆: maintenance ou extension d'appareillage.

* Les chiffres entre crochets renvoient à l'annexe G, «Bibliographie».

INTRODUCTION

SF₆ gas has been used in electrical switchgear and controlgear for more than 30 years. Its application is mainly in equipment for rated voltages exceeding 1 kV up to the highest rated voltages for which switchgear and controlgear are manufactured. It is estimated that several millions of the different types of SF₆-filled units are currently in service.

The long experience with SF₆ in electrical switchgear and controlgear has demonstrated that there are no major problems concerning its use, provided that certain elementary precautions and procedures are established and observed.

A number of international and national standards and codes of practice exist, covering various aspects of SF₆ gas. Additionally, many articles and technical papers on SF₆ and its use have been written. An extensive literature survey is given in a report prepared by WG 23.03 of CIGRE [1]*; the report includes the results of a survey concerning the safety of personnel working with GIS equipment. Very few injuries were reported including only one with any permanent consequences. The report states: "It should be noted that in all cases where injury occurred, the individuals concerned did not wear proper protective clothing and did not adopt proper safety procedures".

SF₆ is used in closed or sealed pressure systems. The small quantity of SF₆ which may leak into the atmosphere does not deplete the ozone layer and has a negligible influence on the greenhouse effect.

The by-products of SF₆ created in switchgear and controlgear by thermal effects (heating, arcing, spark, discharge, etc.) may have toxic properties. However, the real toxicity depends on the concentration in the switchgear and controlgear room and the exposure time. Taking these factors into consideration it is shown that the presence of SF₆ does not impose a greater risk to the operator under normal (operating) or abnormal (internal fault, fire) conditions than the other materials used in any other type of switchgear and controlgear (metals, plastics, etc.).

The overall toxicity and health risks to persons due to arced SF₆ should be estimated using the quantity of thionyl fluoride (SOF₂) generated. SOF₂ decomposes in time in the presence of moisture to form sulphur dioxide (SO₂) and hydrogen fluoride (HF). The toxic effects of this mixture are not greatly different from those due to SOF₂.

Five situations are dealt with concerning working with SF₆:

- a) Working with new SF₆: filling.
- b) SF₆ switchgear and controlgear under normal service conditions: leakage.
- c) Working with used SF₆ which may contain decomposition products: maintenance or extension of switchgear and controlgear.

* The figures in square brackets refer to annex G, "Bibliography".

d) Conditions anormales: par exemple, défaut d'arc interne ou incendie provoquant l'ouverture de l'enveloppe.

1) Pendant et immédiatement après le défaut: sécurité des personnes.

2) Après le défaut ou l'incendie: travaux de remise en état.

e) Fin de vie de l'appareillage: recyclage, enlèvement.

Les valeurs limites approximatives de concentration sont indiquées ci-dessous pour les différents cas. Ces valeurs, données à titre indicatif pour les cas où l'on peut procéder à des mesures, se rapportent à la concentration maximale admissible (le TLV) pour le gaz concerné. Si ces valeurs sont dépassées, il convient de ventiler jusqu'à ce que les concentrations redeviennent admissibles. Si cela n'est pas possible, il convient d'utiliser des appareils respiratoires.

Pour le cas a) (remplissage):

1 000 ppmv de SF_6 .

C'est la valeur de TLV pour le SF_6 neuf.

Pour les cas b) (fuite), c) (maintenance et extensions), et e) (fin de vie):

1,6 ppmv de SOF_2 ou 200 ppmv de SF_6 .

La valeur indiquée pour le SOF_2 est le TLV de ce produit. Elle ne tient pas compte d'une éventuelle hydrolyse du SOF_2 aboutissant à la formation de SO_2 et de HF. Afin de prendre en compte ce phénomène et de simplifier les prescriptions de mesure et d'interprétation, on indique également une limite de concentration de 200 ppmv de SF_6 . Cette valeur correspond à un mélange d'air ambiant et de SF_6 ayant subi une *décomposition moyenne*. Elle tient compte des TLV des composants potentiellement toxiques SOF_2 , SO_2 et HF.

Pour le cas d)2) (suite à un défaut interne ou à un incendie extérieur):

1,6 ppmv de SOF_2 ou 20 ppmv de SF_6 .

La valeur indiquée pour le SOF_2 est le TLV de ce produit. Une autre limite de concentration utilisable de 20 ppmv de SF_6 est indiquée, qui correspond à un mélange d'air ambiant et d'un faible volume de SF_6 ayant subi une *forte décomposition*. Elle tient compte du TLV du SOF_2 et d'une possible (quoique improbable) hydrolyse.

Pour le cas d)1) (par exemple pendant, et immédiatement après un défaut interne), l'évacuation du personnel sera la réaction première. Pour ce genre d'exposition de courte durée, il n'existe pas de limite établie pour la concentration en SOF_2 .

Afin d'évaluer les risques potentiels pour la santé dans ce genre de cas exceptionnels, les concentrations probables de SOF_2 dans l'atmosphère de la salle d'appareillage sont calculées pour différents cas de défauts. Ces concentrations sont ensuite comparées avec une valeur de référence pour les expositions momentanées non répétitives.

Une valeur de référence de 500 ppmv de SOF_2 dans l'air a été adoptée. Elle provient de recherches toxicologiques effectuées sur des lapins exposés pendant 1 h. On suppose qu'en cas de défaut, le temps d'exposition serait nettement inférieur à cette durée, et que l'exposition momentanée de personnes à ce niveau ne représente pas un risque inacceptable.

- d) Abnormal situations: e.g. internal fault or external fire provoking opening of the enclosure.
- 1) During and immediately after the fault: operator safety.
 - 2) After the fault or external fire: restorative work.
- e) End of life of equipment: recycling, disposal.

Approximate concentration limit values are given below for the different situations. These values are indications for those cases where measurements can be made and are related to the threshold limit value (the TLV) of the corresponding gas. If these values are exceeded, ventilation should be used until the concentrations fall to acceptable values. If this cannot be achieved, respirators should be used.

For situation a) (filling):
1 000 ppmv of SF₆.

This is the TLV for new SF₆.

For situations b) (leakage), c) (maintenance and extension) and e) (end of life):
1,6 ppmv of SOF₂ or 200 ppmv SF₆.

The value given for SOF₂ is the TLV of SOF₂. This does not take account of the possible hydrolysis of SOF₂ whereby SO₂ and HF are formed. In order to take account of this and to simplify the requirements for measurement and interpretation, a concentration limit of 200 ppmv SF₆ is also given. This value corresponds to a mixture of the ambient air with SF₆ which has been subjected to *medium decomposition*. It takes account of the TLVs of the potentially toxic components SOF₂, SO₂ and HF.

For situation d)2) (after an internal fault or external fire):
1,6 ppmv of SOF₂ or 20 ppmv SF₆.

The value given for SOF₂ is the TLV of SOF₂. An alternative concentration limit of 20 ppmv SF₆ is given which corresponds to a mixture of the ambient air with a small volume of SF₆ which has been subjected to *high decomposition*. It takes account of the TLV of SOF₂ and allows for possible (although unlikely) hydrolysis.

For situation d)1) (for example during and immediately after an internal fault), evacuation will be the initial response. For such short-term exposure there is no established limit for the SOF₂ concentration.

In order to assess the potential risks to health in such exceptional cases, the likely SOF₂ concentrations in the switchroom atmosphere are calculated for various fault situations. These concentrations are then compared with a reference value for non-repetitive momentary exposure.

A reference value of 500 ppmv SOF₂ in air has been adopted. This is taken from toxicological research performed on rabbits which were exposed for a period of 1 h. It is assumed that in a fault situation, the exposure time would be significantly shorter than this and that momentary exposure of persons to this level will not present unacceptable risk.

APPAREILLAGE À HAUTE TENSION – UTILISATION ET MANIPULATION DE GAZ HEXAFLUORURE DE SOUFRE (SF₆) DANS L'APPAREILLAGE À HAUTE TENSION

Section 1: Généralités

1.1 Domaine d'application

Jusqu'à présent, aucun document international ne donnait de conseils de sécurité concernant le personnel travaillant avec du SF₆. Ce rapport a pour objet de les donner.

Il est impossible d'inclure toutes les instructions existantes relatives au SF₆ dans ce rapport, qui couvre principalement les domaines relatifs à la sécurité, et donne des informations de base et des conseils quant à l'emploi du SF₆ dans l'appareillage, dans des conditions de fonctionnement normal ou défectueux.

Il convient de considérer ces recommandations comme le minimum nécessaire pour garantir la sécurité du personnel travaillant avec du SF₆.

Ce rapport ne concerne que l'appareillage rempli de SF₆ industriellement pur.

1.2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour le présent Rapport technique. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision et les parties prenantes aux accords fondés sur le présent Rapport technique sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 56: 1987, *Disjoncteurs à courant alternatif à haute tension*

CEI 298: 1990, *Appareillage sous enveloppe métallique pour courant alternatif de tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures ou égales à 52 kV*

CEI 376: 1971, *Spécifications et réception de l'hexafluorure de soufre neuf*

CEI 480: 1974, *Guide relatif au contrôle de l'hexafluorure de soufre (SF₆) prélevé sur le matériel électrique*

CEI 517: 1990, *Appareillage sous enveloppe métallique à isolation gazeuse de tension assignée égale ou supérieure à 72,5 kV*

CEI 695-7-1: 1993, *Essais relatifs aux risques du feu – Partie 7: Guide sur la minimisation des risques toxiques dus à des feux impliquant des produits électrotechniques – Section 1: Généralités*

HIGH-VOLTAGE SWITCHGEAR AND CONTROLGEAR – USE AND HANDLING OF SULPHUR HEXAFLUORIDE (SF₆) IN HIGH-VOLTAGE SWITCHGEAR AND CONTROLGEAR

Section 1: General

1.1 Scope

Up to now there has been no international document giving guidance with regard to the safety of personnel working with SF₆. To give such guidance is the aim of this report.

It is impossible to incorporate all the existing instructions relating to SF₆ in this report, which considers mainly safety aspects and gives basic information and guidelines for working with SF₆ used in switchgear and controlgear during normal and abnormal service conditions.

These recommendations should be considered as the minimum necessary to ensure the safety of personnel who work with SF₆.

This report is concerned with switchgear and controlgear filled with industrially pure SF₆ gas.

1.2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this technical report. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this technical report are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 56: 1987, *High-voltage alternating-current circuit-breakers*

IEC 298: 1990, *A.C. metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV*

IEC 376: 1971, *Specification and acceptance of new sulphur hexafluoride*

IEC 480: 1974, *Guide to the checking of sulphur hexafluoride (SF₆) taken from electrical equipment*

IEC 517: 1990, *Gas-insulated metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages of 72,5 kV and above*

IEC 695-7-1: 1993, *Fire hazard testing – Part 7: Guidance on the minimization of toxic hazard due to fires involving electrotechnical products – Section 1: General*

1.3 Caractéristiques générales du gaz SF₆

Le SF₆ propre et non utilisé est incolore, inodore, et n'a aucun goût. Il est incombustible et est chimiquement inerte aux températures ambiantes. Bien qu'en principe un mélange de 20 % d'oxygène et de 80 % de SF₆ pur puisse être inhalé sans effet nocif, il est généralement admis que la concentration maximale acceptable dans le cadre d'un travail de 8 h par jour est de 1 000 ppm volume (ppmv) (voir A.5). Cette valeur n'est en rien une limite liée à la toxicité, mais une valeur fixée par convention pour tous les gaz non toxiques et inoffensifs qui ne sont pas naturellement présents dans l'atmosphère depuis longtemps.

Les propriétés générales du SF₆ neuf sont décrites dans la section 2 de la CEI 376 et dans l'annexe A de ce rapport. Les méthodes acceptables d'emploi du SF₆ neuf sont décrites dans la section 2 de ce rapport.

Des conseils pour travailler en toute sécurité avec le SF₆ sont nécessaires pour les raisons suivantes:

a) Le SF₆ est cinq fois plus dense que l'air et, s'il est libéré dans l'atmosphère en quantité suffisante, il a tendance au départ à s'accumuler vers le bas. Le risque d'asphyxie dû à un déficit en oxygène est alors réel pour le personnel travaillant en dessous du niveau du sol (par exemple, dans une galerie ou une tranchée). Après un certain temps d'aération qui dépend de l'intensité du mouvement de l'air, le SF₆ se disperse dans l'atmosphère environnante.

b) Le SF₆ se décompose à des températures élevées (au-delà de 500 °C environ en l'absence de matériaux catalytiques). Ce phénomène de décomposition peut éventuellement se produire si le gaz est chauffé (par exemple, par une flamme) et se produit si le gaz est soumis à un arc électrique, une étincelle ou autre type de décharge électrique. Certains produits de décomposition peuvent présenter des effets toxiques, mais dans les appareillages fonctionnant normalement, ceux-ci restent confinés à l'intérieur d'un environnement bien contrôlé et fermé.

Lorsque des opérations de maintenance sont à effectuer, ou si du gaz est libéré dans l'atmosphère, des précautions pour assurer la sécurité du personnel sont requises (voir sections 4 et 5).

c) Le gaz SF₆, quand il est libéré dans l'atmosphère, a une durée de vie relativement longue. Il est donc souhaitable de minimiser la quantité libérée. L'annexe D fournit des informations sur les effets du SF₆ sur l'environnement.

1.4 Utilisation du SF₆ dans l'appareillage

Les principales caractéristiques du SF₆ qui en font un produit particulièrement adapté à une utilisation dans le matériel électrique sont:

- sa tenue diélectrique élevée;
- son excellente capacité d'extinction d'arc;
- sa haute stabilité chimique et sa non-toxicité.

1.5 Définitions

Il existe de nombreux types d'appareillages utilisant le SF₆ comme gaz diélectrique ou comme milieu d'extinction d'arcs. Pour les besoins du présent Rapport technique, les définitions suivantes s'appliquent:

1.3 General characteristics of SF₆ gas

Clean, unused SF₆ gas has no colour, smell or taste. It is non-combustible and is chemically inert at room temperatures. Although in principle a mixture of 20 % oxygen and 80 % pure SF₆ can be inhaled without adverse effect, it is generally accepted that the maximum concentration permitted in a working environment during an 8 h period of exposure is 1 000 ppm by volume (see A.5). This value is not related to toxicity, but is an established limit for all non-toxic, harmless gases which have not been present in the atmosphere for a long period of time.

The general properties of new SF₆ are described in section 2 of IEC 376 and in annex A of this report. Acceptable methods of working with new SF₆ are given in section 2 of this report.

Guidance for working safely with SF₆ is required for the following reasons:

- a) SF₆ gas is about five times heavier than air and will, if released into the atmosphere in a sufficient quantity, tend to accumulate initially in low-lying areas. This could present a danger of asphyxiation due to oxygen deficiency if personnel are working, for example, below ground in ducts or trenches. After a period of time depending on the amount of air movement, the SF₆ becomes diffused into the surrounding atmosphere.
- b) SF₆ decomposes at high temperatures (above about 500 °C in the absence of catalytic material). Decomposition may occur if the gas is heated for example by a flame and will occur if there is an electric arc, spark or other electrical discharge within it. Some of the decomposition products may have toxic effects, but under normal service conditions in switchgear and controlgear these are contained within a well-controlled and enclosed environment.

When maintenance is required, or if gas is exhausted into the atmosphere, precautions are needed to ensure the safety of personnel (see sections 4 and 5).

- c) SF₆ gas, when released into the atmosphere, has a relatively long life. It is therefore desirable to minimise the quantity released. Annex D provides information concerning the effects of SF₆ gas on the environment.

1.4 Application of SF₆ in switchgear and controlgear

The main features of SF₆ which determine its suitability for use in electrical equipment are:

- its high dielectric strength;
- its excellent arc-quenching capabilities;
- its high chemical stability and non-toxicity.

1.5 Definitions

There are many different types of switchgear and controlgear which use SF₆ gas as a dielectric and/or arc-quenching medium. For the purpose of this Technical Report, the following definitions apply:

1.5.1 Tensions assignées

moyenne tension: Tension assignée comprise entre 1 kV et 52 kV inclus.

haute tension: Tension assignée au-delà de 52 kV.

Cette distinction est précisée, car il existe souvent de grandes différences de conception, de construction et de taille entre les deux catégories.

1.5.2 Construction

appareils sous enveloppe: Equipement principalement à isolement dans l'air, le SF₆ étant contenu à l'intérieur de l'enceinte de coupure réalisée en métal ou en résine moulée. Les disjoncteurs et interrupteurs-sectionneurs moyenne tension utilisant du SF₆ sont souvent conçus de cette façon.

appareillage bloc isolé au SF₆: L'appareillage de coupure d'artère (RMU) moyenne tension est souvent de ce type de construction.

appareils isolés au gaz ou GIS: Equipement utilisant le SF₆ comme isolement principal. Les différents compartiments à l'intérieur de cet ensemble isolé au gaz contenant les diverses unités fonctionnelles (disjoncteur, interrupteur, jeu de barres) peuvent être physiquement isolés les uns des autres, de sorte que chacun peut être considéré comme une enveloppe séparée isolée au gaz.

appareils ouverts: Appareils conçus pour être directement raccordés sur lignes ou sur câbles.

1.5.3 SF₆ neuf: Le SF₆ neuf ou de qualité fournisseur répond aux exigences de pureté décrites dans la CEI 376. Ces conditions et les propriétés du gaz sont décrites dans l'annexe A.

Le SF₆ neuf est chimiquement inerte à des températures normales, il est incolore, inodore, n'a pas de goût, et est non toxique [2]. C'est un agent asphyxiant, agissant par déplacement de l'air. En tant que tel, il peut constituer un danger s'il est libéré en quantité et plus particulièrement dans un espace clos.

Tout SF₆ ne répondant pas à ces critères est considéré comme usagé (voir section 4).

1.5.4 fuite: Une fuite dans un équipement en service est un échappement fortuit et habituellement continu de gaz provenant de l'enveloppe d'un système à pression autonome ou scellé. La fuite se produit au niveau des joints d'étanchéité et des raccords, ou par diffusion moléculaire à travers certains matériaux constituant l'enveloppe. Le phénomène de fuite n'inclut pas le dégagement de gaz lors d'interventions sur le système destiné à le contenir.

1.5.5 SF₆ usagé: Du SF₆ qui a pu être contaminé par des impuretés ou qui a été soumis aux conditions de fonctionnement après la mise sous tension de l'appareillage.

L'annexe B fournit des informations sur les produits de décomposition du SF₆ qui se présentent sous forme gazeuse ou solide. Les quantités de produits de décomposition sont faibles, mais certains d'entre eux peuvent avoir des effets toxiques. Certaines précautions sont donc à prendre pendant la manipulation du SF₆ usagé.

1.5.6 manipulation: Toute intervention qui peut impliquer un contact avec du SF₆ usagé ou ses produits de décomposition par les opérateurs.

1.5.1 *Rated voltage*

medium-voltage: Rated voltages from 1 kV up to and including 52 kV.

high-voltage: Rated voltages above 52 kV.

This distinction is made because there are often significant differences in design, construction and size between the two categories.

1.5.2 *Construction*

enclosed equipment: Equipment using mainly air as the primary insulating medium. The SF₆ is contained in switching enclosures made from metal or cast resin. SF₆-filled medium-voltage circuit-breaker and load-break switch equipment is frequently of this type of construction.

SF₆-insulated cubicles: Medium-voltage Ring Main Units (RMU) are frequently of this type of construction.

gas-insulated or GIS: Equipment using mainly SF₆ as the primary insulating medium. Compartments within a gas-insulated assembly, containing various functional modules (circuit-breakers, switches, busbars), may be physically isolated from each other, such that each can be regarded as a separate gas enclosure.

open terminal apparatus: Item of equipment for direct connection to lines or cables.

1.5.3 new SF₆: New or supplier Quality SF₆ is SF₆ which complies with the requirements for purity stated in IEC 376. These requirements and the properties of the gas are detailed in annex A.

New SF₆ is chemically non-reactive at normal temperatures, has no colour, smell or taste and it is non-toxic [2]. It is an asphyxiant, acting by displacement of the air. As such it can constitute a hazard if released in quantity and especially into a confined space.

Any SF₆ not complying with the above definition will be regarded as used SF₆ (see section 4).

1.5.4 leakage: Leakage from equipment in service is the unplanned, usually continuous, emission of gas from a sealed or closed system. Leakage occurs at seals and joints and by molecular diffusion through certain enclosure materials. Leakage does not include releases of gas due to intervention with the systems intended to contain it.

1.5.5 used SF₆: SF₆ which may have been contaminated by impurities or which has been subjected to operating conditions after energisation of the switchgear and controlgear.

Annex B provides information regarding the decomposition products of SF₆, which occur as gaseous and solid by-products. The quantities of decomposition products are small but some of them may have toxic effects, so certain precautions are required when handling used SF₆.

1.5.6 handling: Any process which might involve contact of workers with used SF₆ or SF₆ decomposition products.

Cela comprend le retrait total, ou le prélèvement d'un échantillon pour essai, du SF₆ contenu dans l'appareillage, l'ouverture des enveloppes contenant du gaz, leur nettoyage après ouverture, et les travaux à l'intérieur des grandes enveloppes.

1.6 Types d'enveloppes contenant le gaz

Une enveloppe contenant le gaz, telle que généralement utilisée dans l'appareillage rempli au SF₆, est classée comme pouvant être:

- un système à pression autonome, ou
- un système à pression scellé.

(Voir l'annexe EE de la CEI 56, l'annexe GG de la CEI 298 et l'annexe DD de la CEI 517.)

Pour un système à pression autonome, la remise à niveau pour compenser les pertes dues aux fuites peut être nécessaire et dans le cadre d'une maintenance régulière, la vidange et le remplacement du gaz peuvent être effectués.

Dans les systèmes à pression scellés, le SF₆ est contenu dans des enveloppes scellées à vie qui ne sont jamais ouvertes pendant la durée de vie du matériel.

1.7 Quantité de SF₆ utilisée dans l'appareillage

La pression de SF₆ utilisé dans l'appareillage est en général relativement faible (0,1 MPa à 0,9 MPa absolu). La quantité de SF₆ utilisée dans un compartiment rempli au gaz dépend des caractéristiques et de la conception de l'équipement. Cette quantité varie dans une fourchette allant de 0,1 kilogramme pour un pôle d'un appareil de coupure moyenne tension jusqu'à plusieurs centaines de kilogrammes dans le plus grand compartiment d'un poste haute tension de type GIS.

La production mondiale annuelle de SF₆ est évaluée à environ 5 000 à 8 000 tonnes (1990), dont 2 000 à 4 000 tonnes sont utilisées dans l'appareillage haute tension.

1.8 Autres utilisations du SF₆

Le reste du SF₆ produit annuellement est utilisé dans d'autres applications haute tension, comme les câbles, les lignes de transport tubulaires, les transformateurs et les générateurs électrostatiques, et dans des applications non électriques, comme la détection de fuites, les études nécessitant un gaz traceur, les activités de fonderie et le double vitrage.

1.9 Conseils d'utilisation du SF₆ et de ses produits de décomposition

Ce rapport décrit l'utilisation du SF₆ et de ses dérivés chimiques produits dans l'appareillage en cours de fonctionnement normal et dans certaines conditions anormales. Deux principaux aspects sont traités

- les effets de l'exposition au SF₆ et de ses produits de décomposition sur l'homme;
- les effets du SF₆ et de ses produits de décomposition sur l'environnement.

Les risques liés au contact avec le SF₆ et les précautions à prendre sont examinés pour chaque étape du cycle de vie normale du matériel, ainsi que pour les cas de fonctionnement anormal.

This includes removing the gas from an item of switchgear or controlgear either completely or as a sample to be tested, opening a gas-filled enclosure, cleaning out an open enclosure and working inside large enclosures.

1.6 Types of gas enclosure

A gas enclosure as normally used in SF₆ switchgear and controlgear is classified as either:

- closed pressure system, or
- sealed pressure system.

(See annex EE of IEC 56, annex GG of IEC 298 and annex DD of IEC 517.)

For a closed pressure system, replenishment of losses due to leakage may be necessary and periodic maintenance involving removal and replacement of the gas is possible.

For a sealed pressure system, the SF₆ gas is in "sealed-for-life" enclosures, which are never opened during the service life of the equipment.

1.7 Quantities of SF₆ used in switchgear and controlgear

SF₆ gas in switchgear and controlgear is generally at relatively low pressure (0,1 MPa to 0,9 MPa absolute); the quantity used in a gas-filled compartment depends on the rating and design of the equipment. The quantity varies approximately between 0,1 kilogram in one pole of a medium-voltage switching device and several hundreds of kilograms in the largest compartment of a large high-voltage GIS substation.

The world production of SF₆ gas per year is estimated to be between 5 000 and 8 000 tonnes (1990). Of this, between 2 000 and 4 000 tonnes is used in high-voltage switchgear and controlgear.

1.8 Other uses of SF₆ gas

The remainder of the SF₆ produced annually is used in other high-voltage applications, for example in cables, tubular transmission lines, transformers and electrostatic generators and in non-electrical applications such as for leak detection, studies requiring a tracer gas, foundry practices and double glazing.

1.9 Guidance for working with SF₆ gas and its decomposition products

This report deals with working with SF₆ gas and those of its chemical derivatives which are produced in switchgear and controlgear during normal service and under certain abnormal conditions. Two main aspects are covered:

- the effects on humans of exposure to SF₆ and its decomposition products;
- the effects on the environment of SF₆ and its decomposition products.

The risks associated with contact with SF₆ gas and suitable precautions are discussed for each stage in the normal life cycle of an item of equipment and under abnormal conditions.

1.9.1 Cycle de vie de l'équipement – sections 2 à 6

1.9.1.1 Remplissage

A la fabrication et à la mise en oeuvre du matériel, celui-ci est rempli de SF₆ neuf. La section 2 traite de ce cas.

1.9.1.2 Fonctionnement normal

Quand le matériel est installé en service, une faible quantité de SF₆ s'échappe due aux fuites, pouvant contenir des produits de décomposition. La section 3 traite de ce cas.

1.9.1.3 Maintenance

Le SF₆ pouvant éventuellement contenir des produits de décomposition gazeux peut devoir être retiré. Il peut y avoir alors nécessité d'accès aux compartiments renfermant les produits de décomposition solides. Des conseils de sécurité sont donnés dans la section 4.

1.9.1.4 Echappement anormal

Le SF₆ peut s'échapper suite à un incident inhabituel, tel qu'une fuite anormale, un défaut interne, ou un incendie externe. Ce type d'incident est très rare. Des conseils sont donnés dans la section 5.

1.9.1.5 Fin du cycle de vie

Le SF₆ doit être retiré, et le matériel recyclé ou détruit. Ce cas est traité à la section 6.

1.9.2 Informations techniques

Les généralités techniques concernant le SF₆, ses produits de décomposition, leurs sources, toxicités et effets sur l'environnement et sur l'homme sont décrits dans les annexes.

Section 2: Mise en oeuvre du SF₆ neuf

Cette section fournit des conseils pour travailler avec du SF₆ neuf, c'est-à-dire lorsque l'enveloppe est remplie à l'usine, lors de la fabrication, ou après installation du matériel sur le site.

2.1 Achat

Les fabricants fournissent le SF₆ sous forme liquide dans des bouteilles de taille variable et sous une pression avoisinant les 2,2 MPa relatifs. Il convient que tout SF₆ acheté soit conforme à la CEI 376, et qu'il soit accompagné d'un certificat de conformité.

2.2 Manipulation et stockage des bouteilles

Les bouteilles doivent être manipulées avec précaution et conservées dans un endroit frais, sec et bien ventilé, à l'écart de tout matériel inflammable ou explosif. Il convient qu'elles soient aussi à l'abri d'une exposition directe au soleil, surélevées si le sol est humide, attachées pour éviter leur chute et posées, la vanne d'ouverture vers le haut.

1.9.1 *Equipment life cycle – sections 2 to 6*

1.9.1.1 *Filling*

Manufacture and commissioning of the equipment. It is filled with new SF₆. Section 2 deals with this stage.

1.9.1.2 *Normal service*

The equipment is installed and in service. It releases a small amount of SF₆ due to leakage, which may contain decomposition products. This is covered in section 3.

1.9.1.3 *Maintenance*

SF₆, possibly containing gaseous decomposition products may have to be removed. Access may be required to enclosures containing solid decomposition products. Section 4 provides guidance for safe working.

1.9.1.4 *Abnormal release*

Abnormal incidents, during which SF₆ gas is released, due to abnormal leakage, internal fault, or external fire are dealt with. Such incidents occur very infrequently. Guidance is given in section 5.

1.9.1.5 *End of life*

The SF₆ has to be removed and the equipment is recycled or disposed of. This is dealt with in section 6.

1.9.2 *Technical information*

General technical information concerning SF₆ gas, its decomposition products, their sources and toxicities and their effects on the environment and humans is given in the annexes.

Section 2: Working with new SF₆ gas

This section provides guidance for working with new SF₆, i.e. when a gas enclosure is filled, either in the factory or after the equipment has been installed on site.

2.1 Purchasing

SF₆ is supplied by manufacturers as a liquid in containers of various sizes at a pressure of approximately 2,2 MPa gauge. All SF₆ purchased should meet the requirements of IEC 376 and consignments should be accompanied by a certificate of compliance.

2.2 Handling and storage of cylinders

Cylinders shall 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, with their outlet valves upwards.

Il convient que les bouteilles soient clairement étiquetées pour faciliter l'identification du produit contenu, celles contenant du gaz neuf étant entreposées séparément de celles contenant du gaz usagé.

Comme pour tout gaz sous pression, il y a risque d'explosion si les bouteilles sont exposées à une trop forte chaleur comme ce serait le cas dans un incendie. Un stockage à l'extérieur, sous abri avec protection contre les intempéries et les radiations solaires, est recommandé.

2.3 Matériel pour la manipulation du SF₆ neuf

Le SF₆ neuf doit être transféré d'une bouteille sous haute pression vers l'enveloppe à gaz de l'appareillage ou équipement, pour la remplir. La pression de remplissage est toujours très inférieure à la pression de la bouteille. Il convient que le matériel employé pour le remplissage réponde aux spécifications suivantes:

- il convient que les conduites de gaz soient protégées de façon appropriée contre les dommages mécaniques;
- il convient que les vannes et les régulateurs soient entretenus et changés si nécessaire;
- il convient que les manomètres soient régulièrement étalonnés;
- il convient que la tuyauterie et les vannes d'alimentation soient montées de telle sorte qu'elles puissent être évacuées avec l'enveloppe à remplir sans avoir à les purger.

2.4 Travailler avec du SF₆ neuf

Il convient que les agents manipulant le SF₆ neuf soient familiarisés avec les propriétés du gaz (voir annexe A) et le contenu de la présente section.

Comme c'est le cas avec tous les gaz sous pression, un dégagement soudain de SF₆ provoque localement une chute de la température pouvant provoquer des gelures. En travaillant sur des conduits, des vannes ou des connecteurs sous haute pression présentant un risque d'échappement de gaz soudain, il convient de porter des gants appropriés.

2.4.1 Travaux à l'intérieur

En manipulant du SF₆ à l'intérieur, une certaine quantité de gaz peut s'accumuler dans l'air. Une ventilation appropriée est donc nécessaire. S'il existe une possibilité que le SF₆ soit dégagé dans le lieu de travail, il convient d'interdire de fumer, d'utiliser des appareils à flamme, des appareils de chauffage fonctionnant au-delà de 200 °C, ou de souder sans précautions particulières.

2.4.1.1 Concentration maximale de SF₆ sur les lieux de travail

Quand du SF₆ neuf est manipulé à l'intérieur comme dans une usine ou un poste pendant le remplissage, le SF₆ peut s'accumuler pendant un certain temps. Il convient de fournir des procédures écrites décrivant les mesures à effectuer périodiquement sur la concentration de SF₆ ainsi que l'équipement conçu pour ces mesures.

La concentration maximale permise sur un lieu de travail est de 1 000 ppm volume (ppmv). Si la concentration excède cette limite, il convient de ventiler la pièce afin de ramener le niveau de concentration en dessous de 1 000 ppmv.

Cylinders should be clearly labelled to identify their contents; cylinders containing new gas should be physically separated from those containing used gas.

As with any pressurised gas, there is a risk of explosion of cylinders if they are excessively heated as might occur in a fire. Storage outdoors with suitable protection from weather and intense solar radiation is recommended.

2.3 Equipment for handling new SF₆

New SF₆ has to be transferred from a cylinder at high pressure into the gas enclosure of the switchgear and controlgear or controlgear to be filled. The filling pressure is invariably much lower than the cylinder pressure. Equipment used for filling should comply with the following requirements:

- pipework should be adequately protected against mechanical damage;
- valves and regulators should be maintained or replaced as necessary;
- pressure gauges should be calibrated regularly;
- delivery pipes and associated valves should be arranged so that they can be evacuated along with the enclosure to be filled in order to avoid a need for purging.

2.4 Working with new SF₆

Workers handling new SF₆ gas should be familiar with the properties of the gas (see annex A) and with the contents of this section.

As is the case with any pressurised gas, a sudden escape of SF₆ gives rise to a local drop in temperature and may result in freezing. When working on high-pressure piping, valves or connectors where there is a risk of a sudden release, suitable gloves should be worn.

2.4.1 Indoor working

When handling new SF₆ indoors, some gas may accumulate in the air, so adequate ventilation should be provided. If there is a possibility that SF₆ may be released into the work area then open fire, smoking, heating exceeding 200 °C and welding without special precautions should not be permitted.

2.4.1.1 Maximum concentration of SF₆ in work areas

Where new SF₆ gas is handled in an indoor environment such as a factory or substation where equipment is being filled, SF₆ may accumulate over a period of time. Written procedures for periodically measuring the SF₆ concentration should be provided along with equipment for performing such measurements.

The maximum permissible concentration of SF₆ in a workroom is 1 000 ppm by volume (ppmv). If the concentration exceeds this level, the area should be ventilated so as to restore the concentration to below 1 000 ppmv.

Il y a lieu de prêter une attention particulière aux endroits situés en contre-bas comme les conduits de câbles, les vides techniques etc., où le SF₆ pourrait s'accumuler. Si des travaux doivent être exécutés dans de tels endroits, il est bon qu'une ventilation appropriée, forcée si nécessaire, soit appliquée.

2.4.1.2 Informations de sécurité sur les lieux de travail

Dans les pièces où le SF₆ est manipulé, il convient qu'une notice d'information sur la sécurité soit affichée. Sur cette notice il y a lieu que figure au moins l'interdiction de fumer et d'utiliser un appareil à flamme.

2.4.2 Travaux à l'extérieur

Lorsque du SF₆ neuf doit être manipulé à l'extérieur, la ventilation naturelle empêche généralement l'accumulation de gaz. Des précautions spéciales telles que détaillées en 2.4.1 sont par conséquent requises seulement si des travaux doivent être effectués à proximité immédiate de l'équipement.

2.5 Remplissage des appareillages avec du SF₆ neuf

La grande majorité de l'appareillage moyenne tension utilise un système à pression scellé, défini en 1.6. Ce type d'équipement est rempli de SF₆ à l'usine, et aucune autre intervention vis-à-vis du gaz n'est à prévoir tout au long de son cycle de vie.

L'appareillage haute tension et certains types d'équipements moyenne tension utilisent un système à pression autonome, défini en 1.6. Un tel équipement peut nécessiter un remplissage ou un complément de remplissage sur le site.

Il convient que les procédures suivies pendant la fabrication et la mise en oeuvre soient conçues afin de respecter les quatre principes fondamentaux suivants:

- a) que le personnel travaillant sur l'équipement ne soit pas soumis à un niveau de risque inacceptable;
- b) que les dispositions soient prises pour minimiser la quantité de gaz pouvant s'échapper dans l'atmosphère;
- c) que les enveloppes, une fois remplies, ne fuent pas plus que les spécifications du fabricant ne le définissent;
- d) que les enveloppes, une fois remplies, contiennent un gaz de la qualité requise par les spécifications du fabricant.

2.5.1 Procédures de remplissage

La méthode la plus commune de remplissage d'une enveloppe consiste à évacuer l'air contenu dans l'enveloppe et les conduites de remplissage à l'aide d'une pompe à vide jusqu'à obtenir une pression résiduelle prédéterminée, avant d'introduire le SF₆. Cette méthode sera appelée méthode par évacuation.

Si une autre méthode doit être utilisée, cela doit être alors précisé dans les spécifications du fabricant.

La méthode choisie risque d'affecter la pureté du gaz contenu dans l'équipement, c'est pour cette raison que la méthode par évacuation est préférable.

Particular attention should be given to low-lying areas such as cable-ducts, cellars, etc., where SF₆ gas could accumulate. If work is to be carried out in such an area, it should be ventilated adequately using forced air movement if necessary.

2.4.1.2 *Safety information for work areas*

In workrooms where SF₆ gas is handled, an appropriate safety notice should be displayed. This should state at least that smoking and open fire are not permitted.

2.4.2 *Outdoor working*

Where new SF₆ has to be handled outdoors, natural ventilation generally prevents accumulation of the gas. Special precautions as detailed in 2.4.1 are therefore only required if work is to be carried out in close proximity to the equipment.

2.5 **Filling switchgear and controlgear with new SF₆**

The large majority of medium-voltage switchgear and controlgear uses sealed pressure systems, as defined in 1.6. This type of equipment is filled with SF₆ in the factory and no further handling of the gas is required during its life.

High-voltage switchgear and controlgear and medium-voltage equipment of certain types use closed pressure systems as defined in 1.6. Such equipment may require filling or topping up on site.

The procedures used during manufacture and commissioning should be defined to ensure that four fundamental requirements are met:

- a) that personnel working on the equipment are not subjected to unacceptable risk;
- b) that losses of gas into the atmosphere are kept to a minimum;
- c) that enclosures, when filled, do not leak at a rate greater than that specified for the equipment;
- d) that enclosures when filled, contain gas of the required quality, as specified by the manufacturer.

2.5.1 *Filling procedures*

The most common method of filling an enclosure is by evacuating the air from the enclosure and the filling pipework to a specified residual pressure using a vacuum pump, before introducing the SF₆. This method will be referred to as the evacuation method.

If a method other than the evacuation method is to be used, it shall be specified by the manufacturer.

The method chosen is likely to affect the purity of gas in the equipment and for this reason the evacuation method is preferred.

Il convient que le remplissage en dehors du cadre de la fabrication se fasse selon les instructions du fabricant.

Il convient que les instructions du fabricant précisent au moins:

- a) la méthode de remplissage;
- b) la pression résiduelle maximale tolérée avant toute introduction de SF_6 , en millibars, si la méthode par évacuation est utilisée. Le temps pendant lequel l'enveloppe est maintenue sous vide peut aussi être précisé si cela est considéré comme important;
- c) la pression de remplissage requise à une température spécifiée (de préférence 20 °C) ou la densité de SF_6 requise. Il convient de noter que la température du gaz peut être différente de la température de l'atmosphère ambiante. Il peut être également nécessaire de tenir compte du refroidissement du gaz lors de son passage par le détendeur. Si le remplissage, effectué à une température autre que celle spécifiée, nécessite un ajustement de la pression de remplissage afin de maintenir la densité du SF_6 dans une fourchette donnée, il convient que cela soit également précisé, et des conseils donnés pour établir cette correction.

Pendant le remplissage d'une enveloppe au SF_6 , il convient que le matériel de remplissage soit équipé de moyens permettant de surveiller la pression ou la densité dans l'enveloppe.

Il convient qu'un détendeur, comportant si possible côté basse pression une soupape de sécurité réglable contre la surpression, soit utilisé pendant le transfert du SF_6 depuis une bouteille ou une cuve sous pression.

Quand la densité ou la pression spécifiée est atteinte, il convient qu'un dispositif soit toujours disponible, permettant de couper rapidement l'alimentation en gaz.

Il convient qu'un remplissage avec des moyens autres qu'automatisés soit surveillé de près pour éviter tout surgonflage accidentel.

2.5.2 *Étanchéité des équipements remplis au SF_6*

Les exigences permettant d'établir que les installations d'appareillages contenant du SF_6 atteignent un niveau acceptable d'étanchéité au gaz sont décrites dans l'annexe EE de la CEI 56, l'annexe GG de la CEI 298 et l'annexe DD de la CEI 517.

Au cas où l'équipement doit être assemblé et rempli sur le site, les instructions de montage du fabricant devront mentionner qu'il convient de vérifier l'étanchéité du matériel après installation. Il convient que les méthodes appropriées et le matériel spécial nécessaires y soient précisés.

2.5.3 *Vérifications de la qualité du SF_6 après remplissage*

La qualité du gaz enfermé dans une enveloppe peut être influencée par l'état de l'enveloppe avant le remplissage, ou par les impuretés provenant de l'équipement de remplissage.

Il convient que les instructions du fabricant précisent s'il est nécessaire de vérifier la qualité du gaz dans l'enveloppe après remplissage. Si tel est le cas, il convient d'identifier les impuretés à rechercher et d'indiquer les quantités maximales acceptables pour chacune de ces impuretés.

Les procédures de vérification du gaz SF_6 prélevé de l'enveloppe sont indiquées dans la CEI 480.

Filling other than at the time of manufacture should be carried out in accordance with the manufacturer's instructions.

Manufacturers' instructions for filling should specify at least the following:

- a) the filling method;
- b) if the evacuation method is used, the maximum allowable residual pressure, expressed in millibars, to be achieved during evacuation, prior to introducing any SF₆. The time during which the enclosure is maintained under vacuum may also be considered important; if so it should be stated;
- c) the required filling pressure at a specified temperature (preferably 20 °C) or the required SF₆ density. It should be noted that the temperature of the gas may differ from the temperature of the ambient atmosphere. Account may also need to be taken of cooling of the gas as it passes through a pressure-reducing valve. If filling at other than the specified temperature requires a correction to the filling pressure to maintain the SF₆ density within a given range, this should be stated, and guidance should be given for performing the correction.

When filling an enclosure with SF₆, the filling equipment should include means for monitoring the pressure or density in the enclosure.

A pressure-reducing regulator, preferably including in the lower pressure output line an adjustable over-pressure relief device, should be used when transferring SF₆ gas from a pressurised vessel or cylinder.

When the required filling pressure or density is reached, means should always be available for quickly turning off the flow of gas.

Filling other than with automated delivery equipment should be closely monitored to avoid accidental over-filling.

2.5.2 Gas tightness of equipment filled with SF₆

Requirements for establishing that acceptable levels of gas tightness are achieved in switchgear and controlgear installations containing SF₆ are stated in appendix EE of IEC 56, annex GG of IEC 298 and annex DD of IEC 517.

In cases where equipment is to be assembled and filled on site, manufacturers' instructions should state that checking for leaks should be performed following installation. Suitable methods and any special equipment required should be specified.

2.5.3 Checks on SF₆ gas quality after filling

The quality of the gas in an enclosure after it has been filled may be influenced by the condition of the enclosure before filling, or by impurities introduced from filling equipment.

Manufacturers' instructions should state whether it is necessary to check the quality of the gas in an enclosure after it has been filled. If this is to be done, the impurities to be checked should be identified and maximum acceptable quantities for each impurity should be given.

Procedures for checking SF₆ gas removed from enclosures are given in IEC 480.

2.6 Echappement de SF₆ dans l'atmosphère pendant le remplissage

Le SF₆ n'altère pas la couche d'ozone et ne contribue pas significativement à l'effet de serre [3], (voir annexe D). Cependant, étant donné que le SF₆ est fabriqué et n'existe pas à l'état naturel, et à cause de sa longue durée de vie, il y a lieu de prendre des précautions pour minimiser la quantité de SF₆ échappé dans l'atmosphère.

2.6.1 Echappement de SF₆ dans l'atmosphère pendant le remplissage d'un équipement moyenne tension

Il convient que les postes de remplissage en usine pour enveloppes au SF₆ soient conçus et manoeuvrés de telle sorte que la quantité de SF₆ s'échappant dans l'atmosphère reste négligeable.

Dans le cas où l'équipement moyenne tension n'est rempli qu'après installation sur le site, il convient que des précautions soient prises pour minimiser la quantité de SF₆ échappé dans l'atmosphère. Si l'équipement doit être vidé pendant son installation ou sa mise en oeuvre, il convient que des moyens de stockage du gaz soient fournis. La quantité de SF₆ échappée pendant le remplissage ou la mise en oeuvre est négligeable, car les pressions et les quantités de gaz utilisées pendant le remplissage ou la mise en oeuvre sont faibles, et le nombre d'équipements de ce type est relativement restreint.

2.6.2 Echappement de SF₆ dans l'atmosphère pendant le remplissage d'un équipement haute tension

La fabrication et la mise en oeuvre d'un équipement haute tension implique la manipulation de quantités relativement importantes de gaz SF₆, en particulier dans le cas des appareillages de type GIS. Il convient que l'équipement pour la manipulation du gaz soit conçu pour minimiser la quantité de SF₆ s'échappant dans l'atmosphère.

Quand, pour certaines raisons, du SF₆ neuf doit être retiré d'une enveloppe, il convient que du matériel de stockage adéquat soit disponible.

Section 3: Fuite de SF₆ d'un équipement en service

Cette section traite des effets des fuites de SF₆ dans un équipement en service et, avec les conclusions de l'annexe C, démontre que les opérateurs sont soumis à un risque négligeable, même si le débit de la fuite est très supérieur aux taux maximaux spécifiés par le fabricant. Cette constatation est appuyée par les conclusions du groupe de travail 23.03 du CIGRE [1].

3.1 Types d'enveloppes remplies au gaz

L'annexe EE de la CEI 56, l'annexe GG de la CEI 298 et l'annexe DD de la CEI 517 définissent trois catégories d'enveloppes remplies au gaz qui sont:

- a) système à pression entretenu: c'est une installation automatiquement alimentée par une source de gaz interne ou externe;
- b) système à pression autonome: c'est une installation dont la remise à niveau en gaz se fait périodiquement, manuellement, à partir d'une source externe;

2.6 Release of SF₆ gas to the atmosphere during filling

SF₆ gas does not contribute to stratospheric ozone depletion nor significantly to the greenhouse effect [3] (see annex D). However, because SF₆ is manufactured rather than naturally occurring and because of its long lifetime, precautions should be taken to minimise the quantity of SF₆ gas which is released to the atmosphere.

2.6.1 Release of SF₆ gas to the atmosphere during filling of medium-voltage equipment

Factory installations for filling enclosures with SF₆ gas should be designed and operated so that the quantity of SF₆ released to the atmosphere is negligible.

For medium-voltage equipment which is to be filled after erection on site, care should be taken to minimise the amount of SF₆ released. If such equipment has to be emptied during installation or commissioning, means for storing the gas should be provided. Due to the low operating pressures, small volumes and relatively small numbers of these types of equipment, the quantity of SF₆ released during filling and commissioning is negligible.

2.6.2 Release of SF₆ gas to the atmosphere during filling of high-voltage equipment

The manufacture and commissioning of high-voltage equipment involves the handling of relatively large quantities of SF₆ gas, particularly in the case of GIS equipment. Gas handling installations should be designed to minimise the quantity of SF₆ gas which is released to the atmosphere.

When new SF₆ has to be removed from an enclosure for any reason, equipment should be available to allow it to be stored.

Section 3: Leakage of SF₆ from equipment in service

This section examines the effects of leakage of SF₆ from equipment in service and together with the conclusions of annex C, shows that operators are subjected to negligible risk, even at leak rates much higher than the maximum rates normally specified by manufacturers. This conclusion is supported by the findings of CIGRE working group 23.03 [1].

3.1 Types of gas-filled enclosure

Three types of gas-filled enclosure are defined in annex EE of IEC 56, annex GG of IEC 298 and annex DD of IEC 517. These are:

- a) controlled pressure system: an assembly which is automatically refilled from an internal or external gas source;
- b) closed pressure system: an assembly which is refilled only periodically by manual connection to an external gas source;

c) système à pression scellé: c'est une installation ne nécessitant aucune intervention de remise à niveau pendant sa durée de vie présumée. Les systèmes à pression scellés sont entièrement montés, remplis et contrôlés en usine.

L'appareillage moyenne tension sous enveloppe métallique ou sous enveloppe isolante contient généralement des enceintes de coupure de catégorie c), système à pression scellé.

L'appareillage moyenne tension de type GIS utilise habituellement un système à pression autonome de catégorie b), mais est parfois du type scellé de catégorie c) s'il est assemblé chez le fabricant.

La majorité de l'appareillage haute tension appartient généralement à la catégorie des systèmes à pression autonomes de catégorie b). Les systèmes à pression scellés, catégorie c), sont utilisés dans certains équipements.

La catégorie a) n'est plus utilisée dans les équipements fabriqués actuellement, mais on trouve encore certains éléments d'équipements de catégorie a) en service. Le nombre d'unités de catégorie a) reste cependant marginal et n'est donc pas traité dans ce rapport. Le mode de calcul des niveaux d'exposition décrit dans l'annexe C peut être adopté, si nécessaire, pour évaluer les risques d'exposition, là où les systèmes à pression entretenus sont en service.

3.2 Implications des fuites

L'appareillage contenant du SF₆ est conçu, fabriqué et essayé pour assurer un niveau minimal de fuites de gaz.

Pour des systèmes à pression autonomes, la CEI 56, la CEI 298 et la CEI 517 spécifient que le taux de fuite annuel maximal acceptable est de 1 %, et de 3 % de la masse initiale de SF₆. La limite inférieure du taux de fuite annuel de 1 % est d'ores et déjà acceptée par les fabricants, et est facilement atteinte avec des équipements courants et les techniques d'étanchéité actuelles.

L'étanchéité au gaz des systèmes à pression scellés est définie selon la durée de vie théorique du matériel, les valeurs les plus souvent utilisées étant de 10, 20 et 30 ans. Pour les équipements utilisant un système à pression scellé, les fabricants indiquent qu'ils sont en mesure d'atteindre un taux annuel de fuite inférieur à 0,1 %. La pression de remplissage de l'équipement moyenne tension scellé à vie étant souvent seulement légèrement supérieure à la pression atmosphérique, cela réduit la tendance à fuir. L'usage combiné, pendant les mesures de fuites cumulées, de capteurs électroniques et de collecteurs de gaz, l'emploi de ce dernier rendu possible par la faible taille des enveloppes contenant le gaz dans les équipements moyenne tension, permet d'avoir à température ambiante, une précision de mesure des fuites de SF₆ allant jusqu'à 10⁻⁷ atmosphérique cm³ par seconde (équivalent à 3,15 · 10⁻³ litres/an).

Les quantités de SF₆ perdues à la suite d'une fuite varient selon le type d'équipement, et sont plus importantes pour les équipements haute tension, car ceux-ci contiennent beaucoup plus de gaz sous une pression plus élevée, et du fait que les surfaces d'étanchéité sont beaucoup plus grandes. Les fuites de gaz SF₆ doivent être minimisées pour les trois raisons suivantes:

a) détérioration fonctionnelle

Le pouvoir de coupure et/ou le niveau d'isolement de l'équipement peuvent diminuer si à cause d'une fuite anormalement élevée, la densité du SF₆ venait à chuter (voir l'article 3.3).

c) sealed pressure system: an assembly for which no further gas processing is required during its expected operating life. Sealed pressure systems are completely assembled, filled and tested in the factory.

Medium-voltage switchgear and controlgear of the metal-enclosed or insulation-enclosed type most commonly contain switching enclosures of category c), sealed pressure systems.

Medium-voltage switchgear and controlgear of the gas-insulated type normally uses a closed pressure system category b) but may use a sealed pressure system category c) if it is factory-assembled.

The majority of high-voltage switchgear and controlgear uses closed pressure systems, category b). Sealed pressure systems, category c), are used in some equipment types.

Category a) is not relevant to equipment manufactured currently but certain items of category a) equipment are in service. The number of category a) units is very small however and for this reason this type of equipment is not covered by this report. The principles for calculating exposure levels outlined in annex C could be adopted if necessary to assess the risks of exposure where controlled pressure systems are in use.

3.2 The Implications of leakage

Switchgear and controlgear containing SF₆ gas is designed, manufactured and tested to ensure that losses of the gas are kept to a minimum.

Preferred maximum permissible relative leakage rates of 1 % and 3 % of the total initial mass of SF₆ gas per annum are specified in IEC 56, IEC 298 and IEC 517, for closed pressure systems. The lower leakage rate limit of 1 % per annum is readily accepted by manufacturers and is easily achieved using standard materials and sealing techniques.

The gastightness of sealed pressure systems is specified in terms of the expected operating life; preferred values are 10, 20 and 30 years. For equipment using sealed pressure systems, manufacturers report that they are able to achieve relative leak rates of less than 0,1 % per annum. The filling pressure of medium-voltage sealed for life equipment is often just above atmospheric pressure and this reduces the tendency to leak. The combined use, during cumulative leakage measurement, of electron capture detectors and gas collectors, the latter made possible by the small size of the gas enclosures of medium-voltage equipment, allows absolute leakage rates, at room temperature, as low as 10⁻⁷ atmospheric cm³/second (equivalent to 3,15 · 10⁻³ litres per year) of SF₆ to be measured.

Quantities of SF₆ gas lost due to leakage vary according to the type of equipment and are greater for higher voltage equipment because these usually contain greater amounts of gas at higher pressures and because sealing surfaces are much larger. The leakage of SF₆ gas from switchgear and controlgear shall be minimised for the following three reasons:

a) functional impairment

The switching capacity and/or insulation level of the equipment may be reduced if the SF₆ density falls as a consequence of abnormal leakage (see clause 3.3).

b) sécurité du personnel

Selon la nature des installations, l'atmosphère à proximité de l'équipement peut contenir du SF₆ et ses produits de décomposition à la suite de fuites. Dans ce cas, les risques pour la santé doivent être pris en compte. Ce point est développé dans l'article 3.4.

c) effets sur l'environnement

Les effets du SF₆ utilisé dans l'équipement électrique sur l'atmosphère doivent être pris en compte. Cela comprend le SF₆ s'échappant dans l'atmosphère durant les opérations de remplissage, de maintenance, et lors de fuites en cours de fonctionnement. La quantité de SF₆ s'échappant dans l'atmosphère à la suite d'une fuite est examinée à l'article 3.5.

3.3 Fuite anormale

Ce sujet est couvert dans l'article 5.2.

3.4 Sécurité du personnel

Le gaz s'échappant d'un équipement en service peut contenir des impuretés. Le degré de contamination varie selon le type d'équipement utilisé et l'emploi qui en a été fait. Le degré de contamination est le plus élevé dans le cas de disjoncteurs ayant coupé des courants de court-circuit [4].

L'annexe C traite en détail des risques de l'exposition aux produits de décomposition du SF₆ issus d'une fuite. Elle montre que la quantité de SF₆ s'échappant par fuite au taux nominal par jour dans l'atmosphère est très faible et que la concentration d'impuretés y est très faible. La dispersion naturelle du gaz dans l'atmosphère environnante diminue encore de façon très sensible la concentration des impuretés. Cette analyse ne tient pas compte des effets des adsorbants qui, comme c'est normalement le cas dans les disjoncteurs, améliorent significativement la pureté du gaz émis par une fuite. Il est démontré que la contamination de l'atmosphère locale suite à une fuite est négligeable.

L'exploitation de l'appareillage haute et moyenne tension contenant du SF₆ est similaire à celle de n'importe quel autre type d'équipement dans la même catégorie de tension assignée. C'est pourquoi, puisqu'il n'y a pas lieu de manipuler le SF₆, il n'est pas nécessaire que le personnel exploitant les équipements SF₆ reçoivent une formation particulière.

NOTE – Pour les applications dans les climats froids, il convient de réduire la quantité d'adsorbant afin de limiter l'adsorption excessive de SF₆. L'action sur les produits de décomposition est en conséquence réduite.

3.4.1 Installations à l'extérieur

Dans le cas d'installations à l'extérieur, le gaz échappé se dispersera rapidement et ne présentera aucun risque. Il est peu probable que le SF₆ échappé s'accumule dans des parties basses, à cause des effets de la diffusion dans l'atmosphère environnante (loi des mélanges de Dalton).

3.4.2 Installations à l'intérieur

L'annexe C examine les effets des fuites des équipements moyenne et haute tension installés à l'intérieur. Les résultats (voir C.4.5 et C.4.6) montrent clairement que pour des fuites plusieurs milliers de fois plus importantes que les fuites normales, le risque reste négligeable.

b) safety of personnel

Depending on the nature of the installation, the atmosphere local to the equipment may contain SF₆ and its by-products as a consequence of leakage. The risk to health in such a case shall be considered. This is covered in clause 3.4.

c) environmental effects

The effect on the atmosphere of SF₆ used in electrical equipment, shall be considered. This includes SF₆ gas which is released to the atmosphere during filling and maintenance as well as the effects of leakage during service. The quantity of SF₆ gas lost to the atmosphere due to leakage is discussed in clause 3.5.

3.3 Abnormal leakage

Abnormal leakage is covered in clause 5.2.

3.4 Safety of personnel

Leakage from equipment in service is of gas which may contain impurities. The degree of contamination of the gas varies according to the type of equipment and its service history and will be the greatest for circuit-breakers which have interrupted short-circuit current [4].

Annex C deals in detail with the risks of exposure to SF₆ by-products emitted by leakage. It is shown that the quantity of SF₆ leaked per day at normal leak rates is very small and the concentration of impurities it contains is low. The effects of natural dilution into the surrounding atmosphere are considered as this further reduces the concentration of impurities by a large factor. The effects of adsorbents are neglected in the analyses, but when these are installed, as is normal in circuit-breakers, the purity of the gas leaked is greatly improved. It is shown that contamination of the local atmosphere as a result of leakage is insignificant.

Operation of high-voltage switchgear and controlgear containing SF₆ is similar to that of any other type of SF₆ equipment in this voltage range. Therefore personnel in charge of SF₆ equipment do not need special training to carry out their duty, because handling of SF₆ is not implied.

NOTE – For cold climate applications, the quantity of adsorbent should be reduced in order to limit excessive SF₆ adsorption. The action on decomposition products is correspondingly reduced.

3.4.1 Outdoor installations

In outdoor installations, leaked gas will disperse rapidly and provides no risk. It is unlikely, due to the effects of diffusion (Dalton mixing law) into the surrounding atmosphere, that leaked SF₆ would accumulate in low-lying areas.

3.4.2 Indoor installations

The effects of leakage from typical indoor medium- and high-voltage equipment are examined in annex C. The results (see C.4.5 and C.4.6) clearly show that, for leak rates as high as several thousand times the normal permitted rates, the risks are negligible.

Il convient que les bâtiments contenant de l'équipement rempli au SF₆ soient pourvus d'un système de ventilation conçu pour évacuer le SF₆ s'échappant pendant les opérations d'installation et de maintenance (voir section 4). Les résultats présentés dans l'annexe C montrent que la ventilation naturelle devrait normalement suffire à prévenir l'accumulation de SF₆ échappé par suite d'une fuite.

Le SF₆ peut s'accumuler dans les chemins de câbles, les vides techniques et autres endroits situés en parties basses qu'il convient d'aérer avant d'y pénétrer.

3.5 Implications des fuites sur l'environnement

Le SF₆ à l'état gazeux n'altère pas la couche d'ozone stratosphérique et ne contribue pas de façon significative au phénomène d'effet de serre [3], (voir annexe D). Il est néanmoins souhaitable de limiter l'échappement de tout gaz qui n'est pas présent normalement dans l'atmosphère. Il est donc justifié de tenir compte de la quantité de SF₆ qui s'est échappé suite à une fuite dans l'atmosphère.

3.5.1 *Evaluation des fuites provenant des équipements moyenne tension*

Les équipements moyenne tension ne contiennent que de faibles quantités de gaz, et ce à des pressions relativement basses. La quantité de SF₆ échappée des installations est donc individuellement faible, mais le nombre de ces matériels étant important, la quantité totale qui s'est échappée doit être prise en compte.

Actuellement, environ 500 000 disjoncteurs moyenne tension et 1,5 millions d'interrupteurs – sectionneurs au SF₆ sont en service dans le monde. La masse totale de SF₆ installé dans les équipements moyenne tension est estimée entre 1 000 et 1 500 tonnes. Même si le taux de fuite annuel pour tous les équipements moyenne tension était de 1 %, cela ne représenterait que 10 à 15 tonnes de SF₆ échappé chaque année dans l'atmosphère. En réalité, le taux de fuite annuel des équipements actuels étant très inférieur à 1 %, la quantité de SF₆ échappé est beaucoup plus faible.

3.5.2 *Evaluation des fuites provenant des équipements haute tension*

La quantité de gaz échappé dans l'atmosphère du fait des fuites des équipements haute tension peut être estimée de la même façon que pour les équipements moyenne tension. Il y a en service environ 40 000 disjoncteurs SF₆ ouverts haute tension, et de l'ordre de 20 000 installations de type GIS. Ces unités renferment une quantité de SF₆ estimée entre 10 000 et 20 000 tonnes. Même si le taux de fuite annuel pour tous les équipements haute tension était de 1 %, cela ne représenterait que 100 à 200 tonnes de SF₆ libéré dans l'atmosphère. En réalité, le taux de fuite annuel moyen des installations existantes est estimé bien inférieur à cela.

Section 4: Manipulation du SF₆ usagé

Cette section concerne la manipulation du SF₆ ayant été utilisé dans l'enveloppe d'un appareillage et qui a pu déjà être partiellement décomposé ou contaminé. Ces manipulations couvrent la vidange et le remplacement du SF₆ pendant les opérations de maintenance ou d'extension.

Buildings containing indoor SF₆-filled equipment should be provided with ventilation designed to deal with SF₆ released during installation and maintenance (see section 4). The results presented in annex C show that natural ventilation would normally be adequate to prevent the accumulation of SF₆ released due to leakage.

SF₆ may accumulate in cable ducts, cellars or other low-lying areas; these should be ventilated if they are to be entered.

3.5 Environmental Implications of leakage

SF₆ gas does not contribute to stratospheric ozone depletion or significantly to the greenhouse effect [3] (see annex D). It is however desirable to minimise the release of any gas, which is not present normally in the atmosphere, so it is relevant to consider the quantity of SF₆ released to the atmosphere as a result of leakage.

3.5.1 *Estimation of leakage from medium-voltage equipment*

Medium-voltage equipment contains only small quantities of gas, at relatively low pressures. The quantity of SF₆ leaked from individual units is therefore small, although since the numbers in service are large, the total amount released has to be considered.

There are currently in service throughout the world about 500 000 medium-voltage SF₆ circuit-breakers and around 1,5 million load-break switch units. The total installed mass of SF₆ for medium-voltage equipment is believed to be between 1 000 and 1 500 tonnes. Even at a leak rate of 1 % per annum all medium-voltage units currently in service throughout the world could only contribute between 10 and 15 tonnes of SF₆ to the atmosphere annually. The actual quantity of SF₆ released will be very much less than this as actual average leak-rates are much lower than 1 % per annum.

3.5.2 *Estimation of leakage from high-voltage equipment*

The quantity of gas released to the atmosphere due to leakage from high-voltage equipment may be estimated as for medium-voltage equipment. There are in service some 40 000 open-terminal high-voltage SF₆ circuit-breakers and about 20 000 GIS units. The total installed mass of SF₆ is believed to be between 10 000 and 20 000 tonnes. The total quantity of SF₆ released world-wide due to leakage from high-voltage equipment would be in the range of 100 to 200 tonnes if all units were leaking at 1 % per annum. The true average leak rate is believed to be considerably lower than this.

Section 4: Handling of used SF₆

This section deals with operations involving SF₆ which has been inside a switchgear or controlgear enclosure and which may have become partially decomposed or contaminated. Such operations include removing and replacing the SF₆ during maintenance or extension.

4.1 Circonstances nécessitant la manipulation de SF₆ usagé

La nécessité de manipuler du SF₆ usagé survient quand:

- a) il faut compléter le remplissage des systèmes à pression autonome;
- b) il faut retirer le gaz d'une enveloppe pour y effectuer des opérations de maintenance, de réparation, ou d'extension;
- c) le gaz a été totalement ou partiellement expulsé suite à un échappement anormal;
- d) le gaz doit être retiré d'un élément d'un équipement en fin de cycle de vie;
- e) des prélèvements de gaz sont à effectuer ou lors de la mesure de la pression à l'aide d'une connexion temporaire à un appareil de mesure.

Les dispositions de sécurité dispensées dans la présente section sont applicables aux quatre cas ci-dessus. Les cas c) et d) sont étudiés plus en détail, dans les sections 5 et 6 respectivement.

Les cas a) et b) sont très courants dans les équipements haute tension, mais peuvent également se produire dans les équipements moyenne tension de type GIS, en particulier dans le cadre de l'extension d'un tableau de distribution existant. Ils ne concernent pas les systèmes à pression scellés.

4.2 Matériel requis pour manipuler le SF₆ usagé

4.2.1 Matériel de manipulation de gaz

Quand du SF₆ usagé doit être retiré d'une enveloppe, il convient de prendre des précautions afin de prévenir tout risque évitable d'échappement de gaz dans l'atmosphère, en particulier sur les lieux de travail.

Il y a lieu de mettre en oeuvre l'équipement de récupération du gaz à chaque fois que cela est possible, pour stocker le gaz, habituellement sous pression. Il convient qu'un tel équipement soit capable d'évacuer de l'enveloppe la plus grande quantité possible du gaz qu'elle contient.

Du matériel de récupération de gaz spécialement conçu pour le SF₆ est disponible, équipé d'accessoires de recyclage, pour retirer les produits de décomposition solides et gazeux. Ce type d'équipement est préférable pour du SF₆ significativement contaminé, comme par exemple dans le cas des enveloppes de disjoncteurs.

4.2.2 Matériel de sécurité du personnel

Il convient que les opérateurs appelés à manipuler du SF₆ usagé soient équipés de protections individuelles. L'équipement approprié est énuméré dans l'annexe E (voir l'article E.2 et E.3.1). Il convient que le manuel d'instructions des fabricants et les codes de pratique des utilisateurs précisent quels sont les équipements de sécurité adéquats pour chaque type d'opération décrite dans l'article 4.1.

Habituellement, aucun équipement de sécurité particulier n'est requis pour les opérations de complément de remplissage en SF₆ d'une enveloppe, à l'exception de gants, de lunettes de protection et du matériel de détection qui peut être recommandé pour vérifier la composition de l'atmosphère du lieu de travail (voir 4.3.4.1).

4.1 Circumstances where handling of used SF₆ is necessary

The need to handle used SF₆ arises where:

- a) topping up of the SF₆ in closed pressure systems is carried out;
- b) the gas has to be removed from an enclosure to allow maintenance, repair or extension to be carried out;
- c) the gas has been wholly or partially expelled due to an abnormal release;
- d) the gas has to be removed at the end of the life of an item of equipment;
- e) Samples of the gas must be obtained or the gas pressure measured through temporary connection of measuring apparatus.

The safety provisions in this section are applicable to all four situations; situations c) and d) are further considered in sections 5 and 6 respectively.

Situations a) and b) arise mainly with respect to high-voltage equipment and may arise with medium-voltage GIS equipment in particular if it is required to add further equipment to an existing switchboard. They do not arise with equipment using sealed pressure systems.

4.2 Equipment required when handling used SF₆

4.2.1 Gas handling equipment

Where used SF₆ has to be removed from an enclosure, precautions should be taken to prevent avoidable release of the gas into the atmosphere and in particular into the work area.

Gas recovery equipment should be used where possible to allow the gas to be stored, usually under pressure. Such equipment should be capable of evacuating the enclosure to remove as much of the gas as possible.

Gas recovery equipment is available which is specially designed for use with SF₆ and is provided with re-processing facilities for removing gaseous and solid decomposition products. This type of equipment is preferred, particularly for the removal of more heavily contaminated SF₆, for example from circuit-breaker enclosures.

4.2.2 Personal safety equipment

Workers engaged in handling used SF₆ should be provided with personal safety equipment. Suitable equipment is listed in annex E (see clause E.2 and E.3.1). Manufacturers' instructions and users' codes of practice should specify which items of equipment are required for each type of activity listed in clause 4.1.

No specific safety equipment is normally required for operations involving only the topping up of an enclosure with SF₆ gas apart from gloves, safety glasses and detection equipment, which may be considered desirable for checking the condition of the working atmosphere (see 4.3.4.1).

4.3 Travailler avec du SF₆ usagé

Il est bon que les personnes ayant à manipuler du SF₆ usagé connaissent les propriétés des produits de décomposition du SF₆, et soient prévenues des risques pour la santé, ainsi que des précautions à prendre pour les minimiser. Des recommandations générales de sécurité sont données dans l'annexe E, (voir l'article E.1).

4.3.1 Formation du personnel

Il convient de dispenser une formation spécifique relative à la sécurité au personnel travaillant avec le SF₆ usagé. On considère que ce personnel n'a besoin d'aucune autre formation préliminaire ni d'autre qualification particulière.

Il convient que le personnel soit formé à la manipulation de l'équipement mis en oeuvre pour le transfert du gaz depuis une enveloppe vers une cuve de stockage. Il convient de respecter les instructions d'utilisation du fabricant de cet équipement, quand l'équipement est utilisé.

Il convient d'inclure les instructions pour les premiers soins dans la formation relative à la sécurité, selon E.3.2.

4.3.2 Equipements et services

Quand les enveloppes contenant du SF₆ usagé doivent être vidées, puis ouvertes, il est recommandé de mettre une installation d'eau convenable à la disposition des opérateurs, pour se laver et préparer les solutions de nettoyage nécessaires.

4.3.3 Travaux à l'extérieur

Pour les travaux à l'extérieur, pendant la vidange d'une enveloppe contenant du SF₆ usagé, aucune précaution particulière n'est nécessaire, outre celles destinées à protéger les opérateurs d'une exposition directe au SF₆ usagé et à ses produits de décomposition. A l'ouverture ou en pénétrant dans des enveloppes situées à l'extérieur, certaines précautions sont à prendre:

- Le vent pourrait provoquer la dispersion des produits de décomposition solides du SF₆ avant leur récupération par aspiration, il convient de prendre les mesures adéquates pour éviter cela, s'il y a du vent.
- La pluie ou une humidité ambiante élevée accélère l'hydrolyse de certains produits de décomposition formant ainsi de l'acide fluorhydrique, HF. Pour cette raison, il convient de retirer rapidement tout produit de décomposition résiduel, solide ou gazeux, après ouverture d'une enveloppe. Un abri temporaire peut être nécessaire pour empêcher toute pénétration d'eau de pluie pendant cette opération.

4.3.4 Travaux à l'intérieur

Il est bon que les installations à l'intérieur soient équipées d'une ventilation appropriée, suffisante pour répondre aux spécifications de 4.3.4.1.

4.3.4.1 Concentration maximale de SF₆ usagé dans les lieux de travail

Là où le SF₆ usagé doit être retiré dans des locaux fermés, il faut s'assurer que les concentrations de produits de décomposition potentiellement toxiques restent à des niveaux de sécurité dans les lieux de travail.

4.3 Working with used SF₆

Workers handling used SF₆ should be familiar with the properties of SF₆ decomposition products and should be aware of the risks to health and the precautions necessary to minimise them. General safety recommendations are given in annex E (see clause E.1).

4.3.1 Training of workers

Specific safety training should be given to workers required to handle used SF₆. It is not considered necessary that such workers have any pre-qualifying training or qualifications.

Workers should be trained in the use of SF₆-handling equipment used to transfer gas from an enclosure into a storage vessel; the manufacturer's operating instructions for such equipment should be complied with whenever it is used.

The first-aid instructions according to E.3.2 should be included in the safety training.

4.3.2 Facilities and services

Where enclosures containing used SF₆ have to be emptied and opened, it is desirable that adequate washing facilities for workers be available, and a supply of water for preparing cleaning solutions may be required.

4.3.3 Outdoor working

When working outdoors, while removing used SF₆ from an enclosure, no special precautions are necessary other than those to prevent personnel from being directly exposed to the used SF₆ or its decomposition products. When opening or entering enclosures outdoors, certain precautions should be taken.

- Wind could cause solid SF₆ decomposition products to be blown around before they can be removed with a vacuum cleaner. If it is windy, steps should be taken to prevent this.
- Rain or high ambient humidity will accelerate hydrolysis of certain decomposition products, resulting in the production of hydrofluoric acid HF. For this reason, any residual gas and solid decomposition products should be removed quickly after an enclosure is opened. Temporary shelter may be required to prevent the ingress of rain while this is being carried out.

4.3.4 Indoor working

Indoor installations should be provided with adequate ventilation, sufficient to ensure that the requirements of 4.3.4.1 can be met.

4.3.4.1 Maximum concentration of used SF₆ in work areas

When used SF₆ has to be removed from an enclosure in an indoor installation, it is necessary to ensure that the concentrations of potentially toxic decomposition products remain at safe levels in the working area.

La solution idéale est d'effectuer des mesures de concentrations du principal produit contribuant à la toxicité, le fluorure de thionyle, SOF_2 , et des sous-produits issus de l'hydrolyse du SOF_2 , le dioxyde de soufre SO_2 et le fluorure d'hydrogène HF (voir C.3.2.1).

NOTE – Des méthodes pour réaliser et interpréter ces mesures sont à l'étude.

Une autre méthode pratique est la mesure de la concentration de SF_6 (usagé) dans l'air. Il convient d'effectuer cette mesure chaque fois qu'il existe une possibilité que du SF_6 usagé ait été émis dans l'atmosphère.

La concentration en SF_6 ne doit pas dépasser 200 ppmv.

Il y a lieu d'assurer une ventilation, de préférence par circulation d'air forcée, afin d'empêcher l'accumulation de SF_6 usagé.

La concentration maximale de 200 ppmv de SF_6 est expliquée en F.4.1 et elle s'applique au SF_6 ayant subi une décomposition faible ou moyenne, telle que définie en 4.3.5.1, points a) et b). S'il y a lieu de penser que le niveau de décomposition peut être plus fort que celui normalement attendu, par exemple si l'on sait ou soupçonne que des arcs anormaux se sont produits dans une enceinte (voir c) de 4.3.5.1), il convient de prendre les précautions exposées en 5.3.3.

A l'ouverture des enveloppes, du SF_6 usagé résiduel peut s'échapper dans l'atmosphère en plus ou moins grandes quantités, selon le degré d'évacuation de gaz appliqué pendant la vidange du gaz. A cet instant, il convient que les opérateurs présents portent des dispositifs respiratoires tels que décrits dans l'annexe E (voir l'article E.2, point h)) au moins jusqu'à ce que le niveau de concentration de SF_6 ait été confirmé comme étant conforme aux critères indiqués ci-dessus.

4.3.4.2 Informations de sécurité sur les lieux de travail

Il convient qu'une notice affichant l'interdiction de faire des feux ouverts, de fumer et de chauffer à plus de 200 °C et de souder sans précautions particulières et donnant des instructions de premiers secours (voir l'article E.3), soit disposée dans les locaux où est manipulé le SF_6 usagé.

4.3.5 Etat du SF_6 dans une enveloppe

4.3.5.1 Etat prévisible du SF_6

L'état du SF_6 usagé dans une enveloppe dépend du type et de l'intensité des décharges ou des arcs qui s'y sont produits. Les quatre situations les plus couramment rencontrées sont:

a) Le SF_6 est dans une enveloppe qui ne contient pas les parties actives d'un disjoncteur, et qui n'est pas connectée à une enveloppe de disjoncteur avec laquelle un échange gazeux serait possible.

Gaz: décomposition nulle ou faible.

Solides: peu ou pas de résidus poudreux.

This is ideally achieved by direct measurement of the concentrations of the main contributor to toxicity, thionyl fluoride SOF_2 and of the by-products of SOF_2 hydrolysis, sulphur dioxide SO_2 and hydrogen fluoride HF (see C.3.2.1).

NOTE – Methods for making and interpreting such measurements are under consideration.

A practical alternative method is to measure the concentration of (used) SF_6 in the air. This measurement should be made whenever there is a possibility that used SF_6 has been released into the atmosphere.

The SF_6 concentration shall not exceed 200 ppmv.

Ventilation should be provided, preferably using forced air movement to prevent the accumulation of used SF_6 .

The maximum SF_6 concentration of 200 ppmv is explained in F.4.1 and is applicable to SF_6 which has undergone low to medium decomposition as defined in 4.3.5.1, items a) and b). If there is reason to believe that the level of decomposition may be higher than should normally be expected, for example if abnormal arcing is known or believed to have occurred within an enclosure (see 4.3.5.1, item c)), then the precautions presented in 5.3.3 should be taken.

When enclosures are first opened, depending on the degree of evacuation applied during gas removal, residual used SF_6 may enter the atmosphere. At this time, any workers present should use respirators as described in annex E (see clause E.2, item h)), at least until it is confirmed that the above criterion for SF_6 concentration is satisfied.

4.3.4.2 *Safety information for work areas*

A notice stating that open fire, smoking, heating to more than 200 °C and welding without special precautions are prohibited and giving first-aid instructions (see clause E.3) should be displayed while used SF_6 is being handled in an indoor location.

4.3.5 *Condition of the SF_6 in an enclosure*

4.3.5.1 *Expected condition of the SF_6*

The condition of the used SF_6 in an enclosure will depend on the types and energies of any electrical discharges or arcs which have occurred within it. Four commonly encountered situations are:

a) SF_6 is in an enclosure which does not contain active parts of a circuit-breaker and which is not linked to a circuit-breaker enclosure so that an exchange of gas could occur.

Gas: zero to low decomposition.

Solids: little or no powder deposits.

b) Le SF_6 est dans une enveloppe contenant les parties actives d'un disjoncteur ou dans un compartiment connecté à un disjoncteur.

Gaz: décomposition modérée.

Solides: la quantité de dépôt dépend de l'historique des coupures de courant effectuées.

c) Le SF_6 est dans une enveloppe où il y a eu formation accidentelle d'arc. L'enveloppe n'a pas subi d'ouverture par suite du fonctionnement du dispositif de décharge de pression ou par perforation de la paroi. Dans ce cas, un défaut interne a eu lieu, mais un disjoncteur a éliminé le défaut, avant que la pression de l'enveloppe ne soit trop élevée pour libérer du SF_6 .

Gaz: décomposition inconnue mais probablement élevée.

Solides: probablement de grandes quantités de dépôt dont la nature dépend des matériaux ayant été en contact avec l'arc.

d) Même situation que c), mais une partie ou la totalité du gaz a été libérée suite au fonctionnement du dispositif de décharge de pression ou par perforation de la paroi.

Gaz: mélange d'air ambiant et de SF_6 partiellement décomposé. L'hydrolyse éventuelle des produits de décomposition fluorés a pu se produire, provoquant une acidité plus importante que dans les autres cas.

Solides: grandes quantités de dépôts, dont une grande partie a été expulsée.

Les précautions requises dans le cas d) sont données dans l'article 5.3.

4.3.5.2 *Echantillonnage et analyse du SF_6 provenant d'une enveloppe*

S'il est prévu que le SF_6 soit réutilisé sans recyclage, il convient d'effectuer les analyses pour vérifier:

- le taux d'humidité;
- la teneur en oxygène;
- l'acidité;
- le taux de fluorure hydrolysable.

Les méthodes pour effectuer ces analyses sont détaillées dans la CEI 480.

Il convient que le fabricant fournisse les indications sur les limites de concentration maximales permises pour les impuretés citées ci-dessus, en deçà desquelles le SF_6 peut être réutilisé après stockage. Le gaz ne sera cependant pas considéré comme du SF_6 neuf, mais plutôt comme du SF_6 réutilisable sans traitement complémentaire: les précautions de manipulation sont identiques à celles du SF_6 usagé indiquées ci-après.

Si les valeurs limites pour les impuretés ci-dessus sont dépassées, le SF_6 peut être recyclé, en utilisant un dispositif approprié, ou être renvoyé chez un fournisseur pour recyclage.

4.3.6 *Retirer le SF_6 usagé d'une enveloppe*

Avant de retirer le SF_6 de l'enveloppe d'un appareillage, un échantillon peut être prélevé et analysé, pour en connaître le niveau de décomposition (voir 4.3.5.2), avant toute autre manipulation.

b) SF_6 is in an enclosure containing active parts of a circuit-breaker, or linked to such a compartment.

Gas: medium decomposition.

Solids: quantity of deposits will depend upon the current interruption history.

c) SF_6 is in any enclosure in which abnormal arcing has occurred but where the enclosure has not opened to the atmosphere due to pressure relief or burn-through. In this case an internal fault has occurred but a circuit-breaker has cleared the fault before the pressure in the enclosure has risen sufficiently to cause a release of SF_6 .

Gas: unknown but high decomposition should be expected.

Solids: large quantity of deposits expected. Their compositions depend on which materials have been heated by the arc.

d) As c) but where some or all of the SF_6 gas has already been exhausted to the atmosphere due to pressure relief or burn-through.

Gas: a mixture of partially decomposed SF_6 and the ambient air. Hydrolysis of fluoride decomposition products may have occurred, leading to a higher degree of acidity than would occur in the other cases.

Solids: Large quantity of solids, much of which may have been expelled.

Precautions required in case d) are given in clause 5.3.

4.3.5.2 Sampling and testing SF_6 from an enclosure

If it is intended that the SF_6 is to be re-used without processing, tests for the following should be performed:

- moisture content;
- oxygen content;
- acidity;
- hydrolysable fluoride content.

Methods for the above tests are detailed in IEC 480.

Manufacturers' instructions should give permitted concentration limits for each of the above impurities which, if not exceeded, would allow the gas to be used again after storage. The gas should not however be regarded as new SF_6 ; rather as SF_6 which may be re-used without further treatment. The following handling precautions for used SF_6 should be applied.

If the recommended limits for the above values are exceeded, the SF_6 may be re-conditioned using appropriate equipment, or returned to a supplier for re-conditioning.

4.3.6 Removing used SF_6 from an enclosure

Before SF_6 is removed from a switchgear and controlgear enclosure, sampling and testing (see 4.3.5.2) may be carried out so that the level of decomposition is known prior to further handling of the gas.

Il convient d'utiliser l'équipement de récupération du gaz, décrit en 4.2.1, quand cela est possible, afin de permettre la récupération du SF₆ tout en minimisant l'échappement dans l'atmosphère. Un tel équipement comprend au moins un compresseur, des moyens adéquats pour le contrôle du débit de gaz, et une ou plusieurs cuves de stockage. Cet équipement comprendra de préférence des moyens de recyclage du SF₆ contaminé.

Le gaz n'ayant pas été recyclé par l'équipement de récupération peut être renvoyé chez le fournisseur pour remise à l'état neuf.

Il y a lieu d'analyser le gaz récupéré selon la méthode décrite dans la CEI 480, pour en connaître les impuretés, avant de le réutiliser.

Il convient que la documentation du fabricant indique l'équipement approprié pour les manipulations du SF₆, et en fournisse les procédures d'utilisation, sur au moins les points suivants:

- le débit du SF₆ pendant la récupération peut devoir être contrôlé pour empêcher une trop grande quantité de poudre de pénétrer dans le matériel de récupération;
- il convient que le niveau maximal de la pression résiduelle de l'enveloppe pendant la vidange soit précisé. Une pression de quelques centaines de millibars devrait convenir, lorsqu'un seul compresseur est utilisé pour créer un vide partiel. Il peut être préférable dans certains cas d'éviter l'utilisation d'une pompe à vide qui serait trop sensible à la présence de particules poudreuses. L'adjonction d'un filtre à particules pourrait réduire le débit à un niveau inacceptablement faible;
- il convient que toute opération supplémentaire requise soit décrite, comme par exemple, dans le cas d'une purge à l'aide d'air sec ou d'azote, suivie d'un temps de repos pour que les particules poudreuses se déposent avant l'ouverture de l'enveloppe.

4.3.7 Ouverture et pénétration dans une enveloppe

Cette partie concerne les cas a), b), et c) décrits en 4.3.5. Il convient que les instructions du fabricant sur la maintenance, l'extension ou la réparation des installations indiquent les précautions appropriées pour assurer :

- la réduction au minimum du SF₆ résiduel dans l'enveloppe, après vidange;
- la protection du personnel contre les effets du SF₆ résiduel et des impuretés qui y sont associées;
- la compréhension de l'importance d'éliminer l'humidité, minimisant ainsi la formation d'acide par hydrolyse;
- le retrait adéquat des produits de décomposition solides du SF₆. Il y aura lieu d'indiquer les moyens matériels pour y parvenir, comme, par exemple, un aspirateur portant la mention réservé à l'usage du SF₆, qui soit repéré en conséquence et équipé d'un filtre à poussières approprié (voir l'article E.2, point j));
- l'information du personnel sur l'effet irritant des produits de décomposition solides, et leur protection avec des vêtements de sécurité, des dispositifs respiratoires, et une protection oculaire appropriés (voir l'article E.2);
- que des objets comme les outils, les vêtements et les composants retirés soient en état pour une manipulation ultérieure. Le nettoyage avec une solution neutralisante est généralement nécessaire. Il convient d'indiquer les moyens recommandés pour vérifier qu'une solution déjà utilisée est propre à une nouvelle utilisation (voir 6.5.6 et 6.5.7);
- des instructions concernant la manipulation et l'enlèvement des sacs d'aspirateurs ou des dispositifs contenant les produits adsorbants contaminés (voir 6.5.5).

Gas recovery equipment, as described in 4.2.1, should be provided wherever possible to allow SF₆ to be removed whilst minimising leakage to the atmosphere. Such equipment would normally comprise at least a compressor, suitable means for controlling the flow of the gas and a storage vessel or vessels. It will preferably contain means for re-processing contaminated SF₆.

Gas which has not been re-processed within the recovery equipment may be returned to the supplier for re-processing to its new condition.

Recovered gas should be tested for impurities using the methods given in IEC 480, before it is re-used.

Manufacturers' instructions should recommend suitable handling equipment and provide procedures for its use, covering at least the following:

- the flow rate of SF₆ being removed may need to be controlled to prevent an excessive amount of powder from entering recovery equipment;
- the highest final pressure to which an enclosure should be evacuated should be stated. A few hundred millibars should be achievable, where only a compressor is used to create a partial vacuum upstream. It may be desirable to avoid the use of a vacuum pump in certain circumstances because of the sensitivity of vacuum pumps to powders; a powder filter could reduce the flow rate to an unacceptably low level;
- any further action required should be described. For example purging with dry air or nitrogen and then allowing time for any powders to settle may be necessary prior to opening the enclosure.

4.3.7 *Opening and entering an enclosure*

The following applies to cases a), b) and c) of 4.3.5. Manufacturers' instructions for maintenance, extension or repair should recommend suitable precautions to ensure:

- that as little as possible SF₆ gas remains in an enclosure following emptying;
- that personnel are adequately protected from the effects of any remaining SF₆ and associated impurities;
- that the importance of excluding moisture is understood, to minimise acid formation through hydrolysis;
- that solid SF₆ by-products are adequately removed. Means for this should be recommended, for example a vacuum-cleaner, reserved for "SF₆ use only" and clearly marked accordingly, fitted with a suitable dust filter (see clause E.2, item j));
- that personnel are aware of the irritant nature of solid by-products and are equipped with suitable protective clothing, respirators and eye protection (see clause E.2);
- that items such as tools, clothes and components removed are in a suitable condition for further handling. Cleaning with a neutralising solution is generally required; details of makeup and preferably means for assessing whether a used solution can be used again, should be given (see 6.5.6 and 6.5.7);
- that instructions are given for the handling and disposal of filter bags or canisters containing contaminated adsorbent material (see 6.5.5).

4.4 Echappement de SF₆ usagé dans l'atmosphère

Les personnes travaillant ou se trouvant à proximité d'une installation où le SF₆ est manipulé, ne devront pas se trouver exposées au gaz. C'est pourquoi il convient de prendre des précautions pour prévenir le dégagement de SF₆ usagé dans l'atmosphère.

Section 5: Echappement anormal de SF₆

Cette section décrit les conditions anormales pouvant provoquer un échappement de SF₆ en provenance d'équipement en service, et fournit des conseils sur les précautions à prendre si un tel échappement anormal se produit.

5.1 Circonstances menant à un échappement anormal de SF₆

Bien que très peu probable, un échappement anormal de SF₆ peut néanmoins survenir pour plusieurs raisons, parmi lesquelles on trouve:

- a) Fuite anormale. Elle peut provenir d'une défaillance mécanique des composants ou des joints d'étanchéité, ou d'une défaillance produite par un choc accidentel.
- b) Défaut interne provoquant la décharge de la pression ou la perforation de l'enveloppe. L'augmentation de la pression interne, provoquée par l'arc non contrôlé peut faire fonctionner un dispositif de décharge de pression, ou ouvrir l'enveloppe en un endroit prédéterminé ou encore l'arc peut perforer la paroi de l'enveloppe par fusion; le gaz SF₆ peut s'échapper par le trou formé.
- c) Incendie externe. La chaleur à laquelle est soumise une enveloppe peut lui ôter sa capacité à contenir du SF₆ sous pression. Les joints d'étanchéité peuvent s'abîmer ou les dispositifs de décharge de pression fonctionner. Il est peu probable que cela arrive, car il faudrait que l'incendie soit, localement, de forte intensité.

5.2 Fuite anormale

Ce qui suit concerne le cas a) ci-dessus et couvre les cas de fuites de SF₆ qui ne sont pas dues à un défaut interne ou à un incendie. Le taux de fuite anormal doit dépasser les taux de fuite normaux de façon importante, pour que les concentrations de produits de décomposition dans l'air deviennent significatives (voir 3.4.2).

L'attention à la présence d'une fuite anormale peut être attirée de plusieurs façons:

- dans une installation où une alarme à SF₆ est installée, un échappement de SF₆ peut la déclencher;
- une chute de pression de SF₆ peut être indiquée par un pressostat ou un manomètre montés sur un élément de l'équipement;
- les produits de décomposition du SF₆ dégagent une odeur caractéristique que l'on peut détecter (voir les articles B.5 et F.1).

Avant d'autoriser les travaux, il est nécessaire de s'assurer que la concentration des produits de décomposition du SF₆ dans l'air n'atteigne pas le seuil de danger. La meilleure façon d'y parvenir est la mesure directe des concentrations du principal responsable de la toxicité, le fluorure de thyonyle, SOF₂, et des sous-produits de son hydrolyse, le dioxyde de soufre SO₂, et le fluorure d'hydrogène, HF (voir C.3.2.1).

NOTE - Les méthodes selon lesquelles il faut effectuer ces mesures et évaluer leurs résultats sont à l'étude.

4.4 Release of used SF₆ to the atmosphere

Personnel, working on or around an installation where used SF₆ is handled, should not be exposed to the gas and for this reason, care should be taken to prevent the release of used SF₆ to the atmosphere.

Section 5: Abnormal release of SF₆

This section describes abnormal conditions under which SF₆ might be released from equipment in service and provides guidance on precautions to take if an abnormal release occurs.

5.1 Circumstances leading to abnormal release of SF₆

Although very unlikely, abnormal releases of SF₆ can occur for several reasons. Among these are:

- a) Abnormal leakage. This could be due either to mechanical failure of components or seals or to mechanical failure induced by abnormal shock.
- b) Internal fault leading to pressure relief or burn-through of the enclosure. The internal pressure rise produced by uncontrolled arcing may cause the operation of an over-pressure relief device or the opening of a well-defined part of an enclosure, or an arc to the enclosure wall may cause it to melt; if a hole forms, the SF₆ gas escapes.
- c) External fire. Heat applied to an enclosure may cause it to fail to contain pressurised SF₆. Seals may be damaged or relief devices may operate. This is very unlikely, requiring a local fire of high intensity.

5.2 Abnormal leakage

The following applies to case a) of clause 5.1 and covers any release of SF₆ not due to internal fault or fire. The rate of an abnormal leak has to exceed normal leak rates by a large factor before decomposition product concentrations in the air become significant (see 3.4.2).

Attention to the presence of an abnormal leakage may be alerted in one of several ways:

- in an installation where an SF₆ alarm is fitted a release of SF₆ gas may cause this to operate;
- a low SF₆ pressure indication may be given by an under-pressure detector or gauge fitted to an item of equipment;
- The characteristic odour of SF₆ decomposition products may be noticed (see clauses B.5 and F.1).

Before work is permitted it is necessary to ensure that the concentrations of SF₆ decomposition products in the air are at safe levels. This is ideally achieved by direct measurement of the concentrations of the main contributor to toxicity, thionyl fluoride SOF₂ and of the by-products of SOF₂ hydrolysis, sulphur dioxide SO₂ and hydrogen fluoride HF (see C.3.2.1).

NOTE - Methods for making and interpreting such measurements are under consideration.

Une autre méthode possible est la mesure de la concentration de SF_6 (usagé) dans l'air.

La concentration en SF_6 ne doit pas dépasser 200 ppmv (voir F.4.1).

Si la concentration de SF_6 dépasse 200 ppmv, il convient d'assurer une ventilation, de préférence par circulation d'air forcée, afin de disperser le gaz accumulé. Si la concentration reste supérieure à 200 ppmv, ou s'il n'est pas possible de la mesurer, il est recommandé d'employer un appareil respiratoire conforme au point h) de l'article E.2.

5.3 Echappement anormal issu d'un défaut interne

Ce qui suit traite du cas b) de l'article 5.1. Le manuel d'instruction du fabricant ne peut être tenu de traiter des situations de défaillances imprévues. Il est donc nécessaire de dispenser dans ce rapport des indications qu'il convient que le personnel chargé d'un équipement au SF_6 connaisse.

Les définitions et d'autres informations relatives aux défauts internes sont données dans l'annexe AA de la CEI 298 et l'annexe BB de la CEI 517.

Un défaut interne survient lorsqu'un arc accidentel se forme dans l'enveloppe d'un appareillage. Pour certains équipements, en particulier les tableaux de distribution moyenne tension sous enveloppe métallique, l'isolement dans l'air est utilisé pour les jeux de barres entre les cellules, et autour des connexions de câble, le SF_6 n'étant utilisé que dans les enceintes de coupure. Dans ce cas, le défaut interne peut survenir dans le tableau de distribution, mais à l'extérieur de l'enceinte de coupure, ne provoquant ainsi aucun dégagement de SF_6 .

Bien qu'extrêmement rare, le risque de défaut interne ne peut être complètement ignoré. Il peut se produire à la suite d'un:

- défaut dans le système d'isolement;
- défaut mécanique provoquant une perturbation dans la répartition du champ électrique, à l'intérieur de l'équipement;
- mauvais fonctionnement d'une partie de l'appareil de coupure, dû à un mauvais assemblage ou à des éléments défectueux, ou encore au mauvais fonctionnement ou au mauvais usage des dispositifs de verrouillage.

Un défaut interne provoquera une élévation de la pression à l'intérieur de l'enveloppe, ceci pouvant avoir des conséquences diverses selon les circonstances.

L'augmentation de la pression est due au transfert de l'énergie électrique de l'arc vers le gaz. La montée en pression dépend du courant, de la tension d'arc et de la durée d'arc ainsi que du volume de l'enveloppe où s'est produit l'arc. A la suite d'un défaut interne, ayant provoqué le fonctionnement du dispositif de décharge de pression ou de percement de l'enveloppe, le SF_6 et une grande partie des produits de décomposition solides (poudres) seront expulsés de l'enveloppe du SF_6 .

Toute personne présente au moment d'un défaut interne devra évacuer les lieux immédiatement, indépendamment du fait de savoir ou de penser que du SF_6 s'est échappé (voir C.5 et C.6).

A practical alternative method is to measure the concentration of (used) SF₆ in the air.

The SF₆ concentration shall not exceed 200 ppmv (see F.4.1).

If the SF₆ concentration exceeds 200 ppmv, ventilation should be provided, preferably using forced air movement to disperse accumulated gas. If the SF₆ concentration remains above 200 ppmv, or if means to measure the SF₆ concentration are not available, then a respirator according to clause E.2, item h) should be used.

5.3 Abnormal release due to internal fault

The following applies to case b) of clause 5.1. Manufacturers' instructions cannot be expected to deal with unforeseen failure situations so it is necessary to present guidelines, of which personnel responsible for SF₆ equipment should be aware.

Definitions and other information relevant to internal faults are given in annex AA of IEC 298 and in annex BB of IEC 517.

An internal fault occurs when abnormal arcing is initiated inside a switchgear and controlgear enclosure. In certain types of equipment, particularly metal-enclosed medium-voltage switchboards, air insulation is used for the busbars between cubicles and around cable connections and SF₆ is present only within switching chambers. In this case an internal fault could occur within the switchboard but outside the switching chamber, so that no SF₆ is released.

An internal fault is a very rare occurrence but cannot be completely disregarded. It can occur as a result of:

- a defect in the insulation system;
- a mechanical defect leading to a disturbance of the electric field distribution inside the equipment;
- the mal-operation of part of a switching device due to faulty assembly, components or malfunction or misuse of interlocks.

An internal fault will cause an increase of pressure inside the enclosure, the effects of which will depend upon circumstances.

The pressure rise is caused by the transfer of the electrical energy from the arc into the gas. The increase in pressure will depend upon the value of the arc current, the arc voltage, the arc duration and the volume of the enclosure in which the arc has developed. Following an internal fault leading to pressure relief or enclosure burn-through, the SF₆ and much of any solid decomposition products (powders) will have been expelled from the SF₆ enclosure.

Any person present at the time of an internal fault should evacuate the area immediately, irrespective of whether SF₆ is known or believed to have been released (see clauses C.5 and C.6).

5.3.1 Composition du SF₆ et des produits de décomposition échappés

Plusieurs études de cas, présentées dans l'annexe C, montrent que les taux de concentration des produits de décomposition présents dans le SF₆ échappé à la suite d'un défaut interne, peuvent largement varier selon les circonstances. Même dans le pire des cas, il est peu probable qu'une exposition instantanée aux produits de décomposition du SF₆ présente des risques significatifs pour la santé, tant que ce temps d'exposition reste limité. Il existe cependant d'autres sources d'émanations toxiques (matières organiques, vapeurs métalliques) qui peuvent présenter une plus grande menace que les produits de décomposition du SF₆.

5.3.2 Installations à l'extérieur

Dans le cas d'installations à l'extérieur, le gaz contaminé se dispersera rapidement et la concentration de SF₆ dans l'air deviendra vite négligeable.

Les produits de décomposition solides peuvent se déposer sur, et autour, de l'équipement. Il est donc important que le personnel porte des vêtements de protection appropriés, pendant le nettoyage des zones affectées. Selon l'endroit, il convient que le nettoyage s'effectue avec un aspirateur ou par pulvérisation abondante d'eau, ou mieux, d'une solution légèrement alcaline (voir 6.5.3). Le port de chaussures de sécurité est recommandé, à moins que le sol n'ait été confirmé comme ne comportant aucune acidité.

5.3.3 Installations à l'intérieur

Dans une installation à l'intérieur, à la suite d'un défaut interne ayant entraîné le fonctionnement du dispositif de décharge de pression ou l'ouverture de l'enveloppe par percement de la paroi, il est nécessaire de ventiler minutieusement la zone avant d'y pénétrer, ou de se munir d'un dispositif respiratoire, défini au point h) de l'article E.2 jusqu'à ce qu'une ventilation appropriée soit mise en place. Avant d'effectuer tout travail, il convient de laisser s'écouler un certain temps pour que la poussière se dépose afin d'être ensuite retirée à l'aide d'un aspirateur. Il est important pour le personnel de porter des vêtements de protection appropriés pendant le nettoyage des lieux.

Il est nécessaire de s'assurer que le niveau de concentration du produit de décomposition, le fluorure de thionyle (SOF₂) (la source principale de toxicité voir l'article C.3) est sans danger pour la santé, en cas d'exposition prolongée. Il est recommandé de mesurer directement la concentration de SOF₂ dans l'air, sachant qu'elle doit rester inférieure au TLV de 1,6 ppmv du SOF₂ (voir C.8.1).

Si un appareil de mesure du taux de SOF₂ n'est pas disponible, une mesure de la concentration de SF₆ peut être effectuée, selon F.4.2.

La concentration de SF₆ ne doit pas excéder 20 ppmv.

Il convient que la limite ci-dessus soit respectée avant que le personnel ne puisse pénétrer dans l'installation sans dispositif respiratoire. Il convient d'accorder une attention toute particulière aux endroits situés en dessous du point où l'échappement s'est produit. Si ces endroits sont occupés, ils devront être évacués et minutieusement ventilés.

5.4 Echappement anormal de gaz dû à un incendie

Ce qui suit concerne le cas c) de l'article 5.1. Pour analyser de façon détaillée ce qui se passe au cours d'un incendie, il est nécessaire de connaître les caractéristiques température/durée de l'incendie, et la configuration exacte de l'installation.

5.3.1 *Composition of SF₆ and by-products released*

Several case studies are presented in annex C which show that the concentrations of decomposition products, present in SF₆ expelled during an internal fault, can vary widely according to circumstances. Even in the most severe cases, however, it is unlikely that immediate exposure to the SF₆ decomposition products would present a significant health risk, as long as the exposure time is limited. There are, however, other sources of toxic fumes (organic materials, metal vapours) which could pose a greater threat than that from SF₆ by-products.

5.3.2 *Outdoor installations*

In the case of outdoor installations, the contaminated gas will disperse quickly and the concentration of SF₆ in the air will rapidly become negligible.

The solid decomposition products may remain on and around the equipment and it is important that personnel should wear adequate protective clothing while the affected areas are cleaned. Cleaning should be carried out using a vacuum cleaner where appropriate or by spraying with abundant fresh water or, preferably, with a weak alkaline solution (see 6.5.3). Protective footwear should continue to be worn unless the ground has been proven to be non-acidic.

5.3.3 *Indoor installations*

Following an internal fault leading to pressure relief or enclosure burn-through in an indoor installation it is necessary to ventilate the area thoroughly before entering or to use respirators as defined in clause E.2, item h) until adequate ventilation can be provided. Before any work is carried out, time should be allowed for dust to settle and this should be removed using a vacuum cleaner. It is important that personnel should wear adequate protective clothing while the affected areas are cleaned.

It is necessary to ensure that the concentration of the decomposition product thionyl fluoride SOF₂ (the principal contributor to toxicity, see clause C.3), remains at a safe level for prolonged exposure. This is preferably achieved by direct measurement of the concentration of SOF₂ in the air; this should remain below the TLV of SOF₂, i.e. 1,6 ppmv (see C.8.1).

If means to measure the SOF₂ concentration are not available, a measurement of the SF₆ concentration can be made, following the guidelines given in F.4.2.

The SF₆ concentration shall not exceed 20 ppmv.

The above criteria should be satisfied before personnel enter without respirators. Attention should be paid to areas below the point at which the release occurred; if such areas are occupied they should be evacuated and ventilated thoroughly.

5.4 **Abnormal release due to external fire**

The following applies to case c) of clause 5.1. To analyse in detail what happens during a fire, it is necessary to consider the temperature/duration characteristics and the exact configuration of the installation.

Cependant, les résultats obtenus avec des incendies réels montrent que la température maximale de la flamme dépasse rarement 800 °C, et que celle des pièces métalliques se situe généralement en dessous de 600 °C.

Le SF₆ contenu dans l'appareillage est uniquement utilisé dans des enveloppes à pression autonomes ou scellées. Si le feu atteint l'enveloppe contenant du SF₆, le gaz contenu est chauffé relativement lentement, à une vitesse qui dépend de la température externe.

Le gaz chauffé crée une pression à l'intérieur de la cuve. Avant d'atteindre une pression menant à la rupture de l'enveloppe, le dispositif de décharge de pression qui est normalement installé sur les enveloppes contenant du SF₆ fonctionne. Lorsque les enveloppes sont en résine moulée ou lorsque des traversées sont utilisées (équipement moyenne tension), le matériau de l'enveloppe peut se ramollir avant que la pression interne puisse faire fonctionner le dispositif de décharge de pression. Dans les deux cas, du SF₆ peut s'échapper dans la zone autour de l'enveloppe.

5.4.1 Décomposition du SF₆ échappé

Le SF₆ n'étant pas inflammable, il ne peut alimenter le feu, et pourrait même avoir un effet extincteur. De plus, la température requise pour que le SF₆ atteigne une pression suffisante pour faire fonctionner le dispositif de décharge de pression est toujours inférieure à 500 °C. Le gaz SF₆ étant stable en dessous de cette température [5], il ne se décomposera pas de façon significative avant de s'échapper.

Après échappement, le SF₆ se dissipera rapidement par convection, et de ce fait, ne devrait pas être soumis à une chaleur directe pendant assez longtemps pour subir une décomposition significative.

5.4.2 Installations à l'extérieur

Il convient que, dans le cas de postes extérieurs, la distance entre l'installation et la zone la plus proche, accessible au public, soit suffisante pour s'assurer que le SF₆ usagé, pouvant atteindre de telles zones, est à très faible concentration.

5.4.3 Installations à l'intérieur

5.4.3.1 Équipement moyenne tension

Les appareillages moyenne tension isolés au SF₆ ne contiennent que de faibles volumes (< quelques centaines de litres), à pression faible. Dans un incendie où la température excède 150 °C, les enveloppes en résine moulée commencent à se ramollir, permettant au SF₆ de s'échapper avant que les dispositifs de décharge de pression ne fonctionnent. Dans ce cas, le SF₆ peut s'échapper à une température restant en dessous de sa température de décomposition.

L'accès aux sous-stations est habituellement réservé à un personnel spécialisé, et en cas d'incendie, un bâtiment accessible au public ou à des employés sera toujours évacué. Les sous-stations sont généralement construites de manière à minimiser le risque de propagation du feu, et les moyens mis en oeuvre ont également pour objet de contenir le SF₆ échappé. Dans les sous-stations de grande taille, la lutte contre les incendies est souvent assurée par des systèmes automatisés.

Dès lors, le faible taux de décomposition du SF₆, associé à la conception normale des sous-stations, fait que le risque d'exposition du public aux produits de décomposition du SF₆ est très faible.

However, the results obtained with actual fires show that maximum flame temperatures rarely exceed 800 °C and that the temperature of metallic parts is generally lower than 600 °C.

SF₆ gas in electrical switchgear and controlgear is only used in closed or sealed enclosures; if a fire reaches the SF₆ enclosure the gas inside is heated relatively slowly, at a rate which depends on the external temperature.

The heated gas creates a pressure inside the vessel. Before reaching a pressure which would lead to enclosure rupture, the pressure relief devices which are normally fitted to SF₆ enclosures will operate. Where cast resin enclosures or bushings are used (medium-voltage equipment), the enclosure material may soften before the internal pressure becomes high enough to operate a relief device. In both cases, SF₆ could be released into the area surrounding the enclosure.

5.4.1 *Decomposition of released SF₆*

As SF₆ is non-flammable it cannot feed the fire and could indeed have an extinguishing effect. Moreover, the temperature of the SF₆ required to raise the internal pressure to a level at which a pressure relief device would operate would invariably be less than 500 °C. SF₆ gas, being stable below this temperature [5], would not undergo significant decomposition prior to its release.

After release, SF₆ would be rapidly dissipated by convection and should therefore not be exposed to direct heat for long enough for further significant decomposition to occur.

5.4.2 *Outdoor installations*

In the case of outdoor substations, the distance between the installation and the nearest area used by the public should be sufficient to ensure that any used SF₆ reaching such areas is at a very low concentration.

5.4.3 *Indoor installations*

5.4.3.1 *Medium-voltage equipment*

Medium-voltage SF₆ switchgear and controlgear uses low SF₆ pressures in small volumes (< a few hundred litres). During a fire where the local temperature exceeds 150 °C, cast resin gas enclosures would begin to soften and SF₆ may escape before pressure relief devices can operate. In this case, SF₆ could be released at fire temperatures below the decomposition temperature.

Access to electrical substations is normally restricted to specialist staff and in the event of a fire, a building with access to the public or employees will invariably be evacuated. Substations are normally built so as to minimise the risk of fire propagation and the means employed will also serve to contain any SF₆ gas released. Fire-fighting in larger electrical substations is often by automatic systems.

The risk of public exposure to SF₆ by-products is expected to be extremely low as a result of the low decomposition rate of SF₆ at fire temperatures and normal substation design factors.

Comparé à l'ameublement par exemple, l'équipement électrotechnique n'est qu'une source mineure de propagation du feu (voir CEI 695-7-1).

5.4.3.2 *Equipement haute tension*

L'accès aux sites ou aux bâtiments est réservé au personnel spécialisé. Aucun problème lié aux produits de décomposition du SF₆ n'a été rapporté, à la suite d'un incendie [1].

Dans les installations à l'intérieur, des dispositifs spécialement conçus pour limiter le risque d'incendie sont inclus, des systèmes automatiques de détection et d'extinction du feu sont normalement présents. Le risque d'échappement de SF₆ est donc très faible.

5.4.4 *Précautions à prendre pendant et après un incendie*

Pour les personnes combattant le feu et ayant à s'approcher de l'équipement, il convient de prendre les précautions habituelles contre les fumées de plastique en feu.

Suite à un incendie dans une installation à l'intérieur, il convient de prendre les précautions décrites en 5.3.3.

NOTE – Tous les matériaux exposés à la chaleur, ainsi que les fumées et les vapeurs émanant de ceux-ci, sont à prendre en compte lors de l'évaluation des risques pour le personnel, en cas d'incendie. La toxicité du SF₆ décomposé est très inférieure à celle des fumées émises par les matériaux utilisés pour le câblage, l'isolement et la peinture. Le monoxyde de carbone est, de loin, l'élément contribuant le plus au danger. D'autres agents représentent une menace significative: le cyanure d'hydrogène, le dioxyde de carbone, la chaleur, l'hypoxie, et les agents irritants (voir la CEI 695-7-1 et C.4.7.2 et C.4.7.3).

Section 6: Fin de vie de l'équipement rempli au SF₆

Cette section fournit des conseils pour la destruction et/ou le recyclage de l'appareillage rempli au SF₆ retiré du service et des pièces ou matériaux extraits de ces équipements.

6.1 Généralités

Les considérations sur la protection de l'environnement et la conservation des matériaux s'appliquent à tous types de produits (par exemple: les véhicules automobiles, les emballages, l'équipement électrique domestique). Le recyclage des matériaux récupérables est souhaitable chaque fois que c'est possible, pour des raisons d'économie et d'environnement. Les équipements plus importants, comme l'appareillage moyenne et haute tension, contiennent une quantité significative de matériaux à forte valeur (par exemple, le cuivre et d'autres métaux), et sont donc rentables lors de leur recyclage. L'utilisation de SF₆ ne contrarie pas cette démarche, le SF₆ pouvant lui-même être recyclé.

Il est recommandé de retirer le SF₆ de tout élément d'équipement avant d'en enlever ou d'en récupérer les matériaux. Les enveloppes à gaz peuvent contenir des produits de décomposition solides qu'il convient de neutraliser. Les procédures de neutralisation et de nettoyage sont simples à mettre en oeuvre, et ne requièrent que du matériel facilement disponible, comme décrit dans l'article 6.5. Les résidus du nettoyage sont manipulables sans danger, et sont à traiter selon la réglementation locale (voir 6.5.4).

Electrotechnical products are usually a very minor source of fire effluent compared for example with furnishings (see IEC 695-7-1).

5.4.3.2 *High-voltage equipment*

Access to the site or building is restricted to specialist staff. No problems associated with SF₆ decomposition have been reported in cases of fire [1].

In indoor installations, specific design features to minimise fire risk are incorporated; automatic fire detection and extinguishing systems are normally present. The risk of release of SF₆ is thus very small.

5.4.4 *Precautions during and following a fire*

For persons fighting a fire, precautions normally adopted for protection against vapours from burning plastics will be adequate if equipment has to be approached.

Following a fire in an indoor installation, precautions as outlined in 5.3.3 should be exercised.

NOTE – All the materials subjected to heat and the fumes and vapours emitted by them have to be considered when assessing the risks to personnel in a fire. The toxicity of decomposed SF₆ is likely to be very much lower than that of fumes from materials used for wiring, insulation and paint. Carbon monoxide is by far the most significant agent contributing to hazard. Other agents of major significance are hydrogen cyanide, carbon dioxide, heat, hypoxia, and irritants (see IEC 695-7-1 and C.4.7.2 and C.4.7.3).

Section 6: End of life of SF₆-filled equipment

This section provides guidelines for the disposal and/or re-cycling of SF₆-filled switchgear and controlgear which has been removed from service and of parts and materials removed from such equipment.

6.1 General

Environmental protection and materials conservation considerations are applicable to products of all kinds (for example: motor vehicles, packaging, domestic electrical equipment). The re-cycling of recoverable materials where possible is desirable from both the economic and environmental viewpoints. Larger items of equipment, such as medium- and high-voltage switchgear and controlgear units, containing a significant material value (for example, copper and other metals), are attractive candidates for re-cycling. The use of SF₆ does not detract from this position; the SF₆ itself can also be re-cycled.

The SF₆ should be removed from an item of equipment prior to the disposal or recovery of materials. Gas enclosures may contain solid decomposition products which should be neutralised. Procedures for neutralisation and cleaning are simple to apply and require only readily available materials; they are described in clause 6.5. The residues from these processes are safe to handle and can be disposed of according to local regulations (see 6.5.4).

L'appareillage rempli au SF_6 a été introduit au début des années 1960 dans le domaine de la haute tension, puis dans le domaine de la moyenne tension pendant la décennie suivante. La durée de service présumée de ces appareillages étant de 30 années, à l'heure actuelle, seul un tout petit nombre d'unités a atteint la fin de leur durée de vie. De ce fait, aucun processus de recyclage à l'échelle industrielle n'a été mis en place jusqu'à présent.

6.2 Matériaux contenus dans l'appareillage

Un élément type d'équipement est composé approximativement des masses de matériaux suivants:

Métaux ferreux et non ferreux:	75 % à 90 %
Matériaux diélectriques:	10 % à 25 %

La présence de SF_6 ne constitue qu'une très faible part du poids total et ne nécessite que peu d'efforts supplémentaires pour préparer l'équipement au recyclage ou à la destruction.

La plus grande partie de la masse de matériaux diélectriques provient des isolants solides (résine moulée, plastiques, céramiques).

Les métaux représentent la valeur récupérable la plus importante.

6.3 Quantité de produits de décomposition du SF_6

La quantité de produits de décomposition du SF_6 dans un élément d'équipement donné dépend de la quantité d'énergie d'arc cumulée fournie. Cela dépend de l'historique de fonctionnement et de service de l'équipement concerné. Un interrupteur de charge ne contiendra que de petites quantités de produits de décomposition, contrairement à un disjoncteur à fort pouvoir de coupure, ayant coupé fréquemment le courant de défaut.

Dans la grande majorité des cas, y compris celui des disjoncteurs, le degré de décomposition est faible. Les relevés sur des disjoncteurs remplis au SF_6 après 10 années de service, dans un système typique de distribution moyenne tension, montrent qu'ils contenaient [6].

Air:	quelques ppmv;
CF_4 :	40 ppmv à 600 ppmv;
SOF_2 :	négligeable;
SO_2F_2 :	négligeable.

De tels résultats s'expliquent de la manière suivante:

- en moyenne, les coupures à fort courant, en service normal, sont très rares;
- des adsorbants sont présents dans les enveloppes à gaz des disjoncteurs.

Le degré de décomposition prévisible pour divers types d'équipements est donné au tableau 1.

SF₆-filled switchgear and controlgear was first introduced in the 1960s at high-voltage and during the following decade at medium-voltage. The prospective service life for switchgear and controlgear is around 30 years, so at the present time, only a few of the total number of switchgear and controlgear units installed have fulfilled their life expectancy. Hence no industrial scale recovery process has yet begun.

6.2 Material content of switchgear and controlgear

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

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

Where 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 or disposal.

Most of the weight of the dielectric material is provided by solid insulation (cast resin, plastics, ceramics).

The major part of the reclaimable value is in the metals.

6.3 Quantity of SF₆ decomposition products

The quantity of SF₆ decomposition products within an item of equipment depends on the cumulative arc energy which has been supplied to it. This depends on the function and service history of the equipment in question. A load-break switch is likely to contain much smaller quantities of decomposition products than a high breaking-capacity circuit-breaker with a history of frequent fault clearances.

In the large majority of cases, the degree of decomposition, even in circuit-breakers, is low. SF₆ circuit-breakers checked after 10 years of operation in a typical medium-voltage distribution system were found to contain [6]:

Air:	a few ppmv;
CF ₄ :	40 ppmv to 600 ppmv;
SOF ₂ :	negligible;
SO ₂ F ₂ :	negligible.

The reasons given for these findings are:

- on average, very few high-current interruptions are performed in normal service;
- adsorbents are fitted in circuit-breaker gas enclosures.

Expected degrees of decomposition for various types of equipment are given in table 1.

Tableau 1 – Degrés de décomposition prévisible du SF₆

Application	Degré de décomposition prévisible du SF ₆
Jeu de barres Boîte à câbles	Faible: de zéro à quelques dixièmes de pourcent
Sectionneur de mise à la terre dans un GIS Sectionneur dans un GIS	Aucun dépôt de poudre visible
Interrupteur de charge moyenne tension et appareillage de coupure d'artère	
Disjoncteur moyenne et haute tension	Moyen: jusqu'à quelques pourcents Léger dépôt de poudre
Toute enveloppe où s'est produit un arc anormal	Elevé: peut dépasser 5 % Moyen à fort dépôt de poudre

6.4 Options pour le traitement de l'équipement en fin de vie

L'utilisateur d'équipement rempli au SF₆ a trois possibilités:

6.4.1 Option 1: Traitement complet par sous-traitance

Le recyclage/destruction peuvent être sous-traités par le fabricant de l'équipement ou par une société spécialisée. Cette option est particulièrement avantageuse pour les équipements suffisamment petits pour être transportés d'un bloc. Si l'équipement contenant du SF₆ usagé doit être transporté, il convient de respecter les règlements locaux (les informations relatives à la composition du contenu peuvent être demandées).

Si cette option est retenue, l'utilisateur n'a aucune intervention particulière à effectuer sur l'équipement contenant du SF₆, outre celle de préciser le degré de décomposition prévisible afin que le traitement approprié puisse être appliqué (voir l'article 6.3).

6.4.2 Option 2: Retrait du SF₆ par l'utilisateur; traitement par sous-traitance

L'utilisateur peut désirer retirer lui-même le SF₆, par exemple dans le cas d'équipements de dimensions plus importantes ou lorsque la pression dans les enveloppes est trop élevée pour permettre le transport de l'équipement (voir 6.5.1).

Le reste de l'équipement peut alors être confié à une société spécialisée pour sa destruction ou son recyclage.

La seule action supplémentaire à effectuer consiste à préciser le degré de décomposition prévu afin que le traitement approprié soit appliqué (voir l'article 6.3).

6.4.3 Option 3: Traitement complet par l'utilisateur

L'article 6.5 donne les conseils à suivre par l'utilisateur ou tout autre organisme qui veut traiter l'équipement rempli de SF₆ usagé.

6.5 Traitement de l'équipement rempli au SF₆ en fin de vie

Il convient que l'équipement rempli au SF₆ soit traité à la fin de sa vie de telle sorte que les enveloppes ayant contenu le gaz et les autres pièces internes puissent être manipulées, recyclées ou détruites comme n'importe quel déchet courant.

Table 1 – Expected degrees of SF₆ decomposition

Application	Expected degree of SF ₆ decomposition
GIS busbars Cable box GIS earth switch GIS disconnecter Medium-voltage load-break switch and ring-main unit	Low: from zero to a few tenths of a percent No visible powder deposit
Medium-voltage and high-voltage circuit-breaker	Medium: up to a few percent Light powder deposits
Any enclosure in which abnormal arcing has occurred	High: could exceed 5 % Medium to heavy powder deposits

6.4 Options for treatment of equipment at end of life

There are three possibilities for users of SF₆-filled equipment:

6.4.1 Option 1: Complete treatment by a sub-contractor

The re-cycling/disposal can be sub-contracted to the equipment manufacturer or to a specialist company. This approach may be particularly attractive for equipment which is small enough to be transported in its complete form. If equipment containing used SF₆ has to be transported, local regulations should be adhered to (this may require that information be given concerning the composition of the contents).

If this option is adopted, the user has no special action to take for SF₆-filled equipment, other than specifying the expected degree of decomposition, so that appropriate treatment can be applied (see clause 6.3).

6.4.2 Option 2: Removal of the SF₆ by the user; treatment by a sub-contractor

The user may wish to remove the SF₆, for example in the case of larger equipment or where the internal SF₆ pressure is considered to be too high to allow the equipment to be transported (see 6.5.1).

The remainder of the equipment can then be submitted to a specialist company for re-cycling or disposal.

The only further action necessary is to specify the expected degree of decomposition, so that appropriate treatment can be applied (see clause 6.3).

6.4.3 Option 3: Complete treatment by the user

The guidance given in clause 6.5 should be followed by the user or by any party undertaking the treatment of used SF₆-filled equipment.

6.5 Treatment at end of life of SF₆-filled equipment

Treatment applied at the end of life of SF₆-filled equipment should be such as to ensure that gas enclosures and internal parts can be handled, re-cycled, or disposed of as normal waste.

6.5.1 *Retrait et traitement du SF₆*

Il est recommandé que le gaz SF₆ soit retiré selon la procédure décrite en 4.3.6; il pourra alors être retraité à l'aide d'un matériel de recyclage, en vue de sa réutilisation, ou confié à un fabricant de SF₆ pour transformation en produit nouveau.

Si le SF₆ usagé doit être transporté, il convient de respecter les réglementations locales (les informations relatives à la composition du gaz peuvent être demandées).

6.5.2 *Traitement de l'enveloppe à gaz*

En fonction du degré de décomposition prévisible, indiqué selon le type d'équipement utilisé (voir l'article 6.3), il convient de traiter les enveloppes comme décrit ci-dessous. Pendant ce traitement, des précautions sont à prendre pour éviter le contact de la peau ou des yeux avec les poudres ou les produits de nettoyage. C'est pour cela que l'utilisation de gaz comprimé pour retirer les poudres est à éviter et qu'il convient d'utiliser des vêtements et des équipements appropriés (voir annexe E).

a) *Faible décomposition*

Aucune action particulière n'est requise; les pièces non récupérables peuvent être détruites selon l'usage et selon les règlements locaux en vigueur.

b) *Décomposition moyenne*

Lorsque c'est réalisable, il y a lieu de remplir l'enveloppe avec une solution neutralisante qu'il convient de laisser à l'intérieur pendant un temps T_1 (voir 6.5.3). Il convient que l'enveloppe soit rincée à l'eau claire.

Une autre possibilité est de laver abondamment toutes les surfaces intérieures avec une solution neutralisante et de les rincer ensuite avec de l'eau claire.

Des conseils pour le traitement des solutions neutralisantes usagées sont donnés en 6.5.4.

c) *Décomposition élevée*

Il convient que l'enveloppe soit remplie, si possible, d'une solution neutralisante en la laissant dans celle-ci pendant un temps T_2 (voir 6.5.3). Après le retrait de la solution neutralisante, il convient que l'enveloppe soit rincée à l'eau.

Une autre possibilité, par exemple pour de plus grandes enveloppes, est d'extraire les dépôts de poudre avec un aspirateur réservé à cet usage.

Il convient de prélever et de stocker les matériaux adsorbants et les sacs des aspirateurs dans des containers scellés, avant leur neutralisation ou leur traitement selon la réglementation locale.

Il convient que les surfaces intérieures soient ensuite lavées avec une solution neutralisante puis rincées avec de l'eau (voir 6.5.3).

Des conseils pour le traitement des solutions neutralisantes usagées sont donnés en 6.5.4.

Des conseils pour la neutralisation et le traitement des dépôts de poudre et des adsorbants sont donnés en 6.5.5.

6.5.3 *Solution neutralisante pour les produits de décomposition solides du SF₆*

Trois formules neutralisantes sont décrites dans la littérature [1, 7, 8, 9, 10] chacune ayant des propriétés légèrement différentes. Ce sont toutes des solutions d'un agent actif, dilué dans l'eau selon les concentrations données dans le tableau 2, en kilogrammes d'agent actif pour 100 l d'eau.

6.5.1 Removal and treatment of the SF₆

The SF₆ gas should be removed following the procedure given in 4.3.6; it may then be re-processed within recovery equipment for re-use or submitted to a manufacturer of SF₆ for re-processing to the new condition.

If used SF₆ has to be transported, local regulations should be adhered to (this may require that information be given concerning the composition of the gas).

6.5.2 Treatment of the gas enclosure

According to the expected degree of decomposition, as indicated by the type of equipment (see clause 6.3), treatment of gas enclosures should be applied as follows. During such treatment, care should be taken to avoid contact of powders and cleaning fluids with skin or eyes. For this reason, compressed gas should not be used for removing powders. Appropriate clothing and equipment should be used (see annex E).

a) Low decomposition

No special action is required; non-recoverable parts can be disposed of normally, according to local regulations.

b) Medium decomposition

The enclosure should, where practicable, be filled with a neutralising solution which should be allowed to remain inside for a time period T_1 (see 6.5.3). The enclosure should then be rinsed with clean water.

Alternatively, all interior surfaces should be washed thoroughly with a neutralising solution and then rinsed with clean water.

Guidance for the disposal of used neutralising solutions is given in 6.5.4.

c) High decomposition

Enclosures should be filled, if it is possible, with a neutralising solution, allowing the solution to remain in the enclosure for a time period T_2 (see 6.5.3). The neutralising solution should then be removed and the enclosure rinsed with water.

Alternatively, for example for larger enclosures, loose powder deposits should be removed using a vacuum cleaner reserved for this purpose.

Adsorbent materials and vacuum cleaner bags should be removed and stored in sealed containers prior to neutralisation or disposal according to local regulations.

The internal surfaces should be washed thoroughly with a neutralising solution and then rinsed with water (see 6.5.3).

Guidance for the disposal of used neutralising solutions is given in 6.5.4.

Guidance for the neutralisation and disposal of powder deposits and adsorbents is given in 6.5.5.

6.5.3 Solution for neutralisation of solid SF₆ decomposition products

Three formulations for neutralisation are described in the literature [1, 7, 8, 9, 10], each one having slightly different properties. They are all solutions of an active agent in water, made up according to the concentrations given in table 2, in kilograms of active agent per 100 l of water.

Il convient de tenir compte des critères suivants dans le choix de la solution neutralisante:

- il convient que la solution choisie ne soit ni corrosive ni irritante. Si elle doit être appliquée manuellement, il convient d'utiliser des gants;
- il convient qu'elle soit suffisamment alcaline pendant la procédure de neutralisation pour que tout résidu soit effectivement neutralisé;
- il convient qu'elle ne soit pas trop alcaline à la fin de la procédure de neutralisation, pour pouvoir être éliminée selon la réglementation locale.

Tableau 2 – Solutions de neutralisation des produits de décomposition du SF₆

Agent actif	Formule	Concentration kg/100 l	T ₁ h	T ₂ h	Référence
Chaux	Ca(OH) ₂	Saturé	–	24	[8]
Carbonate de soude (soude de lavage)	Na ₂ CO ₃	1,1	–	24	[7]
		3	Lavage	–	[8]
		10 ¹⁾	–	0,25	[9]
		10-14 ¹⁾	1	48	[1]
		3	–	–	[10]
Bicarbonate de soude	NaHCO ₃	1 ²⁾	–	–	[9]
NOTES 1 Lorsque des solutions alcalines à de si hautes concentrations sont utilisées, il est recommandé de prendre soin d'éviter tout contact avec la peau, les yeux, etc. 2 Conseillé pour laver la peau.					

Le tableau ci-dessus résume l'état actuel de la technique. Les différentes méthodes proposées dans la littérature spécialisée divergent largement, quant à la formulation des solutions neutralisantes et au temps du traitement. L'optimisation du procédé de neutralisation pourrait mener à une approche plus uniforme du traitement.

6.5.4 *Élimination des solutions usagées de nettoyage et de neutralisation*

Il convient de traiter les solutions de neutralisation usagées et l'eau de rinçage selon la réglementation locale, par exemple en les versant dans un collecteur pour eaux pluviales ou eaux usées.

6.5.5 *Traitement et élimination des dépôts de poudre et des adsorbants*

Avant traitement, il y a lieu de stocker ces produits de façon sûre, dans des containers clairement marqués.

Il convient que les dépôts de poudre et les matériaux adsorbants ne soient pas exposés à de hautes températures, ni détruits par incinération, des vapeurs toxiques et/ou corrosives pouvant être dégagées.

Il convient de les neutraliser par immersion pendant un temps minimal T₂ dans une solution décrite en 6.5.3. Il convient que cela soit effectué dans un local bien ventilé et réservé à cet usage. Il convient que les précautions adéquates soient prises afin de prévenir la dispersion des poudres dans l'atmosphère. Il convient que le personnel impliqué dans cette opération porte les vêtements de sécurité spécifiés à l'article E.2.

In choosing a neutralising solution the following criteria should be considered:

- the solution chosen should not be unduly corrosive or irritating. If it is necessary to apply it by hand, gloves should be worn;
- it should be sufficiently alkaline during the neutralisation process to ensure that acidic residues are effectively neutralised;
- it should not be too alkaline at the end of the process so that it can be disposed of in accordance with local regulations.

Table 2 – Solutions for neutralization of the SF₆ decomposition products

Active agent	Formula	Concentration kg/100 l	T ₁ h	T ₂ h	Reference
Lime	Ca(OH) ₂	Saturated	–	24	[8]
Sodium carbonate (washing soda)	Na ₂ CO ₃	1,1	–	24	[7]
		3	Wash	–	[8]
		10 ¹⁾	–	0,25	[9]
		10-14 ¹⁾	1	48	[1]
		3	–	–	[10]
Sodium bicarbonate	NaHCO ₃	1 ²⁾	–	–	[9]
NOTES 1 When using alkaline solutions at such high concentrations, care should be taken to avoid contact with the skin, eyes, etc. 2 Recommended for washing the skin.					

The above table reflects the current state of the art. The various treatment methods suggested in the literature differ widely with respect to neutralising fluid formulation and treatment time. Optimisation of the neutralising process may lead to greater uniformity of approach.

6.5.4 Disposal of cleaning and neutralising fluids

Used neutralising solution or rinsing water should be disposed of according to local regulations, for example, by pouring into a storm or sanitary sewage drain.

6.5.5 Treatment and disposal of powder deposits and adsorbents

Prior to treatment these should be stored in a secure fashion in clearly marked containers.

Powder deposits and adsorbent materials should not be subjected to high temperatures or disposed of by incineration as toxic and/or corrosive vapours are likely to be released.

They should be neutralised by immersion, for a time period of at least T₂, in a solution prepared according to 6.5.3. This should be carried out in a well-ventilated area reserved for this purpose, and suitable precautions should be taken to avoid the release of powders into the atmosphere. Workers engaged in this activity should be provided with protective clothing as specified in clause E.2.

Il convient que les produits de décomposition solides neutralisés, les sacs d'aspirateurs et les adsorbants soient détruits conformément aux règlements en vigueur.

Des conseils pour l'élimination des solutions neutralisantes usagées sont donnés en 6.5.4.

6.5.6 *Traitement des pièces retirées des enveloppes remplies au SF₆*

Il convient que les pièces retirées des enveloppes remplies au SF₆ dont le degré de décomposition est moyen, soient immergées, pendant un temps T_1 , dans une solution décrite en 6.5.3 avant toute autre manipulation.

En cas de forte décomposition, le temps d'immersion T_2 est conseillé. De façon alternative, les pièces peuvent être lavées minutieusement avec une solution neutralisante puis rincées à l'eau.

Des conseils pour l'élimination des solutions neutralisantes usagées sont donnés en 6.5.4.

6.5.7 *Traitement des outils et des vêtements*

Il convient que les outils et vêtements, y compris les chaussures, soient de préférence réservés aux opérations décrites dans la présente section, et ne servent pas pour d'autres utilisations.

Il convient que les vêtements soient immergés après chaque usage pendant un temps T_1 dans une solution décrite en 6.5.3 puis rincés à l'eau avant d'être mis au lavage ou jetés.

Il convient que les outils soient lavés après chaque usage avec une solution neutralisante, puis rincés à l'eau.

Des conseils pour l'élimination des solutions neutralisantes usagées sont donnés en 6.5.4.

Neutralised solid decomposition products, vacuum-cleaner bags and adsorbents should be disposed of according to local regulations.

Guidance for the disposal of used neutralising solutions is given in 6.5.4.

6.5.6 *Treatment of parts removed from SF₆-filled enclosures*

Parts removed from SF₆-filled enclosures with medium decomposition should be immersed in a solution prepared according to 6.5.3 for a time period T_1 prior to further handling.

In cases of high decomposition, immersion for a time period T_2 is recommended. Alternatively the parts should be washed thoroughly with a neutralizing solution and then rinsed with clean water.

Guidance for the disposal of used neutralising solutions is given in 6.5.4.

6.5.7 *Treatment of tools and clothing*

Tools and clothing, including footwear, should preferably be reserved for use during the processes outlined in this section and should not be used for other purposes.

After each use, clothing should be immersed in a solution prepared according to 6.5.3 for a time period T_1 and then rinsed in clean water, before laundering or disposal.

After each use, tools should be washed in a neutralising solution and then in clean water.

Guidance for the disposal of used neutralising solutions is given in 6.5.4.

Annexe A (informative)

Hexafluorure de soufre neuf

A.1 Introduction

L'hexafluorure de soufre (SF_6) est un composé non toxique, chimiquement inerte, non inflammable, et qui est à l'état gazeux dans des conditions de températures et de pressions normales (20 °C et 0,1 MPa absolu).

Ses excellentes propriétés diélectriques et thermiques font qu'il convient pour [11]:

- les équipements pour le transport et la distribution d'énergie électrique (par exemple les postes isolés au gaz, les appareillages de coupure d'artère, les disjoncteurs, les transformateurs, les câbles);
- les équipements médicaux (générateurs de rayons X, équipements pneumothoraciques, etc.);
- les équipements scientifiques (par exemple les microscopes électroniques, les accélérateurs de particules électrostatiques);
- les systèmes de double vitrage (fenêtres d'habitations);
- d'autres applications secondaires comme la météorologie (agent traceur) et la métallurgie (atmosphère de protection).

A.2 Propriétés chimiques [11]

Le SF_6 est un gaz inerte particulièrement stable, incolore, inodore, non toxique, non inflammable et insoluble dans l'eau. C'est l'un des moins réactifs parmi les gaz connus, et dans des conditions normales, il n'altère aucune substance avec laquelle il est en contact.

Ses principales caractéristiques sont résumées dans le tableau A.1.

Tableau A.1 – Caractéristiques chimiques principales du SF_6 [11]

Formule	SF_6
Masse moléculaire	146,05 g/mole
Teneur en soufre	21,95 %
Teneur en fluor	78,05 %
Structure moléculaire	Octoédrique avec un atome de fluor aux six arêtes
Liaisons	Covalente
Section efficace d'impact	4,77 Å
Température de décomposition	500 °C

A.3 Propriétés physiques [11]

Le SF_6 est l'un des plus lourds parmi les gaz connus : dans des conditions atmosphériques normales, il est environ cinq fois plus lourd que l'air. De ce fait, s'il n'est pas suffisamment mélangé à l'air, le SF_6 a tendance à s'accumuler vers le bas.

Son mélange avec l'air, que ce soit par convection ou par diffusion, est lent. Une fois mélangé, il ne se resépare pas.

Annex A (informative)

New sulphur hexafluoride

A.1 Introduction

Sulphur hexafluoride (SF_6) is a non-toxic, chemically inert, non-flammable compound which is gaseous at normal temperature and pressure (20 °C and 0,1 MPa absolute).

Its excellent dielectric and thermal properties make it suitable for use in [11]:

- equipment for the transmission and distribution of electrical energy (for example gas insulated substations, ring main units, circuit-breakers, transformers, cables);
- medical apparatus (X-ray generators, pneumothorax apparatus, etc.);
- scientific equipment (for example electron microscopes, electrostatic particle accelerators);
- double glazing systems (house windows);
- other minor applications such as meteorology (tracer agent) and metallurgy (protective atmosphere).

A.2 Chemical properties [11]

SF_6 is a very stable and inert gas, colourless, odourless, non-toxic, non-flammable and insoluble in water. It is one of the least reactive known gases and in normal conditions it attacks no substance with which it comes into contact.

Table A.1 lists the main chemical characteristics.

Table A.1 – Main chemical characteristics of SF_6 [11]

Formula	SF_6
Molecular weight	146,05 g/mole
Sulphur content	21,95 %
Fluorine content	78,05 %
Molecular structure	Octahedral with fluorine atoms at the six corners
Bonds	Covalent
Collision cross-section	4,77 Å
Decomposition temperature	500 °C

A.3 Physical properties [11]

SF_6 is one of the heaviest known gases: in normal conditions it is about five times heavier than air, so that, under conditions of insufficient mixing with air the gas has a tendency to accumulate at low levels.

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

Bien que la conductivité thermique du SF_6 soit inférieure à celle de l'air, ses propriétés de transfert de chaleur sont globalement deux à cinq fois meilleures grâce à sa plus faible viscosité et à sa plus forte densité.

Dans les équipements de transport ou de distribution d'énergie électrique, la pression normale d'utilisation du SF_6 s'étend de 0,1 MPa à 0,9 MPa absolu. Ses caractéristiques pression/température/densité sont décrites à la figure A.1.

Le tableau A.2 présente les caractéristiques physiques principales.

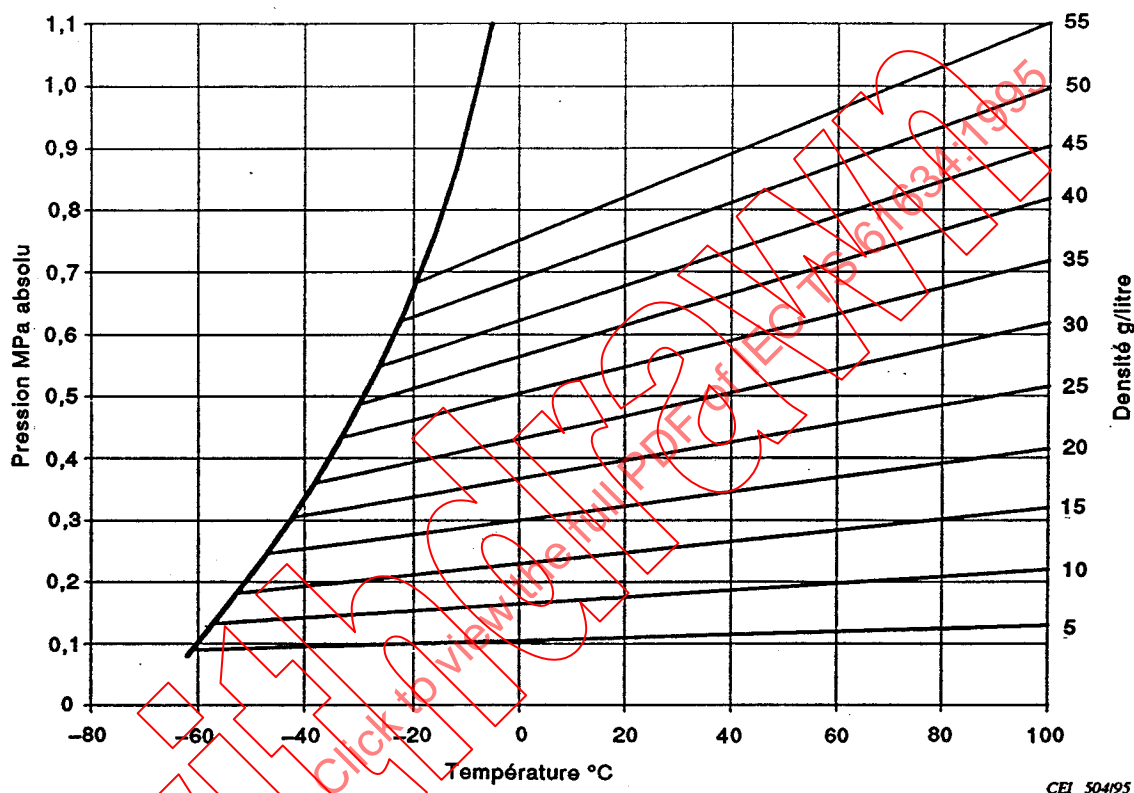


Figure A.1 – Caractéristiques pression/température/densité du SF_6 [11]

Tableau A.2 – Caractéristiques physiques principales du SF_6 à une pression de 0,1 MPa absolu et à une température de 25 °C [11]

Densité	6,14 kg m ⁻³
Conductivité thermique	0,0136 W m ⁻¹ K ⁻¹
Point critique:	
– température	45,55 °C
– densité	730 kg m ⁻³
– pression	3,78 MPa absolu
Vitesse du son	136 m s ⁻¹
Indice de réfraction	1,000783
Chaleur de formation	-1221,66 J mol ⁻¹
Chaleur massique à pression constante	96,60 J mol ⁻¹ K ⁻¹
Equation d'état	Voir figure 1

Even though the thermal conductivity of SF_6 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 electrical energy transmission and distribution equipment the normal pressure range of SF_6 is between 0,1 MPa and 0,9 MPa absolute. The pressure/temperature/density characteristics of the gas are shown in figure A.1.

Table A.2 lists the main physical characteristics.

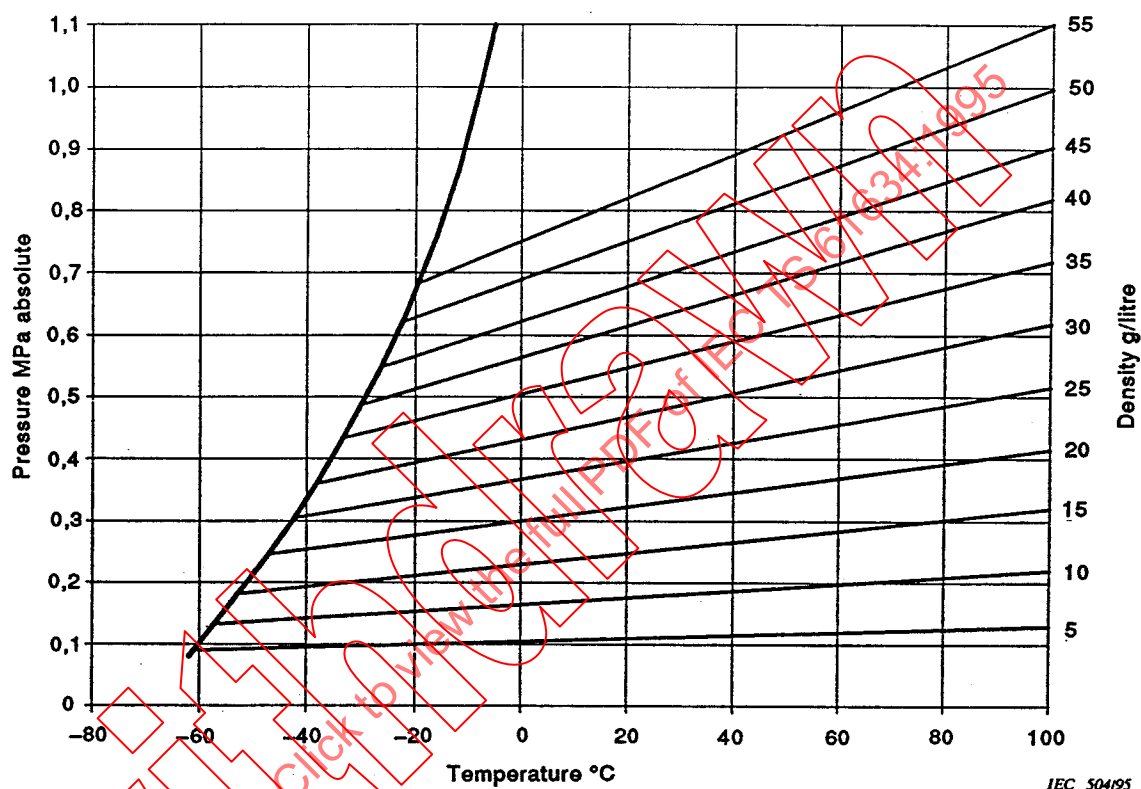


Figure A.1 – Pressure/temperature/density characteristics for SF_6 [11]

Table A.2 – Main physical characteristics of SF_6 at a pressure of 0,1 MPa absolute and a temperature of 25 °C [11]

Density	6,14 kg m ⁻³
Thermal conductivity	0,0136 W m ⁻¹ K ⁻¹
Critical point:	
– temperature	45,55 °C
– density	730 kg m ⁻³
– pressure	3,78 MPa absolute
Sound velocity	136 m s ⁻¹
Refractive index	1,000783
Formation heat	-1221,66 J mol ⁻¹
Specific heat at constant pressure	96,60 J mol ⁻¹ K ⁻¹
Equation of state	See figure 1

A.4 Propriétés électriques [11]

Les excellentes propriétés diélectriques du SF₆ sont dues au caractère électronégatif de sa molécule. Celle-ci a une forte tendance à capter les électrons libres, formant ainsi des ions lourds à faible mobilité, rendant très difficile la formation d'avalanches électroniques.

La rigidité diélectrique du SF₆ est environ 2,5 fois supérieure à celle de l'air aux mêmes conditions.

Du fait de sa basse température de dissociation et de son énergie élevée de dissociation, le SF₆ est un excellent gaz d'extinction d'arcs.

Quand un arc électrique est refroidi dans du SF₆, il reste conducteur jusqu'à une température relativement basse, minimisant ainsi le courant arraché avant le zéro de courant, et évitant ainsi des surtensions élevées.

Par comparaison aux liquides diélectriques, le SF₆ n'est pas inflammable.

Le tableau A.3 présente les principales caractéristiques électriques du SF₆.

Tableau A.3 – Principales caractéristiques électriques du SF₆ [1]

Champ d'amorçage relatif à la pression	89 V m ⁻¹ Pa ⁻¹
Constante diélectrique relative à 25 °C et à 0,1 MPa absolu	1,00204
Facteur de perte (tan δ) à 25 °C et à 0,1 MPa absolu	<2 · 10 ⁻⁷
Coefficient d'ionisation effectif	$\alpha = Ap \left(\frac{E}{p} - B \right)$ α: m⁻¹ E: V m⁻¹ p: Pa A: 2,8 · 10⁻² V⁻¹ B: 89 V m⁻¹ Pa⁻¹

A.5 Manipulations, risques et santé

Le SF₆ pur est non toxique et biologiquement inerte. Les essais effectués sur des animaux et sur des êtres humains montrent que, pour une atmosphère composée à 80 % de SF₆ et 20 % d'oxygène, aucun effet nocif n'a été constaté [13, 14, 15].

Bien qu'il soit possible d'inhaler de l'air fortement chargé en SF₆, il a été établi que la concentration limite maximale dans un lieu où le personnel travaille jusqu'à 8 h par jour, cinq jours par semaine, est de 1 000 ppmv (soit 6 000 mg/m³).

Ce TLV (Threshold Limit Value) est celui couramment utilisé pour tous les gaz inoffensifs normalement absents de l'atmosphère. Dans le cas du SF₆, cette valeur est plus de deux ordres de grandeur inférieure au seuil de danger [12, 16, 17].

Le SF₆ neuf ne présente aucun effet écotoxique, mutagène ou cancérogène (ni génotoxique ou épigénétique) sur la santé [18, 19, 20].

A.4 Electrical properties [11]

The excellent dielectric properties of SF₆ are due to the 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 2,5 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 gas.

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 over-voltages.

Compared to liquid dielectrics, SF₆ is not flammable.

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

Table A.3 – Main electrical characteristics of SF₆ [11]

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

A.5 Handling, hazards and health characteristics

Pure SF₆ is non-toxic and biologically inert. Tests performed with animals and human beings have shown that when present in a concentration of up to 80 % SF₆ to 20 % O₂, no adverse effects are experienced [13, 14, 15].

Whilst it is permissible therefore for the inhaled atmosphere to contain a high proportion of SF₆, a maximum concentration of 1 000 ppmv (6 000 mg/m³) has been established for places of work in which personnel spend up to 8 h per day, five days per week.

This TLV (Threshold Limit Value) is that commonly used for all harmless gases not normally present in the atmosphere and in the case of SF₆, is more than two orders of magnitude lower than the danger level [12, 16, 17].

New SF₆ has no ecotoxic, mutagenic, or carcinogenic (neither genotoxic nor epigenetic) effects on health [18, 19, 20].

En manipulant du SF₆ neuf, il est donc nécessaire de suivre les procédures permettant d'assurer que la concentration maximale spécifiée n'est pas dépassée.

En raison du procédé de fabrication, le SF₆ disponible dans le commerce n'est pas parfaitement pur.

Les degrés d'impureté acceptables sont précisés dans la CEI 376. Ceux-ci sont résumés dans le tableau A.4.

Tableau A.4 – Niveaux d'impureté acceptables pour le SF₆ neuf

Impureté	Maximum admissible
CF ₄	500 ppm poids
O ₂ + N ₂	500 ppm poids
Eau	15 ppm poids
Acidité exprimée en HF	0,3 ppm poids
Fluorures hydrolysables exprimés en HF	1,0 ppm poids

When handling new SF₆ it is necessary therefore only to adopt procedures which ensure that the specified maximum concentration is not exceeded.

Owing to the manufacturing process, commercially available SF₆ is not perfectly pure.

The permitted levels of impurities are laid down in IEC 376. These are shown in table A.4.

Table A.4 – Maximum permitted impurity levels in new SF₆

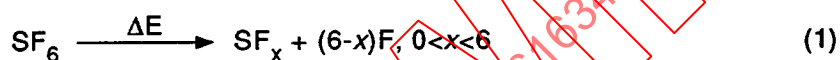
Impurity	Maximum permitted
CF ₄	500 ppm weight
O ₂ + N ₂	500 ppm weight
Water	15 ppm weight
Acidity expressed as HF	0,3 ppm weight
Hydrolysable fluorides expressed as HF	1,0 ppm weight

Annexe B (informative)

Produits de décomposition du SF₆

B.1 Décomposition du SF₆

Quand un arc se produit dans du SF₆, pendant les opérations normales de coupure ou d'élimination des défauts, ou dans l'éventualité peu probable d'un défaut d'arc interne, différents produits de décomposition sont générés simultanément en quantités variables [1, 2, 5, 21, 22]. Quand la molécule du SF₆ est soumise à la température, au rayonnement ou aux décharges électriques et que la séparation des atomes de fluor se produit, un certain nombre de radicaux, d'ions ou de molécules neutres se forment selon le type d'excitation et l'apport d'énergie d'après l'équation suivante:



Quand l'apport d'énergie ΔE cesse, la majorité des atomes se recombinent pour reformer du SF₆, les autres se combinant avec différentes substances présentes dans le système, pour former une variété de produits finaux stables. Ces substances comprennent, en particulier, de l'oxygène, de l'eau, et également des particules provenant des matériaux utilisés dans la fabrication de l'équipement.

Ces produits de décomposition sont considérés dans la présente annexe en fonction de l'énergie fournie au SF₆.

B.1.1 Comportement du SF₆ lors d'un arc électrique

Un arc de forte intensité se produit de façon normale au cours de la coupure d'un disjoncteur ou de l'élimination d'un défaut, et de façon anormale lors d'un arc lié à un défaut interne.

Au-delà de 500 °C, le gaz SF₆ commence à se décomposer en différents éléments dont il est constitué, le degré de décomposition étant directement proportionnel à la quantité d'énergie convertie. Pendant la phase de dissociation décrite dans l'équation (1), les molécules de SF₆ se divisent en atomes de soufre et de fluor à 3 000 °C environ.

La grande quantité de chaleur absorbée pendant ce processus se dissipe en s'éloignant de la zone de formation de l'arc par convection et diffusion. En dessous d'une température de 1 000 °C environ, les atomes se recombinent ou réagissent avec d'autres substances, comme les particules vaporisées d'électrodes métalliques, les parois de la cuve, des matières plastiques et des impuretés. Des décomposés solides et gazeux peuvent se former, parmi lesquels on trouve des fluorures métalliques et sulfureux, les plus courants étant le CuF₂, AlF₃, WF₆, CF₄, et SF₄.

Ces produits, généralement connus comme étant les produits de décomposition primaires, sont formés pendant ou peu après une décharge, en un temps inférieur à 1 s. Les dépôts de poudre se formant à la surface des isolants en fonctionnement normal n'ont pas d'effet négatif sur leur performance diélectrique.

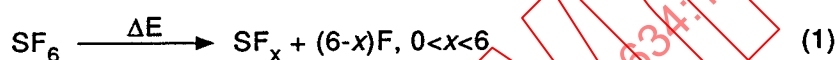
Certains produits de décomposition sont chimiquement stables, d'autres sont très instables, surtout en présence d'eau.

Annex B (informative)

SF₆ decomposition products

B.1 Decomposition of SF₆

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 SF₆ decomposition products are generated simultaneously in varying quantities [1, 2, 5, 21, 22]. 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 decomposition products are considered here in relation to the energy delivered to the SF₆.

B.1.1 *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.

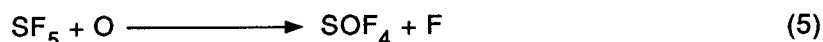
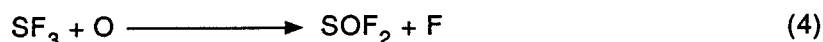
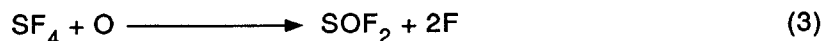
From temperatures of 500 °C, SF₆ gas begins to decompose into its constituent parts, with the degree of decomposition being directly proportional to the quantity of energy converted. In the dissociation process defined in equation (1), the SF₆ molecules are broken down into sulphur and fluorine atoms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

The large quantity of heat absorbed during this process is dissipated away from the arc zone by convection and diffusion. 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 decomposition 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 decomposition 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.

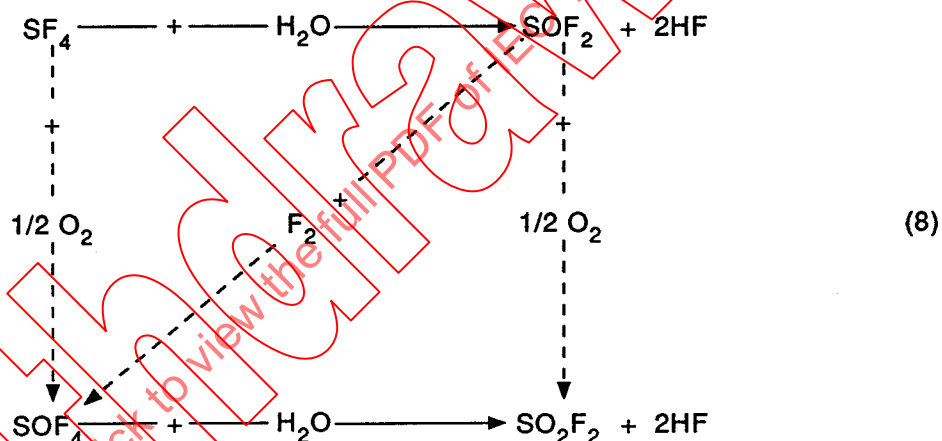
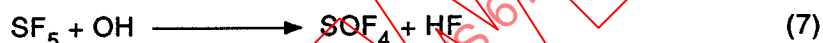
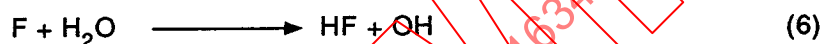
Some of the decomposition products are chemically stable; others are very unstable, particularly in the presence of water.

En présence d'oxygène, des produits de décomposition peuvent se former comme suit:



Il est admis que les réactions (2), (3) et (4), impliquant un dégagement d'oxygène des matériaux constituant l'électrode en période d'arc, sont les mécanismes principaux provoquant la formation de SOF_2 [4, 23, 24]. Ce point est important, si l'on considère que le principal responsable de la toxicité du SF_6 soumis à arc est le SOF_2 (voir C.3.2.1).

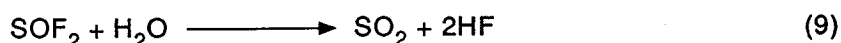
En présence de vapeur d'eau, les réactions suivantes se produisent:



Les lignes discontinues de l'équation (8) indiquent les réactions qui ne se produisent qu'à un degré limité au cours de la décomposition du SF_6 dans un arc [22]. Bien que les réactions de l'équation (8) impliquent la formation de grandes quantités de HF, on ne signale pas de quantités notables de ce produit à la suite des arcs de puissance dans l'appareillage. Cela est probablement dû au fait que la formation du produit de décomposition se fait surtout selon les équations (2), (3) et (4). Il est également possible que le HF produit par les réactions de l'équation (8) réagisse ensuite avec les vapeurs métalliques pour former des fluorures métalliques.

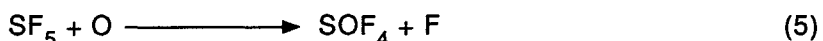
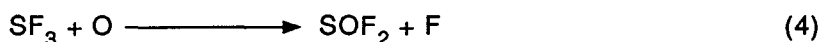
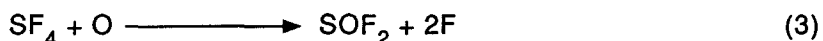
Le SF_4 se forme en quantités importantes, mais il s'hydrolyse rapidement (équation (8)) en présence d'humidité.

Si la présence d'eau persiste, une hydrolyse supplémentaire a lieu, qui conduit à:



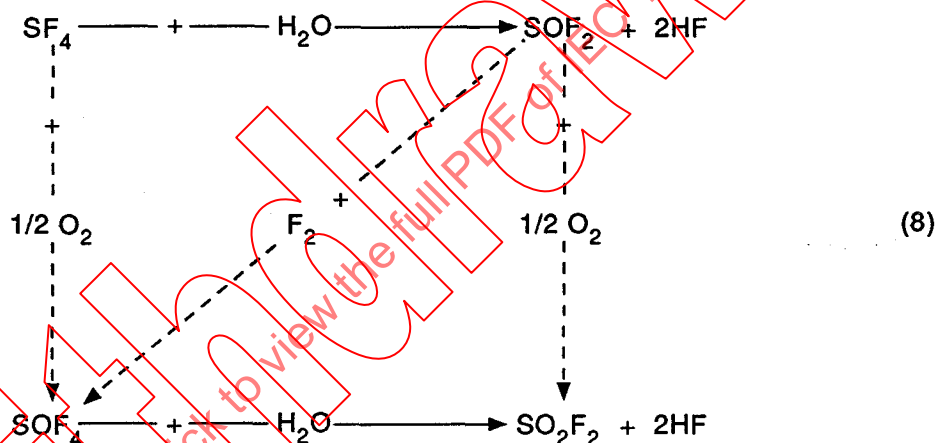
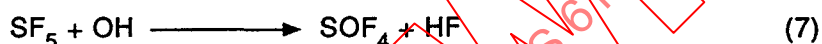
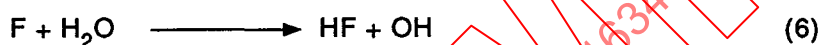
La littérature rapporte d'autres réactions: des sous-produits complémentaires de réaction à l'arc comme le S_2F_{10} peuvent se former. Toutefois, la quantité de S_2F_{10} produite en conditions d'arc est extrêmement faible, étant donné que les radicaux SF_5 produits à haute température ne forment du S_2F_{10} que s'ils sont refroidis très rapidement, situation qui ne peut guère se rencontrer dans l'arc [25].

In the presence of oxygen, decomposition products can arise as follows:



It is believed that reactions (2), (3) and (4), involving oxygen released from the electrode materials during arcing, are the principal mechanisms whereby SOF_2 is produced [4, 23, 24]. This is significant as SOF_2 is the main contributor to the toxicity of arced SF_6 (see C.3.2.1).

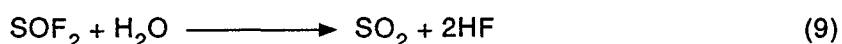
In the presence of water vapour, the following reactions occur:



The broken lines in equation (8) indicate reactions that occur only to a limited degree during SF_6 decomposition in an arc [22]. Whilst the reactions of equation (8) imply the formation of significant quantities of HF, this product has not been reported in large quantities following power arcing in switchgear and controlgear. This is probably because decomposition product formation is mainly according to equations (2), (3) and (4). It is also possible that HF formed by the reactions of equation (8) further reacts with metal vapours to produce metal fluorides.

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

In the continued presence of water, 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 [25].

B.1.2 Décomposition du SF₆ lors des décharges à faible énergie

Lorsque l'équipement contenant du SF₆ fonctionne sous la tension de service, l'éventualité de décharges à faible énergie, telles que l'effet couronne, les décharges d'étincelles ou les décharges partielles, ne peut être ignorée. Cependant, les concentrations des produits de décomposition issus de telles décharges restent vraisemblablement faibles, et ne devraient pas affecter défavorablement le personnel effectuant des travaux de maintenance et des réparations sur les équipements (voir C.4.6). Lorsque le SF₆ est décomposé, suite aux étincelles, les réactions décrites en pointillé dans l'équation (8) prédomineront [22].

B.1.3 Décomposition catalytique du SF₆ (comportement à haute température)

Le SF₆ peut être chauffé jusqu'à 500 °C dans des enceintes en quartz sans se décomposer. Jusqu'à 150 °C environ, les matériaux couramment utilisés comme les métaux, le verre, les céramiques, le caoutchouc et les résines polyester résistent totalement au SF₆. Ce n'est qu'à des températures dépassant 200 °C que certains métaux commencent à avoir un effet de décomposition sur le gaz; mais dans le cas de métaux et alliages habituellement utilisés, les mêmes effets ne sont observés de façon significative qu'à partir de 400 °C à 600 °C [5].

La température maximale de fonctionnement à l'intérieur de l'appareillage au SF₆ en absence d'arc étant très en deçà de ces valeurs, aucune décomposition de SF₆ de ce type n'est à craindre en cours de fonctionnement. Néanmoins, un échappement de gaz résiduel ou une fuite restent inévitables lors de travaux de réparation par exemple. La décomposition peut alors être provoquée par des appareils de chauffage, des moteurs à explosion, ou encore en faisant des feux ouverts, brasant ou soudant à proximité immédiate de l'appareillage contenant le SF₆ [1].

B.2 Comportement corrosif du SF₆ et de ses produits de décomposition

Le SF₆ chimiquement pur est un gaz totalement inerte. Il n'y a, de ce fait, aucune forme de corrosion possible directement liée au SF₆ lui-même. Néanmoins, les produits issus des décompositions primaire et secondaire du SF₆, en présence d'humidité, peuvent former des électrolytes corrosifs qui peuvent endommager certains matériaux utilisés à l'intérieur des équipements.

Les métaux couramment utilisés comme l'aluminium, l'acier, le cuivre et le laiton, ne sont guère attaqués, alors que le verre, la porcelaine, le papier isolant et les matériaux analogues sont plus sensibles aux agressions, selon la concentration des substances corrosives présentes. D'autres matériaux isolants, comme la résine époxy, le polyester, le polyéthylène, l'oxyde de polyméthylène, le PTFE, le PVC, etc., ne sont pas significativement affectés.

Dès la conception des équipements, il est important de tenir compte de l'effet corrosif des produits de décomposition. Il est possible de prévenir la corrosion en éliminant toute humidité et en utilisant des matériaux adéquats.

B.3 Précautions à prendre lors du retrait des produits de décomposition du SF₆

L'humidité et les produits de décomposition du SF₆ présents dans un équipement en fonctionnement peuvent être réduits à des niveaux acceptables par adsorption. Les matières comme l'alumine, la chaux sodée, les tamis moléculaires et autres substances peuvent remplir cette fonction. Ils adsorbent efficacement les substances acides gazeuses de façon pratiquement irréversible et confèrent également au gaz une basse température

B.1.2 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 decomposition products resulting from such discharges are likely to be very low, and personnel involved in maintenance and repair work on such equipment should not be affected adversely (see C.4.6). When SF_6 is decomposed in spark discharges, the reactions shown in broken lines in equation (8) will predominate [22].

B.1.3 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 [5].

Since the maximum operating temperatures inside SF_6 switchgear and controlgear in the absence of arcing are far below these values, no SF_6 decomposition of this kind is to be expected during operation. What cannot be avoided, however, is the escape of residual gas or leakage, for instance during repair work. Decomposition can then be brought about by heaters and internal combustion engines, or by smoking, soldering or welding in the immediate vicinity of the SF_6 switchgear and controlgear [1].

B.2 Corrosion behaviour of SF_6 and its decomposition products

Chemically pure SF_6 is a completely non-reactive gas. There is no possibility therefore that corrosion will be caused directly by the SF_6 itself. However, the primary and secondary decomposition products of SF_6 , on contact with moisture, can form corrosive electrolytes which may cause damage to 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 decomposition products. Corrosion can be prevented by the thorough exclusion of moisture and by using suitable materials.

B.3 Measures for the removal of SF_6 decomposition products

Moisture and SF_6 decomposition products inside equipment in service can be reduced to acceptable levels by adsorption. Material such as alumina, soda lime, molecular sieves or mixtures thereof are suitable for this purpose. They adsorb the gaseous acid products very effectively and practically irreversibly, and at the same time ensure that the gas maintains

de point de rosée [5]. La plupart des équipements électriques utilisent des filtres statiques, mais dans certaines circonstances, comme cela est le cas avec les disjoncteurs, où l'extinction de l'arc provoque la formation de produits de décomposition en concentrations particulièrement élevées, on peut faire circuler le gaz à travers un filtre à l'aide d'une pompe [5, 26].

La destruction des produits de décomposition, après leur retrait d'un équipement, est aisée. Les composés acides (acide sulfurique et fluorure d'hydrogène) sont détruits par des solutions alcalines comme l'hydroxyde de calcium (chaux) pour former du sulfate de calcium ou du fluorure de calcium. Ces derniers, se trouvant à l'état minéral dans la nature, sont connus respectivement sous le nom de gypse et de spath fluoré.

La plupart des produits solides issus de la réaction sont insolubles dans l'eau, ou le sont très difficilement; mais certains fluorures métalliques peuvent réagir en présence d'eau et former de l'acide fluorhydrique. Il est alors nécessaire de traiter, par exemple à l'hydroxyde de calcium (chaux), les produits solides issus de la réaction, afin de neutraliser ses composantes acides. Le dépôt ainsi obtenu pourra alors être éliminé conformément à la réglementation locale.

B.4 Recyclage du SF₆

Le gaz SF₆ peut être récupéré des équipements électriques. Un appareil de recyclage du gaz contaminé permettant de le rendre comme neuf est disponible dans le commerce; mais le gaz contaminé peut aussi être renvoyé chez le fabricant pour être recyclé.

B.5 Caractéristiques physiologiques des produits de décomposition du SF₆

Les produits de décomposition du SF₆ peuvent irriter la peau, les yeux et les muqueuses, notamment les voies respiratoires. En forte concentration, ces produits peuvent provoquer des oedèmes pulmonaires, en cas d'exposition prolongée.

Le SF₆ contenant des produits de décomposition dégage une odeur désagréable, âcre, qui elle-même, présente certains effets irritants. Les seuils olfactifs, en particulier pour le SOF₂, le SO₂ et le HF, sont du même ordre de grandeur que les TLV. Du fait de ces caractéristiques, même de faibles quantités de produits de décomposition gazeux peuvent donner une infaillible indication d'avertissement dans les secondes qui suivent, avant que ne survienne le moindre risque d'empoisonnement [1].

Il convient de prendre les précautions appropriées lors de la manipulation du SF₆ contenant des produits de décomposition et des poudres produites lors des opérations de coupure. A tout instant, il convient de suivre les instructions opératoires pertinentes et celles de prévention des accidents (voir l'annexe E et CEI 480) [27].

a low dewpoint temperature [5]. In most electrical equipment, static filters are used, but in some circumstances, such as circuit breakers where arc quenching can generate decomposition products in particularly high concentrations, the gas may be circulated through a filter by a pump [5, 26].

Disposal of decomposition products removed from equipment is straightforward. The acid components (sulphuric acid and hydrogen fluoride) are degraded by means of alkaline compounds, such as calcium hydroxide (lime) to form calcium sulphate or calcium fluoride. Both these compounds occur as minerals in nature, and are known as gypsum and fluor spar respectively.

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.

B.4 Recycling of SF₆

SF₆ gas can be reclaimed from electrical equipment. Gas handling plant is available commercially which is capable of restoring contaminated gas to its as-new condition, or used gas can be returned to the manufacturer for reprocessing.

B.5 Physiological characteristics of SF₆ decomposition products

SF₆ decomposition 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 decomposition 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 decomposition products may give rise to unmistakable warning indications within a matter of seconds, before any risk of poisoning can arise [1].

Care should be taken when handling SF₆ containing decomposition products and the powders produced by switching operations. The pertinent operating instructions and accident prevention instructions should be followed at all times (see annex E and IEC 480) [27].

Annexe C (informative)

Echappement du SF₆ de l'appareillage – Effets potentiels sur la santé

C.1 Introduction

Cette annexe étudie les risques pour la santé provoqués par du SF₆ s'échappant dans l'atmosphère locale, suite à une fuite pendant le service normal et dans le cadre d'un défaut interne. Le cas du SF₆ s'échappant pendant les opérations de maintenance n'est pas traité dans la présente annexe de façon spécifique, mais les principes qui y sont énoncés peuvent être appliqués pour étudier, si nécessaire, ce type de situation.

Dans l'appareillage en service normal, le gaz SF₆ y reste enfermé, et ses produits de décomposition sont neutralisés par des tamis moléculaires, ainsi que par le processus de recombinaison naturelle. Le SF₆ peut apparaître dans l'atmosphère à cause d'une fuite ou si les enveloppes ne peuvent plus contenir le gaz, comme par exemple dans l'éventualité peu probable d'un défaut interne. Il est nécessaire, lors de l'étude des risques pour la santé, de différencier clairement les fuites se produisant dans des conditions normales, et les défauts internes pouvant provoquer un échappement soudain de SF₆.

Dans le cas d'une fuite, il est nécessaire de prendre en compte les effets d'une exposition prolongée aux produits de décomposition gazeux du SF₆. La concentration de ces produits dans l'air doit rester suffisamment faible pour ne présenter aucune menace pour les personnes non protégées pendant une période normale de travail, par exemple de 8 h.

Dans le cas d'un échappement soudain de SF₆ dû à un arc interne, les procédures d'évacuation obligatoire et de ventilation impliquent une exposition momentanée du personnel aux produits de décomposition. Une concentration de produits de décomposition supérieure à la concentration maximale admise pour une exposition, par exemple, de 8 h, peut être tolérée si le temps d'exposition est considérablement réduit. Il est donc clair que dans de tels cas il convient de tenir compte de toutes les sources possibles d'émanations toxiques, ce qui nécessite de connaître en détail tous les produits formés. Pour cela, une étude complète doit considérer à égalité les contributions à la toxicité dues au SF₆ et celles dues aux vapeurs de métal, de plastique, d'isolants de câbles, de peinture, etc.

NOTE – Par exemple, en comparant les limites d'exposition de longue durée, les vapeurs de cuivre issues de la vaporisation des électrodes sont environ quatre fois plus toxiques que le SF₆ soumis à un arc (SOF₂), alors que les vapeurs d'aluminium le sont environ quatre fois moins. Les deux peuvent se former en quantités importantes dans tous les cas où un arc électrique se produit, quel que soit le milieu d'isolement employé, et peuvent constituer le risque majeur pour la santé (voir C.4.7.2). La contribution des vapeurs issues de la combustion des plastiques (voir C.4.7.3) est aussi très significative.

Le premier objectif de la présente annexe est de fournir les conseils de base pour évaluer la concentration dans l'air des produits de décomposition toxiques du SF₆ dans un milieu où du SF₆ s'est échappé. Les effets d'autres produits potentiellement toxiques échappés dans des situations de défaut seront aussi pris en compte.

Annex C (informative)

Release of SF₆ from switchgear and controlgear – Potential effects on health

C.1 Introduction

This annex examines the risks to health due to SF₆ released into the local atmosphere by leakage during normal service and in the event of an internal fault. Release of SF₆ during maintenance is not specifically treated but the principles established here can be applied to studying these situations if necessary.

During normal service the SF₆ gas remains inside the switchgear and controlgear and the decomposition 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 enclosure fails to contain the gas, for example in the unlikely case of an internal fault. It is necessary to differentiate clearly between normal leakage conditions and internal fault situations leading to a sudden release of SF₆, when evaluating health risk.

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

In the case of a sudden release of SF₆ due to an internal fault, mandatory evacuation and ventilation procedures imply a momentary exposure. Decomposition product concentrations of higher levels than would be tolerable during, for example, 8 h can be tolerated if the exposure time is considerably reduced. Clearly in this case account should be taken of all possible sources of toxic emanations and this requires detailed knowledge of all of the products formed. In this respect a full treatment shall consider contributions from metal vapour, burnt plastics, cable insulation, paint, etc., on an equal footing to those attributable to the SF₆.

NOTE – For example, by comparison of long-term exposure limits, copper fumes from vaporised electrodes are about four times as toxic as arc-decomposed SF₆ (SOF₂) whilst aluminium fumes are about four times less. Both can be produced in large quantities in any incident where electrical arcing occurs, regardless of the insulation medium employed, and may constitute the major risk to health (see C.4.7.2). The contribution of fumes from the combustion of plastics (see C.4.7.3) is also highly significant.

The first aim of this annex is to lay out the basic guidelines for estimating the concentrations of toxic SF₆ by-products in the air in an environment into which SF₆ has been released. The effects of other potentially toxic substances released under fault conditions are also considered.

Les conclusions générales pour les différentes situations intéressantes sont:

Fuite: Il n'y a aucun risque pour la santé, car les concentrations de produits toxiques significatifs restent à un niveau négligeable, très en dessous des seuils établis pour une exposition prolongée.

Situations anormales: L'étude de cas des situations de défaut interne non contrôlé dans une enveloppe remplie au SF₆, provoquant le fonctionnement du dispositif de décharge de pression ou la perforation de l'enveloppe, montre que les concentrations des produits de décomposition du SF₆ demeurent en dessous des limites établies pour une exposition momentanée.

C.2 Vue d'ensemble

On présente des méthodes de calcul des risques liés à la présence dans l'atmosphère de produits de décomposition du SF₆ à la suite de fuites ou défauts internes. Les principes adoptés pour effectuer ces calculs sont présentés dans l'article C.3. Des études de cas de fuites et de défaut interne sont présentées dans l'article C.4. Les implications de ces résultats sont commentées dans l'article C.5, et les conclusions dans l'article C.6.

Chacune des études de cas de l'article C.4 comporte la présentation de la méthode de calcul à l'aide de données représentant l'installation concernée. Les données employées sont sélectionnées à partir de représentations d'installations d'appareillages typiques présentés à l'article C.7. Les limites d'exposition aux substances toxiques sont traitées à l'article C.8.

C.2.1 Cas de fuites

Les paragraphes C.4.5 et C.4.6 présentent les études des cas de fuites suivants:

- disjoncteurs ayant coupé des courants de défaut normaux. Les exemples utilisés sont ceux d'installations à haute et moyenne tension. On considère les effets des transformations ultérieures par hydrolyse des produits de décomposition formés au cours de l'arc;
- matériels dans lesquels des décharges à faible énergie (décharge partielle, décharge par effet couronne et décharge par étincelle) se sont produites. Les effets du produit de décomposition à haute toxicité S₂F₁₀ sont traités.

C.2.2 Cas de défaut interne

Le paragraphe C.4.7 présente des études des cas de défaut interne:

Cinq installations différentes sont étudiées. On considère les effets des gaz et des vapeurs émis, ainsi que les produits de décomposition du SF₆, les vapeurs métalliques et les vapeurs émises par les matières plastiques.

C.3 Formation et effets sur la santé des produits de décomposition du SF₆

C.3.1 Formation des produits de décomposition du SF₆

Lors de la formation d'arcs de puissance dans du SF₆, les températures peuvent atteindre, au coeur de l'arc, une valeur de l'ordre de 10 000 K [28]. A ces températures, les molécules du gaz sont totalement désintégrées en leurs atomes constitutants; le soufre et le fluor

The general conclusions for the various situations of interest are:

Leakage: There is no risk to health because concentrations of the significant toxic components remain at negligible levels, well below established long-term exposure limits.

Abnormal situations: Case studies of internal fault situations involving uncontrolled arcing inside an SF₆ enclosure, engendering burn-through or pressure relief, show that the concentrations of SF₆ arc decomposition products remain below substantiated limits for momentary exposure.

C.2 Overview

Methods are presented for calculating the risks associated with the presence of SF₆ decomposition products in the atmosphere due to leakage and to internal fault. The principles adopted for performing the calculations are presented in clause C.3. Case studies for leakage and internal fault situations are presented in clause C.4. The implications of the results are discussed in clause C.5 and conclusions are presented in clause C.6.

Each case study in clause C.4 includes a presentation of the calculation method used and the results of performing the calculation using data representing an appropriate installation. The data used are selected from representations of typical switchgear and controlgear installations presented in clause C.7. Exposure limits for toxic substances are introduced in clause C.8.

C.2.1 Leakage situations

Subclauses C.4.5 and C.4.6 present case studies for the following leakage situations:

- circuit-breakers which have interrupted normal fault current. High-voltage and medium-voltage installations are used as examples. Consideration is given to the effects of further transformation, by hydrolysis, of the decomposition products formed during arcing.
- equipment in which low-energy discharges (partial discharge, corona discharge and spark discharge) have occurred. The effects of the highly toxic decomposition product S₂F₁₀ are considered.

C.2.2 Internal fault situations

Subclause C.4.7 presents case studies for internal fault situations:

- Five different installations are studied. The effects of the gases and vapours emitted are considered including SF₆ decomposition products, metal vapours, and vapours emitted by plastic materials.

C.3 Formation and health effects of SF₆ decomposition products

C.3.1 Formation of SF₆ decomposition products

During high power arcing in SF₆ the arc core reaches temperatures of the order of 10 000 K [28]. At these temperatures the molecules of the gas are completely broken down into their parent atoms, sulphur and fluorine (see B.1.1), [16, 29]. Any impurities

(voir B.1.1), [16, 29]. Toute impureté présente, telle que la vapeur d'eau ou l'air, se dissocie de la même manière. Ainsi il se crée localement une zone ne contenant que des atomes libres: S, F, H, N, O et divers ions. L'échauffement des électrodes par les racines de l'arc crée des vapeurs de cuivre, de tungstène, de graphite et/ou d'aluminium qui s'ajoutent à cette atmosphère.

Après extinction de l'arc, ou dans les zones qui commencent à refroidir, la recombinaison de ces atomes débute pour reformer principalement du SF_6 . Cependant, des réactions chimiques se produisent avec les impuretés présentes, en particulier la vapeur d'eau, formant ainsi les produits de décomposition de l'arc, (voir annexe B) [4, 30, 31]. La quantité formée dépend directement de l'énergie électrique dissipée par la décharge.

Les produits de décomposition les plus fréquemment rencontrés sont: SOF_2 , SO_2 , HF, et aussi CF_4 , SF_4 , et SO_2F_2 [31]. L'existence de ces produits de décomposition ne revêt d'importance que s'ils s'échappent dans l'atmosphère locale. Leurs concentrations à l'intérieur des appareillages n'ont pas d'importance significative en elles-mêmes, surtout puisque la présence d'adsorbants (par exemple un filtre moléculaire) a tendance à purifier le gaz.

Pendant un certain temps, l'on pensait que le produit de décomposition gazeux S_2F_{10} , très toxique, pourrait être un facteur majeur de la toxicité du SF_6 soumis à un arc. Néanmoins, des expérimentations effectuées lors des cinq dernières années montrent que cette idée n'est pas confirmée [32, 33]. En fait, il apparaît maintenant que le S_2F_{10} est formé en quantité si faible que sa contribution à la toxicité globale du SF_6 est négligeable.

On sait en outre que le S_2F_{10} se forme lors de décharges à faible énergie dans le SF_6 , et que, dans ces conditions, les taux de formation de S_2F_{10} sont plus importants [34, 35, 36, 37] qu'au cours d'un arc. Toutefois, la quantité de S_2F_{10} décroît en présence d'humidité [36, 38] et aux températures supérieures à 200 °C. La forte toxicité de ce produit, à des concentrations qu'il était jusqu'à présent difficile de détecter, a conduit à des investissements considérables en recherche, afin d'évaluer les risques potentiels liés à sa présence [25]. Cependant, le S_2F_{10} décroît en présence d'humidité [36, 38], à des températures supérieures à 200 °C, et à température ambiante par décomposition catalytique avec les parois. Ce dernier mécanisme est tellement efficace que le S_2F_{10} généré dans l'appareillage est réduit à une quantité négligeable [59].

C.3.2 Effets des produits de décomposition du SF_6 sur la santé

Si le SF_6 après avoir été soumis à un arc ou à des décharges de faible énergie, s'échappe dans le local de travail, le risque potentiel pour la santé dépendra de la concentration dans l'air de chaque produit de décomposition, et donc, du volume de la salle d'appareillage. Il convient que l'évaluation de la toxicité prenne en compte la concentration de chacune des substances présentes, en fonction des concentrations admises pour des temps d'exposition correspondants.

C.3.2.1 Effets sur la santé du SF_6 décomposé suite à un arc

Pour des mélanges de plusieurs substances, les toxicologues définissent trois cas généraux [39]:

- chaque composant agit de manière différente, ou sur des organes-cibles différents; de ce fait, les effets ne sont pas cumulatifs et chaque composant est traité séparément;
- les composants agissent de façon similaire sur les mêmes organes-cibles; leurs effets sont alors cumulatifs et les calculs devront en tenir compte;

present, such as air or water vapour, 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 by the arc roots adds vapours of copper, tungsten, graphite and/or aluminium to this atmosphere.

After arc extinction or in regions where cooling commences, these atoms start to bind together again and reform mainly SF_6 . However, chemical reactions take place with the impurities present and in particular with water vapour, giving rise to the so-called arc decomposition products, (see annex B) [4, 30, 31]. The quantities formed are directly related to the electrical discharge energy.

The most frequently encountered by-products are: SOF_2 , SO_2 , HF and also CF_4 , SF_4 and SO_2F_2 [31]. The existence of these by-products is of importance only if they enter the local atmosphere. Their concentrations inside the switchgear and controlgear are of no direct significance, especially since the presence of adsorbents (such as molecular sieves) will tend to purify the gas.

For some time there were concerns that the highly toxic gaseous by-product S_2F_{10} might constitute a major contributor to the toxicity of SF_6 in which arcing has occurred. However over the past five years experiments show that this idea is not substantiated [32, 33]. In fact S_2F_{10} appears now to be formed in such minute quantities during arcing as to contribute negligibly to the overall toxicity of the SF_6 .

It is also known that S_2F_{10} is formed by low-energy electrical discharges in SF_6 and that under these conditions, higher S_2F_{10} production rates are encountered [34, 35, 36, 37] than during arcing. However, S_2F_{10} decays in the presence of moisture [36, 38] and at temperatures exceeding 200 °C. The high toxicity of this compound, at concentrations that until recently were difficult to detect, has prompted considerable investment in research into the potential risks associated with its presence [25]. However, S_2F_{10} decays in the presence of moisture [36, 38], at temperatures exceeding 200 °C, and at ambient temperature by catalytic wall decomposition. The last mechanism is so efficient that the S_2F_{10} generated in equipment is reduced to a negligible quantity [59].

C.3.2 *Effects of SF_6 decomposition products on health*

If SF_6 , 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 decomposition product in the air, and hence on the switchgear and controlgear room volume. Toxicity estimations should take account of the concentration of each component present in terms of the permissible concentrations for appropriate exposure times.

C.3.2.1 *Health effects of arc decomposed SF_6*

For multi-component mixtures, toxicologists define three general cases [39]:

- each component acts in a different manner, or on different target organs; the effects are hence not cumulative and each component is treated separately;
- the components act in a similar manner on the same target organs; their effect is thus cumulative and calculations will take this into account;

- les effets d'un composant particulier l'emportent largement sur ceux des autres, la toxicité globale peut alors être estimée, en étudiant la concentration de ce seul élément.

Une étude de la plupart des travaux menés au cours des 18 dernières années sur la décomposition du SF_6 soumis à un arc de forte puissance (d'après les références [4, 30, 31, 60] par exemple) permet d'établir la conclusion suivante:

- la toxicité du SF_6 soumis à un arc est dominée dans un premier temps par un composant spécifique, le gaz fluorure de thionyle, SOF_2 .

Cette conclusion justifie l'adoption de ce qui suit:

- Il convient d'évaluer le risque global pour la santé du personnel, dû au SF_6 décomposé à la suite d'un arc, en utilisant la concentration de SOF_2 généré.

Dans le présent rapport, le produit de décomposition SOF_2 est utilisé comme indicateur, pour évaluer la toxicité globale du SF_6 décomposé à la suite d'un arc. Cela permettra d'estimer les risques pour la santé dans différentes situations, et de dégager les implications pour les procédures de sécurité.

L'hydrolyse du SOF_2 peut avoir lieu en présence d'importantes concentrations de vapeur d'eau, avec production de SO_2 et de HF (voir B.1.1). Les risques que présente l'exposition à ce mélange, sans tenir compte du fait que le HF reste rarement très longtemps présent dans l'atmosphère en raison de sa forte réactivité, sont légèrement plus élevés que ceux du SOF_2 , comme exposé en C.4.5.1. Cela est pris en compte lors de l'évaluation des risques liés aux fuites, cas dans lesquels il peut s'écouler un temps suffisant pour que se produise une réaction d'hydrolyse, que ce soit à l'intérieur du matériel ou dans l'atmosphère. On peut négliger l'hydrolyse du SOF_2 dans le cas des défauts internes, étant donné qu'il ne s'écoule que peu de temps entre l'apparition du défaut et la ventilation et les travaux de réparation qui s'ensuivent.

C.3.2.2 Effets sur la santé du SF_6 décomposé par les décharges à faible énergie

Lors de décharges à faible énergie, le produit de décomposition S_2F_{10} peut se former, même si ce n'est qu'en très faibles quantités. C'est là le produit de décomposition du SF_6 le plus toxique que l'on connaisse. C'est pourquoi il est également pris en compte dans l'évaluation des risques dus aux fuites des matériels à haute tension. La part de toxicité des autres produits de décomposition tels que le SOF_2 , le SO_2 et le HF est négligeable dans le SF_6 décomposé par des décharges à faible énergie, et ces produits ne sont donc pas pris en compte.

C.3.2.3 Durée d'exposition et dilution dans l'air

Les deux notions clés essentielles à toute évaluation de risque pour la santé dû aux substances toxiques sont:

- a) la dilution dans le milieu environnant;
- b) le temps d'exposition.

La première notion est nécessaire pour permettre la conversion de la concentration des produits de décomposition formés à l'intérieur de l'appareillage, en un niveau de concentration dans l'atmosphère des locaux de travail (voir note).

- one component largely outweighs the contribution of the others; the overall toxic effect can be estimated by studying the concentration of this component alone.

A survey of the majority of work carried out over the last 18 years on high power arc decomposition of SF_6 (from, for example [4, 30, 31, 60]) allows the following conclusion to be drawn:

- the toxicity of arc decomposed SF_6 is dominated initially by one specific component, the gas thionyl fluoride SOF_2 .

This conclusion justifies the adoption of the following:

- the overall health risk to personnel, due to arc decomposed SF_6 , should be estimated using the SOF_2 concentrations generated.

In this report the by-product SOF_2 is used as the indicator of the overall toxic effect of arc decomposed SF_6 . This allows the health risk in various situations to be assessed together with the implications to safety procedures.

Hydrolysis of the SOF_2 may occur in the presence of significant concentrations of water vapour, producing SO_2 and HF (see B.1.1). The risks of exposure to such a mixture, neglecting that HF is unlikely to remain in the atmosphere for long periods because of its high reactivity, are slightly higher than for SOF_2 , as detailed in C.4.5.1. This is taken into consideration when assessing the risks due to leakage, where sufficient time may elapse for the hydrolysis reaction to occur, either inside the equipment or in the atmosphere. Hydrolysis of SOF_2 may be neglected for internal fault situations where the time between the fault and subsequent ventilation and repair work is short.

C.3.2.2 *Health effects of SF_6 decomposed by low-energy discharges*

During low-energy discharges, the decomposition product S_2F_{10} may be formed albeit in very small quantities. It is the most toxic decomposition product of SF_6 known; for this reason it is also considered in the assessment of the risks due to leakage from high-voltage equipment. The contributions to toxicity of other decomposition products such as SOF_2 , SO_2 and HF are negligible in SF_6 which has been decomposed by low-energy discharges, so these products are not considered.

C.3.2.3 *Exposure duration and dilution in air*

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

- a) dilution into the surrounding volume;
- b) time duration of exposure.

The first notion is required to enable the conversion from the concentration of decomposition products formed inside the switchgear and controlgear, into a concentration level in the workplace atmosphere (see note).

La deuxième notion permettra de déterminer la méthode d'évaluation du risque potentiel pour la santé, applicable soit pour des conditions normales de service (fuite), soit pour des conditions anormales (défaut interne).

Dans des conditions normales, il convient que la concentration de TLV (Treshold Limit Value), définie comme étant une limite pour un temps d'exposition moyen de 8 h, soit utilisée (voir C.8.1). Cela assure la sécurité des personnes travaillant à plein temps à proximité de l'appareillage au SF₆.

Lors d'une situation anormale, le personnel quitte la salle d'appareillage en quelques minutes, la période d'exposition est donc momentanée. Dans ce cas, une concentration très supérieure à la valeur de TLV habituelle peut être tolérée (voir C.4.2).

NOTE - Par exemple, une concentration alarmante de produit de décomposition de 1 000 ppm volume (ppmv) générée dans une enveloppe expérimentale de 1 l, atteindra la valeur très faible de 0,04 ppmv une fois libérée dans une pièce de 3m x 3m x 2,5m.

C.4 Calcul des concentrations des produits de décomposition

Les méthodes et les résultats des calculs, donnant la concentration des produits de décomposition gazeux du SF₆ soumis à un arc, dans l'atmosphère de la salle d'appareillage, sont présentés ci-après pour différents types d'installation. Les contributions des autres sources de risques qui se présentent lors d'un défaut interne, comme les fumées, les émanations ou les vapeurs, ont également été évaluées.

Dans le cas d'une fuite, les quantités de SOF₂ et de S₂F₁₀ libérées en 24 h sont prises en compte. Il est supposé qu'aucun gaz ne s'échappe de la salle d'appareillage. Les effets de l'hydrolyse du SOF₂ sont pris en compte.

Dans les cas d'arc interne, tout le SOF₂ formé est considéré comme s'échappant rapidement dans l'atmosphère environnante et est considéré comme stable pendant la période de temps concernée.

Pour le cas de maintenance de l'appareillage, spécifique aux équipements haute tension, des conseils sont donnés dans la section 4 et en F.4.1. Dans de telles situations, les procédures de travail nécessitent de récupérer tout le SF₆ avant l'ouverture de l'appareillage.

C.4.1 Critères de calcul

Les critères suivants ont été retenus au cours de cette étude, aussi bien pour le cas de fuites que pour celui de défaut interne:

- La salle d'appareillage est supposée être fermée, et la ventilation est supposée être inactive, pendant la période concernée.
- Les adsorbants de produits de décomposition issus de l'arc, installés à l'intérieur de l'appareillage, sont supposés être inactifs, pendant la période concernée.
- Le gaz échappé est supposé se mélanger uniformément avec l'air de la salle d'appareillage en un temps relativement court par rapport à une journée de travail ou à la durée d'exposition.

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

Under normal conditions the TLV (Threshold Limit Value) concentration, defined as an 8 h average exposure limit, should be employed (see C.8.1). This ensures the security of those working full time in the vicinity of the SF₆-filled switchgear and controlgear.

Under abnormal conditions, workers leave the switchgear and controlgear room within a few minutes and the exposure is hence momentary. For this type of exposure, very much higher concentrations than the TLV can be tolerated (see C.4.2).

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

C.4 Calculation of decomposition product concentrations

The following presents the methods and results of calculations giving the concentrations of gaseous SF₆ decomposition products in the switchgear and controlgear room atmosphere for various types of installation. The contributions of other sources of risk, which arise during an internal fault, such as smokes, fumes and vapours, have also been assessed.

For the case of leakage, the quantities of SOF₂ and S₂F₁₀ leaked during 24 h are considered. It is assumed that no gas escapes from the switchgear and controlgear room. The effects of hydrolysis of SOF₂ are considered.

For the internal fault situations all of the SOF₂ formed is considered to be emitted rapidly into the surrounding atmosphere and is considered to be stable during the time period of interest.

For the case of switchgear and controlgear maintenance, particular to high-voltage equipment, guidance is given in section 4 and in F.4.1. In such situations working procedures require the recovery of all the SF₆ before opening the switchgear and controlgear.

C.4.1 Calculation criteria

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

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

C.4.2 Evaluation du risque

C.4.2.1 Cas de fuites

Les résultats des calculs pris en exemple donnent les concentrations C de SOF_2 (voir C.4.5) et de S_2F_{10} (voir C.4.6) dans l'air de la salle d'appareillage. Il convient de comparer chaque valeur de C avec la concentration permise pour un travail à plein temps (TLV), (voir C.8.1). Le résultat final de chaque calcul est exprimé sous la forme d'un rapport C/TLV . Ce rapport doit être inférieur à l'unité pour que les risques soient considérés comme négligeables et que le travail à temps plein soit autorisé.

Dans le cas de l'hydrolyse du SOF_2 (voir C.4.5.1), les concentrations de SO_2 et de HF sont calculées. On considère que le HF et le SO_2 ont des effets similaires sur l'organisme humain (voir note), et, pour un mélange multi-composants de cette nature, il convient que la somme R_{tot} des rapports individuels de concentration aux TLV ne dépasse pas l'unité [39].

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

Les TLV des quatre composés concernés sont donnés dans le tableau C.1 [39, 41, 42]:

Tableau C.1 – TLV des quatre produits de décomposition

	SOF_2	SO_2	HF	S_2F_{10}
TLV (ppmv)	1,6	2	3	0,01

NOTE – Il s'agit là d'une supposition prudente, qui a pour résultat la concentration maximale autorisée de chaque composant inférieure au TLV. Elle est adoptée ici afin de simuler un cas très pessimiste.

C.4.2.2 Cas d'arcs internes

Pour ces cas anormaux, les concentrations de SOF_2 sont très supérieures à celles liées aux fuites, puisque tout le SF_6 s'est échappé dans un intervalle de temps court. Les procédures habituelles imposent l'évacuation et la ventilation de la salle d'appareillage. L'exposition au SF_6 décomposé par l'arc devrait donc être momentanée. Pour cette raison, la comparaison de la concentration de SOF_2 avec le TLV n'est plus appropriée (voir C.8.1).

En général, la valeur IDLH (Immediate Danger to Life and Health) fournit une indication pour une exposition de courte durée (voir C.8.2). Il n'y a cependant pas de valeur IDLH publiée pour le SOF_2 . Il est donc nécessaire de se tourner vers les résultats de données toxicologiques (voir note), pour établir une valeur de référence pour une exposition momentanée non répétitive (C_m).

$C_m = 500 \text{ ppm volume (ppmv)}$ (voir note)

Les concentrations de SOF_2 calculées sont à comparer à C_m , pour évaluer les risques pour la santé dus aux produits de décomposition du SF_6 , pendant ou après un défaut interne. D'autres facteurs, pouvant être plus significatifs, doivent être pris en compte lors de l'évaluation des risques et de la définition des procédures de sécurité (voir C.4.7.2 et C.4.7.3).

C.4.2 Risk evaluation

C.4.2.1 Leakage situations

The results of the example calculations give the concentrations C of SOF_2 (see C.4.5) and of S_2F_{10} (see C.4.6) in the switchgear and controlgear room air. Each value of C should be compared with the concentration permitted for full-time work, (TLV), (see C.8.1). The final result of each calculation is expressed as a ratio C/TLV ; this must have a value of less than unity for there to be no significant risk and for full-time working to be permitted.

For the case of SOF_2 hydrolysis (see C.4.5.1), the concentrations of SO_2 and HF are calculated. HF and SO_2 are considered to have a similar effect on the human organism (see note) and for such a multi-component mixture, the sum R_{tot} of the individual ratios of concentration to TLV should not exceed unity [39].

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

The TLVs for the four compounds of interest are given in table C.1 [39, 41, 42]:

Table C.1 – TLVs for the four compounds

	SOF_2	SO_2	HF	S_2F_{10}
TLV (ppmv)	1,6	2	3	0,01

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

C.4.2.2 Internal fault situations

For these abnormal cases the SOF_2 concentrations are much higher than for leakage because all of the SF_6 is released in a short period of time. Standard procedures impose evacuation and ventilation of the switchgear and controlgear room. The exposure to arc decomposed SF_6 should therefore be momentary. For this reason, comparing a calculated SOF_2 concentration with the TLV is no longer appropriate (see C.8.1).

In general, an IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health) value provides guidance for short-term exposure (see C.8.2). There is however no published IDLH value for SOF_2 . It is therefore necessary to turn to the results of toxicological data (see note) in order to obtain a reference value for non-repetitive momentary exposure (C_m).

$C_m = 500$ ppm by volume (ppmv) (see note)

The calculated SOF_2 concentrations are compared with C_m to assess the risks to health due to SF_6 decomposition products during or following an internal fault. Other factors which may be more significant shall be considered in risk assessment and in the appraisal of safety procedures (see C.4.7.2 and C.4.7.3).

NOTE – Des données toxicologiques existent pour l'exposition d'animaux à des atmosphères contenant du SF_2 [40, 41], et couvrent les effets d'une exposition de 1 h pour trois espèces distinctes de mammifères, pour des concentrations allant jusqu'à plusieurs milliers de ppmv de SF_2 . Les résultats montrent que, pour une exposition à des concentrations jusqu'à 100 ppmv (souris et rats) et 500 ppmv (lapins), tous les animaux présentent un état général apparemment normal [40], 24 h après la période d'exposition.

Pour l'homme, une exposition à des concentrations supérieures à 500 ppmv pendant 1 h devrait être supportable, les organismes plus gros étant généralement moins sensibles aux agents toxiques. On peut donc en déduire que l'utilisation d'une concentration limite d'exposition momentanée C_m de 500 ppmv comme valeur de référence à comparer aux concentrations calculées est acceptable.

C.4.3 Limites de calculs pour les cas de l'arc interne

C.4.3.1 Locaux de très faible volume

Dans ce cadre, comme, par exemple, lors d'un arc interne dans un poste MT/BT, le risque principal pour la santé ne provient pas des produits de décomposition du SF_6 soumis à un arc. L'arc lui-même, le souffle des gaz chauds, la fumée, les vapeurs de peintures brûlées, les vapeurs plastiques ou métalliques, et finalement l'onde de choc, constituent probablement les risques majeurs (voir C.4.7.2 et C.4.7.3).

L'extrapolation des résultats à des locaux nettement inférieurs à 50m^3 ne constitue plus, dès lors, un procédé valable pour évaluer les risques pour la santé. Un exemple de calcul pour des locaux d'un volume inférieur à 50m^3 a néanmoins été inclus, afin d'évaluer la contribution du SF_2 à la toxicité globale.

C.4.3.2 Très longue durée d'arc

Pour tous les calculs liés à l'arc interne, on suppose que l'environnement de l'arc reste constant, conduisant à un taux constant de formation de SF_2 pour un arc d'une durée de 100 ms (voir C.7.3.2). Pour des temps d'arc supérieurs à 100 ms, l'hypothèse d'un taux constant de formation des produits de décomposition ne sera vraisemblablement plus valable, pour les raisons ci-dessous.

Défaut interne dans les disjoncteurs moyenne et haute tension et dans l'appareillage de coupure d'artère

Dans ce cas, un percement ou une ouverture de l'enveloppe libérera rapidement le gaz dans l'atmosphère. La brusque élévation de pression induite par l'arc tendra à vider le SF_6 en une fraction de seconde, mais l'arc continuera à brûler dans les vapeurs métalliques formées par l'évaporation des électrodes. Il est clair que seule une fraction de l'énergie totale de l'arc est employée à la formation des produits de décomposition du SF_6 . Des expérimentations plus détaillées sont nécessaires pour permettre l'extrapolation au-delà de 100 ms.

Percement de l'enveloppe d'appareillages de type GIS (haute tension)

Dans ces situations, une quantité importante de vapeur métallique est produite, et une réaction exothermique a lieu entre le SF_6 et les électrodes en aluminium. L'environnement de l'arc sera profondément modifié, ne justifiant plus l'utilisation d'un taux constant de formation des produits de décomposition.

C.4.4 Cas étudiés

Dix situations représentatives ont été étudiées:

- a) Fuite d'un disjoncteur moyenne tension après trois coupures consécutives d'un courant de défaut triphasé de 31,5 kA (voir la CEI 56, séquence d'essai 4).

NOTE – Toxicological data exist for exposure of test animals to atmospheres containing SF_6 [40, 41], covering the effects of 1 h exposure of three distinct mammal species to concentrations of up to several thousand ppmv of SF_6 . The results show that for exposure to concentrations of up to 100 ppmv (mice and rats) and 500 ppmv (rabbits), all animals exhibit an apparently normal general state [40], 24 h after the exposure period.

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

C.4.3 Calculation limits for cases of internal fault

C.4.3.1 Very small room volumes

In these situations, such as for an internal fault in a MV/LV substation, the main health risk is not that due to SF_6 arc by-products. The arc itself, the hot gas blast, the smoke, the fumes from burnt paint, plastics or metal vapours and finally the shock wave, probably constitute the major risks (see C.4.7.2 and C.4.7.3).

Extrapolation to room volumes much smaller than about 50 m^3 is hence probably not a valid procedure for estimating health risks. An example calculation using a smaller room volume than 50 m^3 has nevertheless been included to allow the SF_6 contribution to the overall toxicity to be estimated.

C.4.3.2 Very long arcing times

For all internal fault calculations a constant environment for the arc is assumed, leading to a constant SF_6 production rate, during an arcing time of 100 ms (see C.7.3.2). The constant production rate will almost certainly not be valid for arcing times above about 100 ms, as explained below:

Internal fault in medium- and high-voltage circuit-breakers and in Ring Main Units (RMU)

In these cases, burn-through or venting will rapidly open the enclosure to the atmosphere. The high, arc-induced, pressure rise will tend to empty most of the SF_6 in a fraction of a second but the arc will remain burning mainly in the metal vapour formed by evaporation of the electrodes. Clearly, only a fraction of the total arc energy goes to SF_6 by-product formation. Experimental work is thus needed to enable extrapolation above about 100 ms.

GIS burn-through (high-voltage)

In these situations, a significant quantity of metallic vapour is formed and an exothermic reaction takes place between the SF_6 and the aluminium electrodes. The arcing environment will be profoundly modified and the use of a constant by-product production rate may not be justifiable.

C.4.4 Situations studied

Ten representative situations have been studied as follows:

- a) Leakage from a medium-voltage circuit-breaker after three consecutive interruptions of a 31,5 kA three-phase fault current (see IEC 56, test duty 4).

- b) Fuite d'un disjoncteur haute tension après trois coupures consécutives d'un courant de défaut triphasé de 31,5 kA (voir la CEI 56, séquence d'essai 4).
- c) Fuite d'une enveloppe haute tension dans laquelle des décharges partielles se sont produites pendant une période de 30 ans.
- d) Fuite d'une enveloppe haute tension dans laquelle des décharges par effet couronne se sont produites pendant une période de 30 ans.
- e) Fuite d'un sectionneur haute tension dans lequel des étincelles se sont produites 200 fois par an pendant une période de 30 ans
- f) Défaut interne, entraînant le fonctionnement du dispositif de décharge de pression, ou provoquant un percement de l'enveloppe dans un jeu de barre de GIS de 245 kV à 40 kA (défaut monophasé).
- g) Défaut interne, entraînant le fonctionnement du dispositif de décharge de pression, ou provoquant un percement de l'enveloppe dans un jeu de barre GIS de 145 kV à 31,5 kA (défaut impliquant deux arcs phase-phase).
- h) Défaut interne, entraînant le fonctionnement du dispositif de décharge de pression, ou provoquant un percement de l'enveloppe dans un équipement de GIS moyenne tension à 25 kA (défaut monophasé).
- i) Défaut interne, entraînant le fonctionnement du dispositif de décharge de pression, dans un disjoncteur moyenne tension à 25 kA (défaut monophasé).
- j) Défaut interne, entraînant le fonctionnement du dispositif de décharge de pression, dans un RMU moyenne tension à 16 kA (défaut impliquant deux arcs phase-phase).

C.4.5 Détermination des concentrations dues aux fuites de SOF_2 des disjoncteurs.

Seules les fuites de disjoncteurs sont prises en compte ici, parce que le degré de décomposition du SF_6 dans les disjoncteurs est plus élevé que dans d'autres types d'équipement.

La concentration, dans la salle d'appareillage, du produit de décomposition gazeux de référence, le SOF_2 , est calculée dans le cas d'un disjoncteur qui vient de couper un courant de défaut triphasé, trois fois de suite (conformément à la séquence d'essai 4 de la CEI 56), et qui présente une fuite de SF_6 , contenant donc des produits de décomposition. La quantité de SOF_2 ayant échappé pendant une durée de 24 h est calculée puis comparée au volume du local, afin d'établir la concentration.

La méthode de calcul des concentrations des produits de décomposition est la suivante. Les données et les résultats de calculs intermédiaires sont donnés à l'article C.7, tel qu'indiqué pour chaque étape:

- a) Calculer l'énergie totale de l'arc en kilojoules ($E = I.U.t.n.m$), n étant le nombre de phases et m , le nombre de coupures (pour les données, voir C.7.3.1).
- b) Calculer la quantité de SOF_2 formée, en litres, (à partir du taux de production, r , en litres/kilojoules, voir C.7.4 et C.7.5) (voir note 1).
- c) Calculer le rapport volumique SOF_2/SF_6 à l'intérieur du disjoncteur (en tenant compte de la pression de remplissage, voir C.7.7).
- d) Déterminer le débit L de la fuite en litres par jour (d'après les données du constructeur, voir C.7.6).

- b) Leakage from a high-voltage circuit-breaker after three consecutive interruptions of a 31,5 kA three-phase fault current (see IEC 56, test duty 4).
- c) Leakage from a high-voltage enclosure in which partial discharges have occurred during a period of 30 years.
- d) Leakage from a high-voltage enclosure in which corona discharges have occurred during a period of 30 years.
- e) Leakage from a high-voltage switch-disconnector in which sparking has occurred 200 times per year during a period of 30 years.
- f) Internal fault leading to pressure-relief or burn-through in a 245 kV GIS bus at 40 kA (single-phase fault).
- g) Internal fault leading to pressure-relief or burn-through in a 145 kV GIS bus at 31,5 kA (fault involving two phase-to-phase arcs).
- h) Internal fault leading to pressure-relief or burn-through in a medium-voltage GIS switchboard at 25 kA (single-phase fault).
- i) Internal fault leading to pressure-relief in a medium-voltage circuit-breaker at 25 kA (single-phase fault).
- j) Internal fault leading to pressure-relief in a medium-voltage Ring Main Unit at 16 kA (fault involving two phase-to-phase arcs).

C.4.5 Determination of concentrations due to leakage of SOF_2 from circuit-breakers

Leakage from circuit-breakers only is considered here because the degree of SF_6 decomposition in circuit-breakers is higher than in other types of equipment.

The concentration of the reference gaseous decomposition product SOF_2 in the switchgear and controlgear room is calculated for a circuit-breaker which has just interrupted a three-phase fault current three consecutive times (as required for IEC 56, test duty 4) and is consequently leaking SF_6 containing arc decomposition products. The quantity of SOF_2 leaked during a 24-h period is calculated and compared with the room volume to establish the concentration.

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

- a) Calculate total arc energy in kilojoules ($E = I.U.t.n.m$) where n is the number of phases and m is the number of interruptions (for data, see C.7.3.1).
- b) Calculate the quantity of SOF_2 formed in litres (from production rate, r , in litres/kilojoule, see C.7.4 and C.7.5) (see note 1).
- c) Calculate the SOF_2/SF_6 volume ratio inside the breaker (taking account of filling pressure, see C.7.7).
- d) Determine the leakage rate L in litres per day (from manufacturer's data, see C.7.6).

- e) Calculer la quantité de SOF_2 s'échappant dans la salle d'appareillage (voir C.7.7).
- f) Calculer la quantité de SOF_2 accumulée sur une période de 24 h (en litres, voir C.7.7).
- g) Calculer le taux du SOF_2 accumulé dans le volume de la salle d'appareillage (en ppmv, pour les données, voir C.7.1).
- h) Comparer cette concentration avec le TLV (voir C.8.1) et exprimer le résultat sous forme de rapport $R = C/\text{TLV}$. Si cette valeur R est inférieure à l'unité, aucun risque pour la santé n'est à craindre.

L'équation, pour le calcul en ppmv, de la concentration C de SOF_2 dans le local des appareillages, sur une période de 24 h est donc:

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

où

r est le taux de production en litres/kJ;

E est l'énergie de l'arc, en kilojoules;

L est le débit de la fuite, en litres par jour;

V est le volume du local, en litres;

v est le volume de l'appareillage, en litres;

p_f est le rapport entre la pression de remplissage SF_6 (MPa absolu) et la pression atmosphérique.

Les résultats des calculs donnés à titre d'exemple pour des cas de fuites (voir article C.7 pour les données) sont donnés au tableau C.2.

Tableau C.2 – Résultats des calculs donnés à titre d'exemple en cas de fuite

Disjoncteur	V_f Fuite de SOF_2 litres	V Volume du local litres	C Concentration SOF_2 ppmv	TLV (voir note 2) de SOF_2 ppmv	R
MT	$1,3 \times 10^{-6}$	120×10^3	11×10^{-6}	1,6	$6,8 \times 10^{-6}$
HT	108×10^{-6}	700×10^3	154×10^{-6}	1,6	96×10^{-6}

V_f est la quantité échappée dans l'atmosphère en 24 h (voir note 3, C.7.5, C.7.6, et C.7.7). Les concentrations C sont beaucoup plus petites que le TLV, comme indiqué par la valeur du rapport R .

NOTES

1 L'arc se forme entre les contacts cuivre – tungstène.

2 TLV: Threshold Limit Value: niveaux d'exposition basés sur des expositions répétées sur une période de 8 h [42]; (voir C.8.1.).

3 L'extrapolation à des temps supérieurs d'accumulation requiert des données détaillées concernant le taux de renouvellement d'air apporté par ventilation.

- e) Calculate the quantity of SOF_2 leaking into the switchgear and controlgear room (see C.7.7).
- f) Calculate the quantity of SOF_2 accumulated during a 24 h period (in litres, see C.7.7).
- g) Calculate the ratio of accumulated SOF_2 to the switchgear and controlgear room air volume (in ppmv, for data see C.7.1).
- h) Compare this concentration with the TLV (see C.8.1) and express the result as a ratio $R = C/\text{TLV}$. If the value of R is less than unity, then no health risk is to be expected.

The equation for calculation of the switchgear and controlgear room concentration C of SOF_2 , in ppmv, for a 24 h period is thus:

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

where

r is the production rate in litres/kilojoules;

E is the arc energy, in kilojoules;

L is the leakage rate, in litres per day;

V is the room volume, in litres;

v is the switchgear and controlgear volume, in litres;

p_f is the ratio of the SF_6 filling pressure (MPa absolute) to the atmospheric pressure.

Results of example calculations for leakage situations (see clause C.7 for data):

Table C.2 – Results of example calculations for leakage situations

Circuit-breaker	V_1 SOF_2 leaked litres	V Room volume litres	C SOF_2 Concentration ppmv	TLV (see note 2) of SOF_2 ppmv	R
MV	$1,3 \times 10^{-6}$	120×10^3	11×10^{-6}	1,6	$6,8 \times 10^{-6}$
HV	108×10^{-6}	700×10^3	154×10^{-6}	1,6	96×10^{-6}

V_1 is the quantity leaked into the atmosphere in 24 h (see note 3, C.7.5, C.7.6 and C.7.7). The concentrations C are very much smaller than the TLV, as shown by the values of ratio R .

NOTES

- 1 The arcing takes place between copper-tungsten contacts.
- 2 TLV: Threshold Limit Value: exposure levels based on repetitive 8 h exposure [42]; (see C.8.1).
- 3 Extrapolation to longer accumulation times requires detailed data concerning the rate of air replacement due to ventilation.

C.4.5.1 Calculs complémentaires destinés à prendre en compte les effets de l'hydrolyse du SOF_2

Dans l'annexe B, en B.1.1, l'équation (9) décrit l'hydrolyse du SOF_2 , au cours de laquelle se forment du SO_2 et du HF. Cela peut se produire lorsque le SOF_2 reste en présence d'humidité pendant de longues périodes, que ce soit à l'intérieur de l'enveloppe de l'appareillage ou dans l'atmosphère de la salle de l'appareillage. Toutefois il convient que les adsorbants maintiennent l'humidité présente dans l'enveloppe à un niveau faible, ce qui limite le niveau d'hydrolyse avant la fuite. Une ventilation normale devrait suffire à éviter une accumulation de SOF_2 dans l'atmosphère.

En supposant cependant une mauvaise ventilation qui permettrait une accumulation de SOF_2 , il est nécessaire de considérer les produits finaux pour évaluer les risques pour la santé.

Chaque molécule de SOF_2 participant à la réaction d'hydrolyse produit une molécule de SO_2 et deux molécules de HF. Ainsi, chaque mole de SOF_2 donne une mole de SO_2 et deux moles de HF, chaque mole occupant le volume molaire. Par conséquent, un volume donné de SOF_2 produit un volume égal de SO_2 et deux fois ce volume de HF, et les concentrations atteintes dans un volume donné ont la même relation. Toutefois, le HF est très réactif, et il ne subsiste généralement pas assez longtemps dans l'atmosphère pour atteindre de fortes concentrations.

On considère que le HF et le SO_2 ont des effets similaires sur l'organisme humain, (voir note 1) et, pour un mélange multicomposants de cette nature, la somme R_{tot} de ces rapports individuels de concentration aux TLV ne devrait pas dépasser l'unité [39].

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

En supposant que la totalité du SOF_2 subisse une hydrolyse et que la totalité du SO_2 et du HF reste dans l'atmosphère, les résultats de C.4.5 donnent les valeurs suivantes pour R_{tot} . Les très faibles valeurs de R_{tot} (et des rapports individuels de concentration par rapport aux TLV) indiquent un risque négligeable.

Tableau C.3 – Résultats pour les cas de fuite, en tenant compte de l'hydrolyse du SOF_2

Disjoncteur	SOF_2	SO_2		HF		R_{tot}
	Concentration ppmv	TLV ppmv (voir note 2)	Concentration ppmv	TLV ppmv (voir note 2)	Concentration ppmv	
MT	11×10^{-6}	2,0	11×10^{-6}	3,0	22×10^{-6}	$12,6 \times 10^{-6}$
HT	154×10^{-6}	2,0	154×10^{-6}	3,0	308×10^{-6}	180×10^{-6}

NOTES

1 Il s'agit là d'une supposition prudente, qui a pour résultat la concentration maximale autorisée de chaque composant inférieure à son TLV. Elle est adoptée ici afin de simuler un cas très pessimiste.

2 Les TLV du SO_2 et du HF sont indiqués en référence [39, 41, 42].

C.4.5.1 Additional calculation to take account of the effects of SOF_2 hydrolysis

In B.1.1, equation (9) describes the hydrolysis of SOF_2 whereby SO_2 and HF are formed. This can occur when SOF_2 remains in the presence of humidity for long periods of time, either inside the switchgear and controlgear enclosure or in the switchroom atmosphere. Adsorbents should however maintain a low humidity within switchgear enclosures, limiting the degree to which hydrolysis can occur prior to leakage. Normal ventilation should prevent the accumulation of SOF_2 in the atmosphere.

Assuming that inadequate ventilation does allow SOF_2 to accumulate, it is necessary to consider the final products in evaluating any risk to health.

Each molecule of SOF_2 involved in the hydrolysis reaction gives rise to one molecule of SO_2 and two molecules of HF. Thus, every mole of SOF_2 gives rise to one mole of SO_2 and two moles of HF, each mole occupying the molar volume. Therefore, a given volume of SOF_2 produces an equal volume of SO_2 and twice that volume of HF and the concentrations in a given room volume are similarly related. HF, however, is highly reactive and is unlikely to remain in the atmosphere for long enough for high concentrations to be reached.

HF and SO_2 are considered to have a similar effect on the human organism (see note 1) and for such a multi-component mixture, the sum R_{tot} of the individual ratios of concentration to TLV should not exceed unity [39].

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

Assuming that all the SOF_2 undergoes hydrolysis and that all of the resultant SO_2 and HF remain in the atmosphere, the results of C.4.5 give the following values of R_{tot} . The very low values of R_{tot} (and of the individual ratios of concentration to TLV) indicate negligible risk.

Table C.3 – Results for leakage situations taking account of SOF_2 hydrolysis

Circuit-breaker	SOF_2	SO_2		HF		R_{tot}
	Concentration ppmv	TLV ppmv (see note 2)	Concentration ppmv	TLV ppmv (see note 2)	Concentration ppmv	
MV	11×10^{-6}	2,0	11×10^{-6}	3,0	22×10^{-6}	$12,6 \times 10^{-6}$
HV	154×10^{-6}	2,0	154×10^{-6}	3,0	308×10^{-6}	180×10^{-6}

NOTES

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

2 The TLVs for SO_2 and HF are given in reference [39, 41, 42].

C.4.6 Détermination des concentrations liées à une fuite de S_2F_{10}

Les vitesses de décomposition du SF_6 en présence de décharges à faible énergie sont généralement considérées comme extrêmement faibles dans les conditions normales de service, avec, en conséquence, un risque négligeable pour la santé. Dans le cas des *décharges partielles* (DP) et de l'effet *couronne*, cela est surtout dû au fait que les énergies en cause sont extrêmement faibles. Une décomposition plus importante ne pourrait se produire que si les décharges se poursuivaient sur une longue période (des semaines ou des mois). De plus:

- les décharges partielles se produisant à l'intérieur des isolants solides ne peuvent pas affecter le gaz;
- les appareillages remplis au SF_6 ne sont généralement pas affectés par l'effet couronne, et toutes les décharges par l'effet couronne de quelque importance ont habituellement une source extérieure au matériel, par exemple traversée, etc;
- des procédures d'essai de DP normalisées vérifient le matériel contre ce type de décharge, comme, d'ailleurs, les mesures d'interférences radio.

La manœuvre de sectionneur blindé à haute tension a un effet limité, d'abord parce que l'énergie totale dissipée lors de chaque manœuvre est faible, deuxièmement parce que le temps s'écoulant entre deux manœuvres est très long dans les conditions normales de service, et troisièmement parce que la crête d'intensité de l'étincelle est élevée [35, 43].

Cependant, malgré les considérations précédentes, certaines préoccupations ont été exprimées quant à la présence possible de S_2F_{10} dans les appareillages en raison de sa forte toxicité relative [33, 35, 44], bien que sa quantité décroisse rapidement en situation réelle [34, 36, 37, 38, 44, 45].

Afin d'illustrer le très faible risque pour la santé lié au S_2F_{10} dans les appareillages réels, des estimations sont présentées ci-dessous pour les trois cas mentionnés plus haut. Des scénarios sévères ont été adoptés dans chaque cas.

Les valeurs exactes de l'énergie de décharge employée peuvent être multipliées par de nombreux ordres de grandeur sans modifier les conclusions de façon notable. Cela assure une marge de sécurité considérable, pour les cas de niveaux de décharge anormalement élevés.

L'approche retenue est la même dans tous les cas:

- on suppose que le phénomène de décharge produit un S_2F_{10} stable en toutes conditions, et qui s'accumule pendant 30 ans à l'intérieur de l'appareillage HT (voir note);
- ce gaz gagne ensuite par une fuite la salle d'appareillage (700 m^3), au rythme régulier de 1 % par an ($27 \cdot 10^{-6}$ par jour);
- on estime ensuite la quantité accumulée en 24 h, et on compare la concentration C trouvée au TLV (0,01 ppmv) [42], afin d'obtenir le rapport R ;
- des rapports R nettement inférieurs à l'unité indiquent clairement que le risque pour la santé est négligeable.

Dans les trois cas étudiés, les concentrations maximales calculées sont aux alentours de cent mille fois inférieures au TLV. Ce résultat signifie qu'en pratique, il n'y a aucun risque pour la santé lié au S_2F_{10} produit dans l'appareillage dans les conditions de décharge à faible énergie de cette nature. La décroissance de la quantité du S_2F_{10} dans les situations

C.4.6 Determination of concentrations due to leakage of S_2F_{10}

The rates of decomposition of SF_6 in the presence of low-energy discharges are generally considered to be extremely low for normal service conditions, implying a negligible risk to health. For *partial discharge* (PD) and *corona* activity this is mainly due to the fact that the energies involved are extremely low; significant decomposition would only occur if the discharges were active during a prolonged period of time (weeks or months). Moreover:

- partial discharge activity located inside solid insulators cannot affect the gas;
- SF_6 -filled switchgear and controlgear is generally corona free and any significant corona discharges detected usually originate outside the equipment, for example on bushings, etc;
- standard PD testing procedures screen equipment for this type of discharge, as do radio interference measurements.

High-voltage *disconnect switch sparking* has limited impact firstly because the overall energy per operation is low, secondly because the time between operations is very long in typical service conditions and thirdly because the peak spark current is high [35, 43].

However, regardless of the above, concern has been voiced as to the possible existence of S_2F_{10} in switchgear and controlgear because of its high relative toxicity [33, 35, 44], even though it is known to decay rapidly in practical situations [34, 36, 37, 38, 44, 45].

In order to illustrate the extremely low health risk associated with S_2F_{10} in practical switchgear and controlgear situations, estimations are presented below for the three cases cited above. Severe scenarios have been adopted for each situation.

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

The approach to the calculations is similar for each case:

- it is assumed that the discharge activity forms unconditionally stable S_2F_{10} which accumulates for 30 years inside the HV switchgear and controlgear (see note);
- this gas then leaks into the switchgear and controlgear room (700 m³) at the standard rate of 1 % per year ($27 \cdot 10^{-6}$ per day);
- the quantity built up in 24 h is then estimated and the concentration C found is compared to the TLV, (0,01 ppmv) [42], to give the ratio R ;
- ratios R much less than unity clearly imply that the risk to health would be negligible.

In the three cases studied, the calculated maximum concentrations built up are in the region of one hundred thousand times less than the TLV. This result implies that in practice there is no risk to health due to S_2F_{10} produced in switchgear and controlgear under low-energy discharge conditions of this nature. The decay of S_2F_{10} in practical

réelles devrait fortement réduire la quantité accumulée, ce qui renforce encore de façon considérable cette conclusion. De surcroît, les calculs ne tiennent pas compte des réductions éventuelles du taux de formation du S_2F_{10} dues à la présence d'humidité.

NOTE – La décroissance mentionnée dans les références citées conduit à des concentrations de S_2F_{10} environ 100 fois inférieures à celles des présentes estimations.

C.4.6.1 Cas des décharges partielles

On part des suppositions suivantes:

- le niveau de DP (dans le gaz) (voir note 1) est de 5 pC. Le nombre de décharges par cycle est élevé 2 [43];
- la tension assignée est de 245 kV à 50 Hz;
- le taux de production du S_2F_{10} (voir note 3) est de $0,2 \cdot 10^{-9}$ mol/J [34, 35]. Les décharges se produisent en continu pendant 30 ans, et le S_2F_{10} formé ne décroît pas.

NOTES

- 1 C'est là le niveau maximal typique employé au cours des essais de réception du GIS.
- 2 Toutes les décharges ont une amplitude identique, et elles sont supposées réparties uniformément sur l'onde de tension.
- 3 Les taux de formation de S_2F_{10} dans le cas de décharges partielles sous excitation alternative n'existent pas dans la littérature. Le présent calcul repose donc sur une extrapolation des résultats des mesures de décharge par étincelle.

Les résultats apparaissent dans le tableau suivant. La quantité de S_2F_{10} échappé pendant la période de 24 h est extrêmement faible ($88,3 \cdot 10^{-9}$ litres), la concentration accumulée est $C = 126 \cdot 10^{-9}$ ppmv, et le rapport $R = C/TLV$ est de $12,6 \cdot 10^{-6}$.

Tableau C.4 – Exemple de calcul de concentration de S_2F_{10} en cas de décharges partielles

Charge transférée par décharges	q	$5 \cdot 10^{-12}$ C
Nombre de décharges par cycle	n	20
Charge transférée par cycle	$Q = q n$	$0,1 \cdot 10^{-9}$ C
Tension assignée	U_n	245 kV
Energie dissipée par cycle	$E = Q U_n / \sqrt{3}$	$14,1 \cdot 10^{-6}$ J
Energie dissipée par seconde	$E_s = 50 E$	$0,707 \cdot 10^{-3}$ J
Energie dissipée par année	$E_y = 31,5 \cdot 10^6 E_s$	$22,3 \cdot 10^3$ J
Taux de formation de S_2F_{10}	r	$0,2 \cdot 10^{-9}$ mole/J
S_2F_{10} formé par an	$P = r E_y$	$4,46 \cdot 10^{-6}$ mole
Volume de S_2F_{10} en litres (par an)	$V = 24,45 P$	$109 \cdot 10^{-6}$ l
S_2F_{10} accumulé en 30 ans	$U = 30 V$	$3,27 \cdot 10^{-3}$ l
S_2F_{10} échappé en 24 h	$v = 27 \cdot 10^{-6} U$	$88,3 \cdot 10^{-9}$ l
Concentration (salle de 700 m ³)	$C = v / (700 \cdot 10^3)$	$126 \cdot 10^{-9}$ ppmv
TLV du S_2F_{10}	TLV	0,01 ppmv
Rapport R	$R = C/TLV$	$12,6 \cdot 10^{-6}$

situations should greatly reduce the quantity accumulated, considerably reinforcing this conclusion. Furthermore, the calculations neglect any reduction in S_2F_{10} production rates due to the presence of humidity.

NOTE – The decay rates reported in the references cited lead to S_2F_{10} concentrations about 100 times smaller than those estimated here.

C.4.6.1 Partial discharge situation.

The following assumptions are made:

- the PD level (in the gas) (see note 1) is 5 pC. The number of discharges per cycle is high (see note 2) [43];
- the nominal voltage is 245 kV at 50 Hz;
- the S_2F_{10} production rate (see note 3) is $0,2 \cdot 10^{-9}$ mole/J [34, 35]; the discharges run continuously for 30 years and the S_2F_{10} formed does not decay.

NOTES

- 1 This is a typical maximum level used during acceptance testing of GIS.
- 2 All discharges have identical amplitudes and are assumed to be distributed uniformly over the voltage wave.
- 3 S_2F_{10} production rates for partial discharges under a.c. excitation are not available in the literature. This calculation is therefore based on an extrapolation of the results of spark discharge measurements.

The results are shown by the following table. The quantity of S_2F_{10} leaked during the 24 h period would be extremely small ($88,3 \cdot 10^{-9}$ litres), the concentration built up would be $C = 126 \cdot 10^{-9}$ ppmv and the ratio $R = C/TLV$ would be $12,6 \cdot 10^{-6}$.

Table C.4 – Sample calculation of S_2F_{10} concentration for partial discharges

Charge transferred per discharge	q	$5 \cdot 10^{-12}$ C
Number of discharges per cycle	n	20
Charge transferred per cycle	$Q = q n$	$0,1 \cdot 10^{-9}$ C
Nominal voltage	U_n	245 kV
Energy dissipated per cycle	$E = Q U_n / \sqrt{3}$	$14,1 \cdot 10^{-6}$ J
Energy dissipated per second	$E_s = 50 E$	$0,707 \cdot 10^{-3}$ J
Energy dissipated per year	$E_y = 31,5 \cdot 10^6 E_s$	$22,3 \cdot 10^3$ J
S_2F_{10} production rate	r	$0,2 \cdot 10^{-9}$ mole/J
S_2F_{10} produced per year	$P = r E_y$	$4,46 \cdot 10^{-6}$ mole
Volume S_2F_{10} in litres (per year)	$V = 24,45 P$	$109 \cdot 10^{-6}$ l
S_2F_{10} accumulated in 30 years	$U = 30 V$	$3,27 \cdot 10^{-3}$ l
S_2F_{10} leaked in 24 h	$v = 27 \cdot 10^{-6} U$	$88,3 \cdot 10^{-9}$ l
Concentration (700 m ³ room)	$C = v / (700 \cdot 10^3)$	$126 \cdot 10^{-9}$ ppmv
TLV for S_2F_{10}	TLV	0,01 ppmv
Ratio R	$R = C/TLV$	$12,6 \cdot 10^{-6}$

C.4.6.2 Cas de l'effet couronne

Les suppositions faites sont les suivantes:

- la tension totale de couronne (voir note) (RIV) est de 3 μV mesurée sur 300 Ω ;
- la tension assignée du circuit est de 245 kV;
- le taux de formation du S_2F_{10} est de $0,05 \cdot 10^{-9}$ mole/J [34]. Le S_2F_{10} ne décroît pas.

NOTE - Pour le phénomène de décharges à l'intérieur du matériel..

Comme l'indique le tableau suivant, le volume de S_2F_{10} échappé au cours de la période de 24 h est d'environ $45 \cdot 10^{-9}$ l, la concentration C est de $64 \cdot 10^{-9}$ ppmv, et le rapport $R = C/\text{TLV}$ est de $6,4 \cdot 10^{-6}$.

Tableau C.5 – Exemple de calcul de concentration de S_2F_{10} en cas d'effet couronne

Tension de couronne	V_c	$3 \cdot 10^{-6} \text{ V}$
Impédance de mesure	Z	300 Ω
Courant de couronne	$I = V_c/Z$	$10 \cdot 10^{-9} \text{ A}$
Tension assignée GIS	U_n	$245 \cdot 10^3 \text{ V}$
Energie dissipée dans une seconde	$E_s = I U_n \sqrt{3}$	$1,41 \cdot 10^{-3} \text{ J}$
Energie dissipée par année	$E_y = 31,5 \cdot 10^6 E_s$	$44,5 \cdot 10^3 \text{ J}$
Taux de formation de S_2F_{10}	r	$0,05 \cdot 10^{-9} \text{ mole/J}$
S_2F_{10} formé par an	$P_v = E_y r$	$2,2 \cdot 10^{-6} \text{ mole}$
Volume de S_2F_{10} en litres (par an)	$V = 24,45 P_v$	$54,4 \cdot 10^{-6} \text{ l}$
S_2F_{10} accumulé en 30 ans	$U = 30 V$	$1,63 \cdot 10^{-3} \text{ l}$
S_2F_{10} échappé en 24 h	$v = 27 \cdot 10^{-6} U$	$44,7 \cdot 10^{-9} \text{ l}$
Concentration (salle de 700 m^3)	$C = v / (700 \cdot 10^3)$	$63,8 \cdot 10^{-9} \text{ ppmv}$
TLV du S_2F_{10}	TLV	0,01 ppmv
Rapport R	$R = C/\text{TLV}$	$6,4 \cdot 10^{-6}$

C.4.6.3 Manoeuvre du sectionneur blindé

Les suppositions faites sont les suivantes:

- le sectionneur manoeuvre 200 fois par an. L'énergie (voir note 1) par manoeuvre est de 0,25 kJ;
- le taux de production (voir note 2) est de $0,05 \cdot 10^{-9}$ mole/J [34], et la quantité de S_2F_{10} formé ne décroît pas.

NOTES

1 Les valeurs moyennes utilisées sont les suivantes: tension d'arc 1 kV et courant capacitif 0,25 A. La durée d'arc utilisée est de 1 s.

2 Les arcs individuels peuvent avoir, pendant l'étincelle de coupure, des crêtes de courant allant jusqu'à 3 kA, mais qui ne durent que quelques dizaines de microsecondes. A défaut de données publiées, le taux de formation retenu correspond à la valeur inférieure donnée pour les décharges par étincelles, toutefois il est plus de 2 000 fois supérieur à celui donné pour les arcs de puissance [34].

C.4.6.2 Corona situations

The following assumptions are made:

- the overall corona (see note) voltage (RIV) is 3 μ V measured across 300 Ω ;
- the nominal system voltage is 245 kV;
- the S_2F_{10} production rate is $0,05 \cdot 10^{-9}$ mole/J [34]. The S_2F_{10} does not decay.

NOTE – For discharge activity inside the equipment.

As shown by the following table, the S_2F_{10} leaked during the 24 h period would be about $45 \cdot 10^{-9}$ l, the concentration C would be $64 \cdot 10^{-9}$ ppmv and the ratio $R = C/TLV$ would be $6,4 \cdot 10^{-6}$.

Table C.5 – Sample calculation of S_2F_{10} concentration for corona discharges

Corona voltage	V_c	$3 \cdot 10^{-6}$ V
Measurement impedance	Z	300 Ω
Corona current	$I = V_c/Z$	$10 \cdot 10^{-9}$ A
GIS nominal voltage	U_n	$245 \cdot 10^3$ V
Energy dissipated during one second	$E_s = I U_n \sqrt{3}$	$1,41 \cdot 10^{-3}$ J
Energy dissipated per year	$E_y = 31,5 \cdot 10^6 E_s$	$44,5 \cdot 10^3$ J
S_2F_{10} production rate	r	$0,05 \cdot 10^{-9}$ mole/J
S_2F_{10} produced per year	$P_y = E_y r$	$2,2 \cdot 10^{-6}$ mole
S_2F_{10} volume per year	$V = 24,45 P_y$	$54,4 \cdot 10^{-6}$ l
S_2F_{10} accumulated in 30 years	$U = 30 V$	$1,63 \cdot 10^{-3}$ l
S_2F_{10} leaked in 24 h	$v = 27 \cdot 10^{-6} U$	$44,7 \cdot 10^{-9}$ l
Concentration (700 m ³ room)	$C = V / (700 \cdot 10^3)$	$63,8 \cdot 10^{-9}$ ppmv
TLV for S_2F_{10}	TLV	0,01 ppmv
Ratio R	$R = C/TLV$	$6,4 \cdot 10^{-6}$

C.4.6.3 Disconnecter sparking

The following assumptions are made:

- the disconnector operates 200 times per year. The energy (see note 1) per operation is 0,25 kJ;
- the production rate (see note 2) is $0,05 \cdot 10^{-9}$ mole/J [34] and the S_2F_{10} formed does not decay.

NOTES

- 1 The average values used are: arc voltage, 1 kV and capacitive current, 0,25 A. The arc duration used is 1 s.
- 2 The individual arcs during disconnector sparking can have peak currents of up to 3 kA but last only a few tens of microseconds. In the absence of published data, the production rate chosen reflects this situation being at the lower end of the spark discharge range but more than 2 000 times greater than for high power arcs [34].

Comme l'indique le tableau suivant, le volume de S_2F_{10} échappé au cours de la période de 24 h est d'environ $50 \cdot 10^{-9}$ litres, la concentration résultante est $C = 72 \cdot 10^{-9}$ ppmv, et le rapport $R = C/TLV$ est de $7,2 \cdot 10^{-6}$. Le caractère réaliste de ces estimations théoriques a été confirmé par des mesures sur un sectionneur réel, dans des conditions de fonctionnement très accélérées [36].

Tableau C.6 – Exemple de calcul de concentration de S_2F_{10} en cas de manoeuvre de sectionneur

Energie par manoeuvre	$E_o = i.u.t$	0,25 kJ
Energie dissipée par année	$E_y = 200 E_o$	50 kJ
Taux de formation de S_2F_{10}	r	$0,05 \cdot 10^{-9}$ mole/J
S_2F_{10} formé par an	$P_y = r E_y$	$2,5 \cdot 10^{-6}$ mole
Volume de S_2F_{10} en litres (par an)	$V = 24,45 P_y$	$61 \cdot 10^{-6}$ l
S_2F_{10} accumulé en 30 ans	$U = 30 V$	$1,8 \cdot 10^{-3}$ l
S_2F_{10} échappé en 24 h (litres)	$V = 27,4 \cdot 10^{-6} U$	$50 \cdot 10^{-9}$ l
Concentration (salle de 700 m³)	$C = V / (700 \cdot 10^3)$	$72 \cdot 10^{-9}$ ppmv
TLV du S_2F_{10}	TLV	0,01 ppmv
Rapport R	$R = C/TLV$	$7,2 \cdot 10^{-6}$

C.4.7 Détermination de la concentration due à un défaut d'arc interne

Un défaut interne ne conduit pas nécessairement à un échappement de SF_6 (voir section 5). Les seules situations où se produit un échappement sont:

- les défauts provoquant le fonctionnement du dispositif de décharge de pression, ou l'ouverture de l'enveloppe;
- les cas d'arc interne provoquant le percement de l'enveloppe.

Les hypothèses retenues pour l'étude de ces cas, en plus de celles citées en C.4.1, sont les suivantes:

- a) La totalité des produits de décomposition gazeux formés s'échappe rapidement dans l'atmosphère environnante.
- b) Les effets de souffle du gaz, associés à des forces de convection très élevées, entraînent un mélange rapide du gaz émis avec l'air de la salle d'appareillage.
- c) Le SOF_2 généré est considéré comme stable pendant la période de temps considérée.

La concentration de SOF_2 dans l'air de la salle d'appareillage est calculée pour chaque cas de la façon suivante. Les données et résultats intermédiaires sont donnés à l'article C.7 comme indiqué à chaque étape:

- 1) Calculer l'énergie E de l'arc, en kilojoules (voir C.7.3.2).
- 2) Calculer la quantité V_f de SOF_2 formé en litres (à partir du taux de production, r , en litres/kilojoules), voir C.7.4 et C.7.5).
- 3) Calculer le volume V de la salle d'appareillage en litres (voir C.7.1).
- 4) Calculer le rapport volume C de SOF_2 /volume de la salle d'appareillage, en ppmv.

As shown by the following table, the S_2F_{10} leaked during the 24 h period would be $50 \cdot 10^{-9}$ l, the concentration built up would be $C = 72 \cdot 10^{-9}$ ppmv and the ratio $R = C/TLV$ would be $7,2 \cdot 10^{-6}$. These theoretical estimates have been confirmed as being realistic by measurements on a real switch-disconnector under highly accelerated operation conditions [36].

Table C.6 – Sample calculation of S_2F_{10} concentration for disconnector sparking

Energy per operation	$E_o = i.u.t$	0,25 kJ
Energy dissipated per year	$E_y = 200 E_o$	50 kJ
Production rate S_2F_{10}	r	$0,05 \cdot 10^{-9}$ mole/J
S_2F_{10} produced per year	$P_y = r E_y$	$2,5 \cdot 10^{-6}$ mole
S_2F_{10} volume per year	$V = 24,45 P_y$	$61 \cdot 10^{-6}$ l
S_2F_{10} accumulated in 30 years	$U = 30 V$	$1,8 \cdot 10^{-3}$ l
S_2F_{10} leaked in 24 h (litres)	$V = 27,4 \cdot 10^{-6} U$	$50 \cdot 10^{-9}$ l
Concentration (700 m ³ room)	$C = V / (700 \cdot 10^3)$	$72 \cdot 10^{-9}$ ppmv
TLV for S_2F_{10}	TLV	0,01 ppmv
Ratio R	$R = C/TLV$	$7,2 \cdot 10^{-6}$

C.4.7 Determination of concentration due to internal fault

An internal fault does not necessarily cause SF_6 to be released (see section 5). The only situations in which a release will occur are:

- failures provoking over-pressure relief operation or enclosure opening;
- internal fault situations provoking arc burn-through of the enclosure.

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

- a) The totality of gaseous by-products formed is rapidly exhausted into the surrounding air.
- b) The very strong convective and gas blast forces induce rapid mixing of the emitted gas with the switchgear and controlgear room air.
- c) The SO_2 generated is assumed to be stable during the time period of interest.

The SO_2 concentration in the switchgear and controlgear room air is calculated as follows for each situation. Data and intermediate results are given in C.7 as indicated for each step:

- 1) Calculate the arc energy E , in kilojoules (see C.7.3.2)
- 2) Calculate the quantity V_f of SO_2 formed in litres (from production rates, r , in litres/kilojoules, see C.7.4 and C.7.5).
- 3) Calculate the switchgear and controlgear room volume V in litres (see C.7.1).
- 4) Calculate the ratio C of SO_2 volume/switchgear and controlgear room volume, in ppmv.

5) Comparer cette concentration de SOF_2 à la limite C_m (voir note 1) d'exposition momentanée au SOF_2 . L'équation de base servant au calcul de la concentration C de SOF_2 en ppm par volume dans le local est de ce fait:

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

Les résultats de calculs donnés à titre d'exemple pour des cas de défaut d'arc interne (voir l'article C.7 pour les données) sont donnés au tableau C.7.

Tableau C.7 – Exemple de calcul de concentration de SOF_2 en cas de défaut d'arc interne

Arc interne	V_i	V	C	C_m
	SOF_2 formé litres	Volume du local litres	Concentration SOF_2 ppmv	de SOF_2 ppmv
GIS 245 kV	60	$2\,000 \cdot 10^3$	30	500
GIS 145 kV	95	$700 \cdot 10^3$	135	500
GIS MT	11,3	$120 \cdot 10^3$	94	500
Disjoncteur MT	1,9	$120 \cdot 10^3$	15	500
RMU MT ²	3,0	$30 \cdot 10^3$	100	500
NOTES				
1 C_m : voir C.4.2.2.				
2 Dans le cas présent le volume du local est petit: voir C.4.3.1.				

C.4.7.1 Estimation de la contribution relative des produits de décomposition du SF_6

Le SF_6 décomposé à la suite d'un arc est un produit multicomposants. Il convient que la contribution relative de chaque composant au risque d'exposition soit évaluée en divisant la concentration C de ce composant par le niveau permis correspondant (TLV, IDLH, etc.) [39]. Plus le rapport est petit, plus la contribution du composant à la toxicité globale est faible. La comparaison des rapports obtenus pour les différents composants, indique leur importance relative. Pour illustrer cela, considérons les résultats obtenus pour les produits de décomposition bien connus du SF_6 , le SOF_2 , le SO_2F_2 , et le S_2F_{10} pour lesquels des données fiables sont disponibles (voir notes 1 et 2) [4, 32, 33, 40, 42, 46].

En appliquant la méthode du paragraphe C.4.7 à l'exemple du disjoncteur moyenne tension, on obtient les rapports C/TLV suivants:

$$\text{SOF}_2 = 9,3$$

$$\text{SO}_2\text{F}_2 = 0,05$$

$$\text{S}_2\text{F}_{10} = 0,001$$

Pour des expositions de courte durée (voir notes 1 et 2), les rapports ci-dessous sont obtenus en calculant le rapport C/C_m pour le SOF_2 , et C/IDLH pour les autres produits de décomposition:

$$\text{SOF}_2 = 3,0 \cdot 10^{-2}$$

$$\text{SO}_2\text{F}_2 = 2,5 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{S}_2\text{F}_{10} = 4,0 \cdot 10^{-5}$$

Dans les deux cas, on note la contribution négligeable du S_2F_{10} et surtout la forte prédominance du SOF_2 .

5) Compare this SOF_2 concentration to the momentary exposure limit C_m (see note 1) for SOF_2 . The basic equation for room concentration C of SOF_2 in volume ppm is thus:

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

Results of example calculations for internal fault situations (see clause C.7 for data) are given in table C.7.

Table C.7 – Sample calculation of SOF_2 concentrations for internal fault situations

Internal fault	V_f	V	C	$C_m^{1)}$ for SOF_2
	SOF_2 formed litres	Room volume litres	SOF_2 Concentration ppmv	ppmv
245 kV GIS	60	$2\,000 \cdot 10^3$	30	500
145 kV GIS	95	$700 \cdot 10^3$	135	500
MV GIS	11,3	$120 \cdot 10^3$	94	500
MV CB	1,9	$120 \cdot 10^3$	15	500
MV RMU ²	3,0	$30 \cdot 10^3$	100	500
NOTES				
1 C_m : see C.4.2.2.				
2 In this case the room volume is small: see C.4.3.1.				

C.4.7.1 Estimate of the relative contributions of SF_6 by-product

Arc decomposed SF_6 is a multi-component product. The relative contribution of each component to the risk of exposure should be evaluated by dividing the concentration C of that component by the corresponding permissible level (TLV, IDLH, etc.) [39]. The smaller the ratio found, the lower the contribution to overall toxicity. Comparing the ratios obtained for the different components indicates their relative importance. This is illustrated by considering the results obtained for the well-known SF_6 by-products SOF_2 , SO_2F_2 and S_2F_{10} for which reliable data are available (see notes 1 and 2) [4, 32, 33, 40, 42, 46].

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

$$\text{SOF}_2 = 9,3$$

$$\text{SO}_2\text{F}_2 = 0,05$$

$$\text{S}_2\text{F}_{10} = 0,001$$

For short-term exposures (see notes 1 and 2), the ratios shown below are calculated as C/C_m for SOF_2 and as C/IDLH for the other by-products:

$$\text{SOF}_2 = 3,0 \cdot 10^{-2}$$

$$\text{SO}_2\text{F}_2 = 2,5 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{S}_2\text{F}_{10} = 4,0 \cdot 10^{-5}$$

Both cases clearly show the negligible contribution of S_2F_{10} and above all, the dominance of SOF_2 .

Même une variation de deux ordres de grandeur dans le taux de production de S_2F_{10} n'aurait aucune influence sur cette conclusion. Bien que du S_2F_{10} puisse exister dans du SF_6 décomposé à la suite d'un arc, l'impact de sa très forte toxicité est largement atténué par l'extrêmement faible quantité produite. Sa présence peut dès lors être ignorée dans le calcul de la toxicité globale.

NOTES

1 Les taux de production utilisés sont: SO_2F_2 : 3,7 ml/kJ, SO_2F_2 : 0,06 ml/kJ, S_2F_{10} : $2,4 \cdot 10^{-6}$ ml/kJ. Les TLV sont SO_2F_2 : 1,6 ppmv, SO_2F_2 : 5 ppmv, et S_2F_{10} : 0,01 ppmv. Pour une exposition de courte durée, la C_m pour le SO_2F_2 est 500 ppmv, les valeurs des IDLH sont SO_2F_2 : 1 000 ppmv et S_2F_{10} : 1,0 ppmv [40, 46, 47].

2 Les conditions expérimentales utilisées pour l'obtention de données sur le taux de production des produits diffèrent selon les chercheurs. Néanmoins, les ordres de grandeur sont estimés comparables, pour les besoins de ces calculs.

C 4.7.2 Contribution des vapeurs métalliques

En cas d'arc de défaut de forte puissance, quel que soit le milieu, l'énergie dissipée au niveau des électrodes par les racines de l'arc fait fondre et s'évaporer de grandes quantités de métal. Dans le cas d'un défaut interne menant à la rupture de l'enveloppe contenant le SF_6 , la plupart des vapeurs formées seront libérées dans la salle d'appareillage, contribuant ainsi à la toxicité globale.

En première approximation, la limite supérieure de cette contribution peut être estimée en supposant que toute l'énergie apportée par les racines de l'arc fait chauffer, fondre, puis évaporer le métal qui s'échappe alors dans le local. Les résultats peuvent alors être comparés avec les données expérimentales sur l'érosion par arc, afin de vérifier leur ordre de grandeur.

Cependant, cette méthode n'est pas valable dans les cas de percement par fusion de l'enveloppe, en haute tension, à cause des réactions fortement exothermiques se produisant entre les vapeurs d'aluminium et le SF_6 , qui accroissent la formation de vapeur. Oublier cela donnerait une forte sous-estimation de la quantité de vapeur métallique formée pour une énergie d'arc donnée.

Les commentaires ci-dessous s'appliquent aux résultats de ces calculs:

- Pour un défaut d'arc interne, la contribution du SF_6 décomposé par l'arc ne doit pas être automatiquement considérée comme dominante dans la toxicité globale de l'atmosphère. Mis à part le côté approximatif de ce calcul, celui-ci montre, dans les deux cas de moyenne tension décrits en C.4.4, que les émanations de cuivre peuvent dominer dans la toxicité globale.
- Cette conclusion reste encore valable même si seulement 10 % de l'énergie dissipée aux racines de l'arc contribue à la formation de vapeur, ou si 90 % de la vapeur formée est condensée ou transformée à l'intérieur de l'appareillage.
- Par conséquent, il convient de prendre des mesures de sécurité semblables pour tous les types d'appareillage, quel que soit le milieu d'isolement. Il est alors conseillé de définir ces précautions de sécurité en se basant plutôt sur la solide connaissance de la formation de vapeur métallique, que sur les valeurs de décomposition du SF_6 .

Cette procédure ne tient pas compte de l'existence de réactions chimiques entre les vapeurs métalliques et le gaz d'isolement.

Even a variation of two orders of magnitude in the S_2F_{10} production rate has no influence on this conclusion. Although S_2F_{10} may exist in arc decomposed SF_6 , its high toxicity is greatly offset by the extremely small quantities formed. Its presence may thus be neglected in so far as overall toxicity is concerned.

NOTES

1 The production rates used are SOF_2 : 3,7 ml/kJ; SO_2F_2 : 0,06 ml/kJ; S_2F_{10} : $2,4 \cdot 10^{-6}$ ml/kJ. The TLV's are SOF_2 : 1,6 ppmv; SO_2F_2 : 5 ppmv and S_2F_{10} : 0,01 ppmv. For short-term exposure, C_m for SOF_2 is 500 ppmv; the IDLH values are SO_2F_2 : 1 000 ppmv and S_2F_{10} : 1,0 ppmv [40, 46, 47].

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

C.4.7.2 Contribution of metallic vapours

During high power fault arcing in any medium, the energy dissipated at the electrodes by the arc roots melts and evaporates large quantities of metal. In the event of an internal fault leading to the opening of an SF_6 enclosure, most of the fumes formed will be expelled into the switchgear and controlgear room and will constitute a contribution to the overall toxicity.

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

This treatment is however not valid for high-voltage burn-through situations due to the strong exothermic reactions which occur between aluminium vapour and SF_6 and which further increase vapour production. Overlooking this would give rise to a gross under-estimation of the amount of metal vapour produced for a given arc energy.

The following comments apply to the results of these calculations:

- For internal faults the contribution of arc decomposed SF_6 shall not automatically be assumed to dominate the overall toxicity of the atmosphere. Regardless of the approximate nature of this calculation, it indicates that, for both medium-voltage situations of C.4.4, copper fumes may dominate the overall toxicity.
- This conclusion can be seen to remain valid even if only 10 % of the energy dissipated at the arc roots goes to vapour formation, or if 90 % of the vapour formed is condensed or transformed inside the switchgear and controlgear.
- Similar safety precautions should therefore be applied to all switchgear and controlgear, regardless of the insulation medium. It may well be advisable to build these safety precautions around a solid understanding of metal vapour generation rather than on SF_6 decomposition values.

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

En l'absence de méthodes plus fiables, la méthode d'approximation suivante a le mérite de mettre en évidence le rôle d'un contributeur potentiel majeur à la toxicité globale, dans des situations d'arc interne, pour tous les types d'appareillages.

La procédure utilisée pour l'estimation de la contribution maximale des émanations de cuivre à la toxicité suppose que toute l'énergie dissipée par les racines de l'arc contribue à la formation de vapeur métallique:

- La chute de tension totale de l'ensemble anode plus cathode est estimée à environ 30 V. Cela donne une énergie injectée dans les électrodes de 75 kJ et de 96 kJ respectivement pour le cas du disjoncteur et du RMU moyenne tension, cas i) et j) de C.4.4.
- L'énergie requise pour transformer une mole de cuivre, initialement à la température ambiante, en vapeur, a été calculée à 390 kJ [48].
- A partir des valeurs ci-dessus, on obtient les limites supérieures pour les quantités de vapeur formée dans chaque cas, qui sont de 0,19 mole pour le disjoncteur moyenne tension et 0,25 mole pour le RMU.
- Sur la base d'une masse moléculaire de 64 g/mole pour le cuivre, ces valeurs correspondent respectivement à 12 g et 15,8 g de métal évaporé.
- Cela représente une érosion d'environ 1,4 et 1,8 cm³ de métal, ce qui est raisonnable compte tenu des énergies d'arc impliquées.
- Ces valeurs sont environ 40 % supérieures à celles extrapolées à partir de données expérimentales obtenues lors d'essais répétés à 4 kA, qui donnent un taux d'érosion compris entre 2,5 et 4,5 mg/A/s pour des électrodes en cuivre.
- En utilisant les volumes de salles d'appareillage donnés en C.7.1 comme étant respectivement 120 m³ et 30 m³, les concentrations finales obtenues sont d'environ 100 mg/m³ et 520 mg/m³.
- Ces valeurs sont à comparer avec le TLV des vapeurs de cuivre de 0,2 mg/m³ [42].

NOTE - Ces résultats ont été obtenus de façon théorique en utilisant des données et des méthodes approximatives, et n'ont pas été confirmés par des essais pratiques.

C.4.7.3 Contribution de la combustion de matières plastiques

Ce sujet n'est pas traité en tant que tel, étant extérieur au cadre général du présent rapport. Néanmoins, la contribution potentiellement très significative à la toxicité de ces matériaux justifie leur prise en compte. La combustion de matériaux plastiques, comme les isolants de câbles, suite à un défaut d'arc interne, produit une variété d'émanations toxiques, indépendamment de la technologie de l'appareillage.

Par exemple, le cas du polychlorure de vinyle (PVC), sera examiné. Le TLV du chlorure de vinyle est de 1 ppmv = 2,6 mg/m³ [42]. Cela signifie que la vaporisation complète de seulement 8 g de matériau dans l'atmosphère d'un local de 30 m³ donnera une concentration de 100 fois le TLV. Pour une pièce de 120 m³, 32 g de PVC donneront le même résultat. Cela représente la quantité d'isolant de 1,2 m de câble standard de 1mm de diamètre.

Une salle d'appareillage moyenne tension normale peut contenir plusieurs kilomètres de câble de cette dimension, sachant qu'il faut compter environ 7 kg de PVC par kilomètre.

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

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

- The total anode plus cathode voltage drop is taken as about 30 V. This gives an energy injected into the electrodes of 75 kJ and 96 kJ respectively for the medium-voltage circuit-breaker and RMU of C.4.4, cases i) and j).
- The energy required to transform one mole of copper, initially at room temperature, into vapour has been calculated to be 390 kJ [48].
- Comparing the above values gives upper limits for the quantities of vapour formed in each case as 0,19 moles for the medium-voltage circuit-breaker and 0,25 moles for the RMU.
- Based on a molecular weight of 64 g/mole for copper, these values correspond to 12 g and 15,8 g of evaporated metal respectively.
- This represents erosions of about 1,4 cm³ and 1,8 cm³ of metal which is reasonable given the arc energies involved.
- These values are about 40 % higher than those extrapolated from experimental data obtained for multiple-shot, 4 kA tests, which give erosion rates between 2,5 and 4,5 mg/A/s copper electrodes.
- Employing the switchgear and controlgear room volumes given in C.7.1 of 120 m³ and 30 m³ respectively, final concentrations of about 100 mg/m³ and 520 mg/m³ are obtained.
- This is compared to the TLV of copper of 0,2 mg/m³ [42].

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

C.4.7.3 Contribution due to the combustion of plastics

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

As an example, the case of polyvinyl chloride (PVC) will be considered. The TLV for vinyl chloride is 1 ppmv = 2,6 mg/m³ [42]. This means that the full vaporisation of only 8 g will raise the atmospheric concentration of a 30 m³ room to 100 times the TLV. For a 120 m³ room, 32 g of PVC will give the same result. This represents the insulation of 1,2 m of standard 1 mm diameter wire.

A normal medium-voltage switchgear and controlgear room can contain several kilometres of wire of these dimensions, comprising about 7 kg of PVC per kilometre.

Ces estimations peuvent être faites pour chacun des matériaux plastiques risquant de brûler lors d'un défaut d'arc interne. Les observations précédentes indiquent qu'il convient de ne pas ignorer la contribution à la toxicité des émanations dues à la combustion des plastiques et qu'il est bon que l'exposition à de telles émanations reste aussi limitée qu'il est pratiquement possible.

En conclusion, la présence de SF_6 dans les appareillages apporte peu à la toxicité de l'atmosphère, générée par un défaut d'arc interne. Cela est effectivement la conclusion établie par une étude menée en 1987 [10].

Il n'y a pas lieu de considérer l'appareillage utilisant le SF_6 dans les procédures et réglementations de façon spéciale, par rapport aux autres appareillages.

NOTE – Les vapeurs de PVC réagissent avec d'autres produits dans l'atmosphère et produisent des produits de décomposition moins toxiques. Les conditions décrites ci-dessus représentent donc un cas très pessimiste.

C.5 Evaluation des résultats

C.5.1 Cas de fuite

Les produits de décomposition du SF_6 résultant d'arcs et de décharge de faible énergie, et s'échappant à la suite de la fuite d'un équipement rempli au SF_6 atteignent des concentrations négligeables dans l'air du lieu de travail. Dans les pires des cas, les concentrations observées en moyenne et haute tension, sont de l'ordre de dix mille fois plus faibles que le TLV.

Il n'y a aucune inquiétude à avoir et aucune précaution particulière à prendre, outre une ventilation normale des endroits situés en profondeur. Cette conclusion est renforcée par les hypothèses simplifiées formulées en C.4.1.

Même dans le cas d'une fuite anormale (par exemple, pour un débit de fuite mille fois supérieur à la normale), ces conclusions restent inchangées.

C.5.2 Défaut d'arc interne

Pour illustrer ces cas, cinq situations rares mais possibles couvrant les applications moyenne et haute tension ont été retenues. Dans la situation la plus sévère, la concentration de SO_2 dans la salle d'appareillage reste très en dessous de la limite C_m d'exposition momentanée (voir C.4.2).

Dans toute situation de ce type, les procédures de sécurité de base comprennent des règles d'évacuation établies pour s'assurer que le personnel n'est pas exposé aux substances éjectées pendant plus de quelques minutes. Par ailleurs, la ventilation forcée et/ou l'aération permettent de réduire le niveau de concentration de ces substances à des valeurs beaucoup plus faibles en l'espace de quelques minutes. Ces actions apportent une marge de sécurité considérable.

Enfin, le SO_2 est facilement détecté par l'odorat, à des concentrations comprises entre environ 1 ppmv et 5 ppmv, permettant ainsi de prendre rapidement des mesures préventives.

Par conséquent, des procédures de sécurité simples permettront de s'assurer que l'exposition effective reste momentanée, et que la santé du personnel ne sera pas mise en danger.

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

The conclusion is that the presence of SF_6 in switchgear and controlgear adds little to the toxicity of the atmosphere generated by an internal fault. This was indeed the conclusion drawn by a study carried out in 1987 [10].

Procedures and regulations should not thus single out switchgear and controlgear using SF_6 as requiring separate treatment.

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

C.5 Assessment of results

C.5.1 Leakage situations

The SF_6 decomposition products, formed by arcing and by low-energy discharges, released due to leakage from SF_6 -filled equipment, reach negligible concentrations in the workplace atmosphere. Under worst-case conditions the concentrations found for both medium-voltage and high-voltage cases are of the order of ten thousand times lower than the TLVs.

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

Even in the case of abnormal leakage situations (a leakage rate for example of a thousand times the normal rate), these conclusions are unchanged.

C.5.2 Internal fault

To illustrate these cases, five rare but plausible situations covering the medium- and high-voltage spectrum have been chosen. In the most severe of these situations, the switchgear and controlgear room concentrations of SOF_2 remain below the momentary exposure limit C_m (see C.4.2).

In any situation of this sort, basic safety procedures include evacuation rules designed to ensure that personnel are not exposed to exhausted materials for more than a few minutes. Furthermore, forced ventilation and/or venting ensure the reduction of the concentration levels to much lower values within minutes. The added safety margins inherent in the application of either or both of the above are considerable.

Finally, SOF_2 is easily detectable by smell at concentrations between about 1 ppmv and 5 ppmv allowing very rapid preventative measures to be taken.

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

C.5.3 Installations à l'extérieur

Pour les cas de fuite et d'arc interne, les calculs sont menés de la même manière que décrite ci-dessus, toutefois, dans ce cas, le volume d'air, dans lequel le SF_6 décomposé s'échappe, est très grand, sinon infini. Les vents dominants et la grande vitesse d'échappement accélèrent l'effet de dispersion. Il est évident que les concentrations obtenues dans le cas de la fuite sont infimes. Dans le cas d'un arc interne, les concentrations vont chuter à une valeur très inférieure au TLV en quelques secondes.

En conclusion, il n'y a aucun risque à craindre pour la santé, lié à la toxicité des émissions des produits de décomposition du SF_6 , d'un appareillage installé à l'extérieur.

C.6 Conclusions

Les résultats des calculs pris en exemple montrent que, dans les situations de fuites, il n'y a aucun risque pour la santé lié à l'exposition aux produits de décomposition du SF_6 .

Ces résultats montrent aussi que, dans le cas peu probable d'un défaut d'arc interne conduisant à un échappement de SF_6 , une concentration significative de produits de décomposition du SF_6 peut survenir dans la salle d'appareillage. Toutefois, les concentrations calculées n'excèdent pas une limite déterminée pour une exposition de courte durée.

On conclut alors que, tant que les procédures normales de sécurité sont respectées, le risque directement lié à l'utilisation du SF_6 dans les appareillages est minime.

Il a aussi été souligné que dans toute situation de défaut interne, des émanations corrosives et/ou toxiques sont produites, qu'il y ait présence ou non de SF_6 . Dans les cas où ces émanations se répandent dans l'atmosphère de la salle d'appareillage, il a été démontré que les produits soumis à un arc et non liés au SF_6 sont les principaux agents contribuant à la toxicité globale. Cela conforte l'opinion que le SF_6 utilisé dans l'appareillage n'ajoute pas de risque significatif supplémentaire à ceux liés à un défaut interne en général.

C.7 Données de calcul

C.7.1 Volume de la salle d'appareillage (valeurs types)

Salle de GIS 245 kV (7 travées): $25 \text{ m} \times 12 \text{ m} \times 6,5 \text{ m} = 2\,000 \text{ m}^3$

Salle de GIS 145 kV (7 travées): $12,5 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 7 \text{ m} = 700 \text{ m}^3$

Salle de distribution MT (utilisée pour les disjoncteurs et les GIS MT)-(15 cellules à disjoncteurs): $10 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 3 \text{ m} = 120 \text{ m}^3$

Local RMU MT (1 ring main unit) (voir aussi C.4.3.1): $4 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 2,5 \text{ m} = 30 \text{ m}^3$

C.5.3 Outdoor installations

Both for leakage and failure cases the calculations are carried out in an identical manner as above, but in this case the volume of air into which the arc decomposed SF_6 escapes is large if not infinite. Prevailing winds and the high exhaust velocity also speed up dispersion. Clearly, for the cases of leakage, the concentrations obtained will be infinitesimal. For the internal fault cases, within seconds the concentrations will fall well below the TLV values.

In conclusion no health risk is to be expected due to the toxicity of SF_6 decomposition product emission from outdoor switchgear and controlgear.

C.6 Conclusions

The results of the sample calculations show that, for leakage situations, there is no risk to health due to exposure to SF_6 decomposition products.

The results also show that, in the unlikely event of an internal fault leading to a release of SF_6 , significant concentrations of SF_6 decomposition products can occur in a switchgear and controlgear room. However, the calculated concentrations do not exceed a substantiated limit for short-term exposure.

It is thus concluded that, as long as normal safety procedures are followed, there is minimal risk specifically associated with the use of SF_6 in switchgear and controlgear.

It has also been stressed that in any internal fault situation, corrosive and/or toxic fumes are produced whether or not SF_6 is present. In cases where these fumes enter the switch-room atmosphere, it has been shown that non- SF_6 related arc products are likely to be the dominant contributors to overall toxicity. This further strengthens the view that the use of SF_6 in switchgear and controlgear does not significantly add to the risks associated with an internal fault.

C.7 Data for calculations

C.7.1 Switchgear and controlgear room volume (typical values)

245 kV GIS hall (7 bays): $25 \text{ m} \times 12 \text{ m} \times 6,5 \text{ m} = 2\,000 \text{ m}^3$

145 kV GIS hall (7 bays): $12,5 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 7 \text{ m} = 700 \text{ m}^3$

MV distribution hal (used for CB and MV GIS cases) (15 circuit-breaker panels):
 $10 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 3 \text{ m} = 120 \text{ m}^3$

MV RMU room (1 ring main unit) (see also C.4.3.1): $4 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 2,5 \text{ m} = 30 \text{ m}^3$

C.7.2 Volume des appareillages et pression de remplissage

Tableau C.8 – Volume des appareillages et pression de remplissage

	Volume litres	Pression MPa absolu
Disjoncteur MT	45	0,3
RMU MT	200	0,1
GIS MT	1 000	0,1
Disjoncteur HT	500	0,5
Jeu de barres GIS	2 000	0,3

C.7.3 Caractéristiques d'arc

C.7.3.1 Coupure de courant de défaut/cas de fuite

L'énergie d'arc indiquée est déterminée pour la somme de trois coupures d'un courant de défaut triphasé, c'est-à-dire neuf fois la valeur d'une coupure de courant monophasé.

Tableau C.9 – Energie d'arc en cas de coupure de courant de défaut

	I kA	U_{arc} V	t_{arc} ms	$9 \times E_{\text{arc}}$ kJ
Disjoncteur MT	31,5	200	15	851
Disjoncteur HT	31,5	500	15	2 126

C.7.3.2 Arc interne/cas de l'échappement instantané

L'énergie d'arc indiquée est celle de N arcs simultanés. Le nombre d'arcs a été choisi pour représenter la situation de défaut interne la plus probable.

Tableau C.10 – Energie d'arc en cas de défauts d'arc interne

	I kA	U_{arc} V	t_{arc} ms	N	E_{arc} kJ
GIS 245 kV	40	1 000	100	1	4 000
GIS 145 kV	31,5	1 000	100	2	6 300
GIS MT	25	300	100	1	750
Disjoncteur MT	25	200	100	1	500
RMU MT	16	250	100	2	800

Les valeurs de durée d'arc sont un compromis entre la durée réelle de l'arc, le fonctionnement des dispositifs de décharge de pression, le percement de l'enveloppe, la constance de l'environnement de l'arc et le domaine de validité des données disponibles concernant le taux de production. Une extrapolation linéaire au-dessus d'environ deux fois ces valeurs va donc provoquer une importante surestimation de ces résultats (voir C.4.3.2).

C.7.2 Switchgear and controlgear volume and filling pressure

Table C.8 – Switchgear volume and filling pressure

	Volume litres	Pressure MPa absolute
MV breaker	45	0,3
MV RMU	200	0,1
MV GIS	1 000	0,1
HV breaker	500	0,5
GIS bus	2 000	0,3

C.7.3 Arcing characteristics

C.7.3.1 Fault current interruption/leakage situation

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

Table C.9 – Arc energies for interruptions

	I kA	U_{arc} V	t_{arc} ms	$9 \times E_{\text{arc}}$ kJ
MV CB	31,5	200	15	851
HV CB	31,5	500	15	2 126

C.7.3.2 Internal fault/exhaust situation

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

Table C.10 – Arc energies for internal faults

	I kA	U_{arc} V	t_{arc} ms	N	E_{arc} kJ
245 kV GIS	40	1 000	100	1	4 000
145 kV GIS	31,5	1 000	100	2	6 300
MV GIS	25	300	100	1	750
MV CB	25	200	100	1	500
MV RMU	16	250	100	2	800

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

C.7.4 Taux de production de SOF_2

La quantité de gaz formé lors d'une décharge électrique est généralement donnée en quantité générée par joule d'énergie dissipée (le taux de production, r).

Les taux de production de SOF_2 déterminés expérimentalement dépendent du matériau utilisé pour les électrodes et du type de décharge pris en compte. Les réactions exothermiques se produisant avec des électrodes en aluminium semblent accroître le taux de production.

Les résultats expérimentaux sont généralement exprimés en moles/joule, mais en pratique, il est plus aisé de convertir cela en litres/kilojoule. Cette conversion est réalisée en se basant sur le fait qu'une mole de n'importe quel gaz occupe 24,45 l à 25 °C et à pression atmosphérique.

Les valeurs utilisées ici sont des moyennes calculées à partir de l'ensemble des valeurs trouvées dans la littérature existante [4, 30, 31, 60].

Tableau C.11 – Taux de production de SOF_2

Matériau des électrodes	Taux de production de SOF_2 (r)	
	Moles/joule	Litres/kJ
Cu, Fe, WCu	$150 \cdot 10^{-9}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$
Al	$600 \cdot 10^{-9}$	$15 \cdot 10^{-3}$

NOTE – Les valeurs figurant pour les électrodes en aluminium sont utilisées uniquement dans les cas de calculs concernant les jeux de barres des GIS.

C.7.5 Quantité de SOF_2 formé

Celle-ci est déterminée à partir de l'énergie d'arc et des taux de production.

Tableau C.12 – Quantité de SOF_2 formé

	Moyenne tension		Haute tension	
	Moles	Litres à 0,1 MPa	Moles	Litres à 0,1 MPa
Fuite	0,13	3,15	0,319	7,87
Arc interne				
GIS 245 kV			2,4	60
GIS 145 kV			3,8	95
GIS MT	0,45	11,25		
Disjoncteur MT	0,075	1,9		
RMU MT	0,12	3,0		

C.7.4 SOF_2 production rates

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

Experimentally determined SOF_2 production rates depend on the electrode material used and the type of discharge considered. Exothermic reactions, which occur with aluminium electrodes, seem to enhance the production rate.

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

The values used here have been averaged over the range of presently available data found in the literature [4, 30, 31, 60].

Table C.11 – SOF_2 production rates

Electrode material	SOF_2 production rate(r)	
	Moles/joule	Litres/kJ
Cu, Fe, WCu	$150 \cdot 10^{-9}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$
Al	$600 \cdot 10^{-9}$	$15 \cdot 10^{-3}$

NOTE – Aluminium electrodes are assumed only for GIS busbar situations.

C.7.5 Quantity of SOF_2 formed

This is found from arc energy and production rates.

Table C.12 – Quantities of SOF_2 formed

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

C.7.6 Taux de fuite

Les taux de fuite pour l'appareillage scellé à vie sont exprimés en volume de SF₆ échappé par seconde et par la pression de remplissage exprimée en bars relatifs.

Pour l'appareillage à pression autonome, le taux de fuite est le rapport du gaz échappé annuellement par rapport à la masse totale de gaz; cela est exprimé en pourcent.

Les valeurs typiques pour les disjoncteurs triphasés sont données ci-dessous, avec leur conversion en SF₆ échappé quotidiennement (24 h) et, pour les disjoncteurs moyenne tension, par la pression de remplissage exprimée en bars relatifs.

Tableau C.13 – Taux de fuite de SF₆

	Disjoncteur MT	Disjoncteur HT
Taux de base	$3 \cdot 10^{-6}$ cm ³ /s/MPa-relatif	0,5 % volume total SF ₆ /an
Taux journalier	$27 \cdot 10^{-5}$ l/jour/MPa-relatif	$13,7 \cdot 10^{-6}$ x (volume SF ₆) l/jour

C.7.7 Taux de fuite de SOF₂ (en utilisant les données de C.7.5 et de C.7.6)

Tableau C.14 – Taux de fuite de SOF₂

	Moyenne tension	Haute tension
Volume SOF ₂ formé (litres à 0,1 MPa absolu)	3,15	7,87
Volume total de SF ₆ (litres à 0,1 MPa absolu)	135	2 500
Rapport SOF ₂ /SF ₆ dans le disjoncteur	2,33 %	0,31 %
Pression de remplissage (MPa absolu)	0,3	0,5
Taux de fuite de SOF ₂ (litres par jour) ¹⁾	$1,26 \cdot 10^{-6}$	$107,8 \cdot 10^{-6}$
¹⁾ C'est la quantité de SOF ₂ accumulée après 24 h de fuite dans un local non ventilé.		

C.8 Limites d'exposition

Les termes utilisés pour désigner les limites tolérables d'exposition peuvent être classés en deux groupes:

- ceux servant à spécifier les conditions dans lesquelles une personne peut travailler en continu sans équipement de protection, par exemple, le TLV;
- ceux servant à spécifier des situations anormales ou exceptionnelles d'exposition momentanée, et où les personnes présentes doivent évacuer l'endroit, par exemple, le IDLH.

C.8.1 Threshold Limit Value (TLV)

La concentration maximale admissible (TLV) est un terme créé à l'instigation de l'American Conference of Industrial Hygienists (ACGIH). Cette expression se rapporte à la concentration maximale d'un élément ou d'une substance, considérée comme physiologiquement et physiquement acceptable pendant un temps d'exposition déterminé.

C.7.6 Leakage rates

Leakage rates for sealed-for-life switchgear and controlgear are given as SF₆ volume lost per second per bar gauge of filling pressure.

For refillable switchgear and controlgear the leakage rate is given as a percentage of total gas loss per year.

Typical values for three-phase circuit-breakers are given below with conversion into total leaked SF₆ per day (24 h) and, for the medium-voltage case, per bar gauge of filling pressure.

Table C.13 – SF₆ leakage rates

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

C.7.7 SOF₂ leakage rates (using data from C.7.5 and C.7.6)

Table C.14 – SOF₂ leakage rates

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

C.8 Exposure limits

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

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

C.8.1 TLV-Threshold Limit Value

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